

70-ЛЕТИЮ ВЕЛИКОЙ ПОБЕДЫ ПОСВЯЩАЕТСЯ



ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

ЭНЕРГИЯ-2015

ДЕСЯТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

21-23 апреля 2015 г.
г. Иваново

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»
Объединенный институт высоких температур Российской Академии Наук
Российский национальный комитет СИГРЭ (Молодежная секция)
Академия электротехнических наук РФ

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

«ЭНЕРГИЯ-2015»

ДЕСЯТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

г. Иваново, 21-23 апреля 2015 г.

Сборник конкурсных докладов

УДК 620 + 621 + 628 + 519.6 + 004.9
ББК 31 + 30.1 + 34.5 + 32.97
М 34

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ // Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Энергия-2015»: Сборник конкурсных докладов. – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2015. – 192 с.

В сборнике конкурсных докладов собраны наиболее интересные доклады, представленные студентами, аспирантами и молодыми учеными в рамках Десятой международной научно-технической конференции «Энергия-2015» 21 – 23 апреля 2015 года в ИГЭУ.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов и преподавателей вузов, а также широкого круга лиц, интересующихся вопросами тепловой и атомной энергетики, электроэнергетики, электромеханотроники и управления, математического моделирования и информационных технологий.

Все доклады, помещенные в сборник, прошли рецензирование и получили положительную оценку научных руководителей. Материалы докладов представлены авторами в виде файлов, сверстаны и при необходимости сокращены. Авторская редакция сохранена.

ISBN 978-5-00062-127-1

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель оргкомитета: ТЮТИКОВ В.В., проректор по научной работе ИГЭУ.

Зам. председателя: Макаров А.В., начальник управления НИРС и ТМ ИГЭУ.

Члены научного комитета: Плетников С.Б. – декан ТЭФ ИГЭУ; Андрианов С.Г. – декан ИФФ ИГЭУ; Сорокин А.Ф. – декан ЭЭФ ИГЭУ; Егоров В.Н. – декан ЭМФ ИГЭУ; Кокин В.М. – декан ИВТФ ИГЭУ; Карякин А.М. – декан ФЭУ ИГЭУ; Гофман А.В. – руководитель МС РНК СИГРЭ.

Ответственный секретарь: Ведерникова И.И. – отв. за НИРС ЭМФ ИГЭУ.

Секретарь: Вольман М.А. – отв. за НИРС ИФФ ИГЭУ .

Координационная группа: Маршалов Е.Д., Смирнов Н.Н., Иванова О.Е., Ильченко А.Г., Шадриков Т.Е.

I. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Тепловые электрические станции
- Промышленная теплоэнергетика
- Автоматизация технологических процессов
- Технология воды и топлива
- Теоретические основы теплотехники
- Энергоресурсосбережение
- Экология ТЭС и промышленных предприятий
- Паровые и газовые турбины

Отладка и ввод в эксплуатацию двухцелевого лабораторного стенда по определению области применения уравнения Ван-дер-Ваальса и изучению эффекта Джоуля-Томсона

А.С. Семенов, И.М. Чухин

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина (ИГЭУ)

г. Иваново, Российская Федерация

e-mail lekapereslavl.ru@gmail.com, chuhin@tot.ispu.ru

Аннотация — Приведены данные отладки и ввода в эксплуатацию двухцелевого учебного лабораторного стенда по определению области применения уравнения Ван-дер-Ваальса и изучению эффекта Джоуля-Томсона в рамках дисциплины «Техническая термодинамика»

Ключевые слова — лабораторный стенд; дросселирование; уравнение Ван-дер-Ваальса; эффект Джоуля-Томсона; техническая термодинамика

Debugging and commissioning of dual- laboratory bench to determine the scope of the van der Waals and studying the Joule-Thomson effect

Alexei Semenov, Ivan Chuhin

Ivanovo state power university

Ivanovo, Russia

e-mail lekapereslavl.ru@gmail.com, chuhin@tot.ispu.ru

Abstract — The data debugging and commissioning of dual- training laboratory bench to determine the scope of the van der Waals and studying the Joule-Thomson effect in the discipline «Engineering Thermodynamics»

Keywords — laboratory bench; throttling; the van der Waals forces; Joule-Thomson effect; technical thermodynamics

I. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данной работы вызвана приобретением нового учебного лабораторного стенда кафедрой теоретические основы теплотехники (ТОТ) ИГЭУ (рис. 1).



Рис. 1. Лабораторный стенд по изучению эффекта Джоуля-Томсона

Стенд предназначен для определения области применения уравнения Ван-дер-Ваальса и для изучения эффекта Джоуля-Томсона применительно к атмосферному воздуху в рамках дисциплины «Техническая термодинамика часть 1 и 2» (ТТД ч.1 ч.2).

Цель работы заключается в следующем:

- провести опытное тестирование стенда;
- определить области допустимых режимов работы стенда;
- адаптировать стенд к выполнению студентами двух лабораторных работ;
- разработка и написание методических указаний для выполнения студентами теплотехнических специальностей двух лабораторных работ по

определению области применения уравнения Ван-дер-Ваальса и изучению эффекта Джоуля-Томсона.

II. ОПИСАНИЕ СТЕНДА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Приборная панель и схема рабочего участка стенда представлены на рис. 2 и 3.

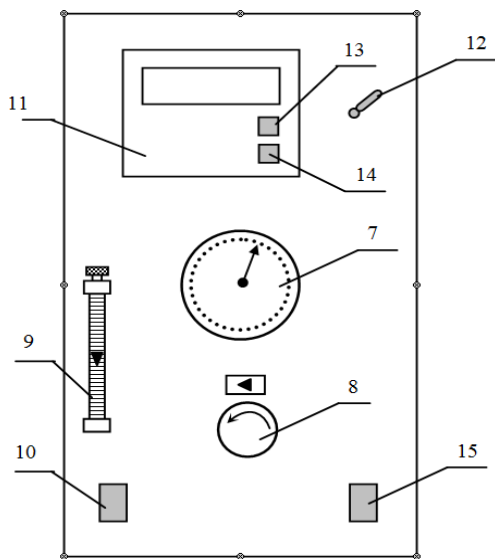


Рис. 2. Приборная панель стенда по изучению эффекта Джоуля-Томсона

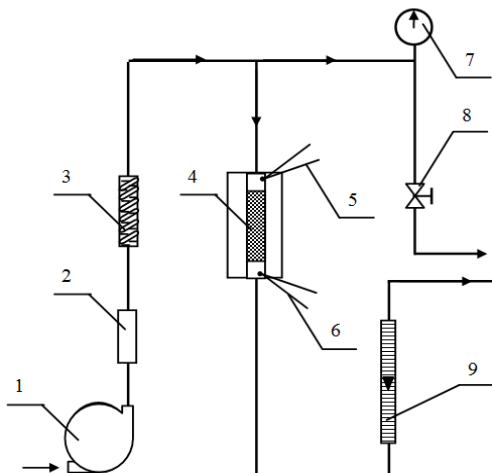


Рис. 3. Схема рабочего участка стенда по изучению эффекта Джоуля-Томсона

Обозначения элементов установки: 1 – компрессор, 2 – ресивер-сепаратор, 3 – холодильник, 4 – пористая войлочная пробка в тепловой изоляции (дроссельное устройство), 5 – термопара на входе в дроссель, 6 – термопара на выходе из дросселя, 7 – манометр, 8 – регулирующий вентиль, 9 – ротаметр, 10 – кнопка включения установки «сеть», 11 – показывающий прибор 2ТПМО для измерения температур, 12 – тумблер включения прибора 2ТПМО, 13 – кнопка подключения термопары 5 (t_1), 14 – кнопка подключения термопары 6 (t_2), 15 – кнопка включения (отключения) компрессора.

Принцип работы установки: воздух из помещения лаборатории с помощью компрессора (1) поступает в ресивер-сепаратор (2), в котором происходит поддержание давления воздуха на постоянном уровне и устраняются пульсации давления, далее воздух проходит через спиральный теплообменник холодильника (3), который поддерживает температуру на выходе из него близкой к температуре окружающей среды. Далее поток воздуха разветвляется на два направления, один из которых идёт на дроссельное устройство (4), а другой проходит через регулирующий вентиль (8) и выбрасывается в атмосферу. С помощью вентилей (8) устанавливается необходимое давление воздуха перед дросселем (5), которое фиксируется манометром (7). Второй поток проходит через дроссельное устройство (4), представляющее собой цилиндрическую трубку, заполненную уплотнённым войлоком, эта трубка покрыта теплоизоляционным материалом, что обеспечивает процесс адиабатного дросселирования. Измерение температуры воздуха на входе и выходе из дроссельного устройства осуществляется двумя термопарами (5 и 6), подключенными к прибору, измеряющему температуры (11). Далее воздух проходит через ротаметр (9), с помощью которого определяется объёмный расход воздуха, а после ротаметра воздух сбрасывается в атмосферу.

Порядок проведения опыта

1. Включить установку кнопкой 10 «сеть».
2. Включить прибор для измерения температур 11 тумблером 12, замерить температуры воздуха на входе в дроссель t_1 , нажав кнопку 13, и на выходе из дросселя t_2 , нажав кнопку 14.
3. Включить кнопкой 15 компрессор 1.
4. Установить по манометру 7 давление воздуха на входе в компрессор $0,2 \pm 0,3$ МПа поворотом вентилей 8 по часовой стрелке (недопустимо превышение давления более 0,6 МПа).
5. Через 1 – 2 минуты после включения компрессора произвести замеры температур t_1 и t_2 по прибору 11.
6. Произвести измерение объёмного расхода воздуха через дроссель по ротаметру 9.
7. Выключить компрессор кнопкой 15.

III. ТЕСТИРОВАНИЕ СТЕНДА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Цель первой работы, заключается в определении коэффициента a в уравнении Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT. \quad (1)$$

Эта цель реализуется двумя способами: первый непосредственно из уравнения (1), подстановкой в него параметров одного из состояний газа в процессе дросселирования, приняв коэффициент $b=0$,

$$a = RT_1 v_1 - p_1 v_1^2, \quad (2)$$

второй способ, используя параметры двух состояний газа в процессе дросселирования,

$$a = \frac{v_2 v_1}{v_2 - v_1} [c_v (T_1 - T_2) + (p_1 v_1 - p_2 v_2)]. \quad (3)$$

Результаты опытного тестирования стенда по первой работе представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ СТЕНДА ПО ПЕРВОЙ РАБОТЕ

Номер опыта	a (метод 1), (Нм ⁴)/кг ²	a (метод 2), (Нм ⁴)/кг ²
1	-19,027	85,299
2	20,524	313,778
3	-12,611	408,389
4	-18,824	431,124
5	-18,808	446,416
6	-12,577	445,494
7	-25,188	391,626

Оценка качества полученных опытных результатов велась путем их сравнения с эталонной величиной коэффициента $a=116-138,7$ (Нм⁴)/кг², полученной из безразмерного уравнения Ван-дер-Ваальса [1] по критическим параметрам атмосферного воздуха.

Цель расчёта второй работы, заключается в определении коэффициента адиабатного дросселирования (дифференциального дроссельного эффекта Джоуля-Томсона) непосредственно по параметрам газа в процессе дросселирования по формуле

$$\alpha_h = \left(\frac{\Delta t}{\Delta p} \right)_h. \quad (4)$$

Результаты опытного тестирования стенда по второй работе представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ СТЕНДА ПО ВТОРОЙ РАБОТЕ

Номер опыта	Δp , МПа	Δt , °C	α_h
1	0,2	0	0
2	0,3	-1,3	4,333
3	0,4	-2,2	5,5
4	0,5	-2,5	5
5	0,6	-3,1	5,167
6	0,7	-3,7	5,286
7	0,8	-4,1	5,125

Анализ опытных результатов второй работы показывает на снижении температуры в процессе дросселирования газа, начиная со второго опыта, что вполне соответствует литературным данным [2].

После тестирования стенда были выбраны оптимальные параметры его работы и написаны методические указания по выполнению лабораторных работ. В дополнение к методическим указаниям были сняты видеоролики по описанию стенда и порядку выполнения лабораторных работ.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании тестовых испытаний стенда и полученных результатов расчётов можно сделать следующие выводы:

- стенд можно использовать для выполнения студентами заявленных двух лабораторных работ по методикам, предложенных авторами;
- в интервале перепадов давлений при дросселировании от 0,2 до 0,4 МПа правомочно использование уравнения Ван-дер-Ваальса для воздуха;
- при определении коэффициента a для уравнения Ван-дер-Ваальса более объективные значения получаются при использовании метода 2;
- дифференциальный дроссельный эффект Джоуля-Томсона наглядно проявляется начиная с перепада давлений 0,4 МПа и более;
- написаны методические указания для выполнения студентами двух лабораторных работ по определению области применения уравнения Ван-дер-Ваальса (дисциплина ТТД ч.1) и изучению эффекта Джоуля-Томсона (дисциплина ТТД ч.2).

Список литературы

- [1] Чухин, И.М. Техническая термодинамика. Ч. 1.: учеб. пособие / И.М.Чухин; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина». – Иваново, 2006. – 224 с.
- [2] Чухин, И.М. Техническая термодинамика. Ч. 2: учеб. пособие / И.М. Чухин; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 228 с.

References

- [1] Chuhin , I.M. Technical thermodynamics . Part 1.: Textbook. Benefit / I.M. Chuhin ; Federal Agency for Education , VPO «Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin». - Ivanovo , 2006. - 224 p.
- [2] Chuhin , I.M. Technical thermodynamics . Part 2 : Textbook. Benefit / I.M. Chuhin ; Federal Agency for Education , VPO «Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin». - Ivanovo , 2008. - 228 p.

Особенности системного анализа энергетической установки через её удельные характеристики

В.И. Игонин, Н.В. Мнушкин
ФГБОУ ВПО «Вологодский государственный университет»
г. Вологда, Россия
igonvlad@yandex.ru, mnushkinnv@gmail.com

Аннотация — показаны системные особенности и пути получения обобщенных удельных энергопоказателей для устройств энергопреобразователей разного конструктивного оформления и сложности. В связи с появлением на рынке множества разнообразных теплоэнергетических устройств разработка обобщенных показателей, позволяющих проводить оценку их энергопотребления и стоимости является весьма актуальной проблемой.

Ключевые слова — методика многоуровневого моделирования, системный многоуровневый анализ, обобщенные удельные показатели, источники генерации и потребления теплоты, удельные энергоценовые характеристики, преобразователи энергии разного типа, сравнение эффективности энергопреобразований в разных устройствах, диссипация энергетических и ценовых потоков.

Features of the system analysis of the power plant through its specific characteristics

V.I. Igonin, N.V. Mnushkin
Vologda State University
Vologda, Russia
igonvlad@yandex.ru, mnushkinnv@gmail.com

Abstract — shows the system features and ways of obtaining generalized specific energopokazateley devices energy converters different constructive design and complexity. In connection with the introduction of a variety of different heat power devices enable the development of generic indicators to assess their energy consumption and cost is a very urgent problem.

Keywords — multilevel modeling technique, the system multi-level analysis, generalized specific indicators, sources of generation and consumption of heat energotsenovye specific characteristics of different types of energy converters, to compare the efficiency of energy conversion in different devices, power dissipation and price flows.

Новизна. Использование методики многоуровневого моделирования и системного анализа, позволяет получить обобщенные удельные показатели для источников генерации и потребления теплоты. Показатели включают в себя удельные энергетические характеристики, которые учитывают все преобразования энергии, что позволяет определять и сравнивать эффективность энергопреобразования в разных устройствах диссипативного типа.

Цель. Разработать методику получения обобщенных удельных энергопоказателей для устройств энергопреобразователей разного конструктивного оформления и сложности.

Актуальность. В связи с появлением на рынке множества разнообразных теплоэнергетических устройств разработка обобщенных показателей, позволяющих

проводить оценку их энергопотребления и стоимости является весьма актуальной проблемой [1], [2].

Для исследований выбраны две группы, различных по исполнению установок, служащих для создания и регулирования микроклимата в помещении, фирмы Kospel, Dakon, РусНит, Ермак, Thermo, Electrolux, Nobo, Ballu.

Сравним эффективность накопления энергии и ценообразования для указанных выше типов электротеплоэнергетических систем. Организуем несколько удельных показателей, которые помогут комплексно охарактеризовать параметрическое отличие разных электротепловых систем, не проводя углубленных термодинамических расчетов. Один из таких показателей $K_{у.э.с}$ — удельный коэффициент энергетического состояния представлен из соображений [1], [2], формулой (1):

$$K_{уэс} = \Delta \mathcal{E}_{пот} / (F \cdot t_{вн}), \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{°C}, \quad (1)$$

где $\Delta \mathcal{E}_{пот}$ – потенциал мощности или энергопотенциал устройства, кВт, F – условно предполагаемая площадь отопляемого помещения в м^2 , $t_{вн}$ – температура воздуха внутри помещения, $^{\circ}\text{C}$. Энергопотенциал устройства в нашем случае равен выходной мощности системы (изделия), увеличенной за счет ее деления на коэффициент преобразования мощности $K_{п.м.} = \Delta N_{вых} / \Delta N_{вх}$, где $\Delta N_{вых}$ и $\Delta N_{вх}$ – выходная и входная мощность устройства соответственно.

Второй удельный энергетический показатель назовем коэффициентом стоимости удельного энергетического показателя. Он находится по формуле (2), (кВт/ЕUR* $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$):

$$A = K_{уэс} / B, \quad (2)$$

где $K_{уэс}$ – удельный коэффициент энергетического состояния, определяющийся по формуле (1), кВт/м $^2 \cdot \text{°C}$; B – цена устройства (EUR).

Построим искомый функционал (3), связывающий все параметры задачи:

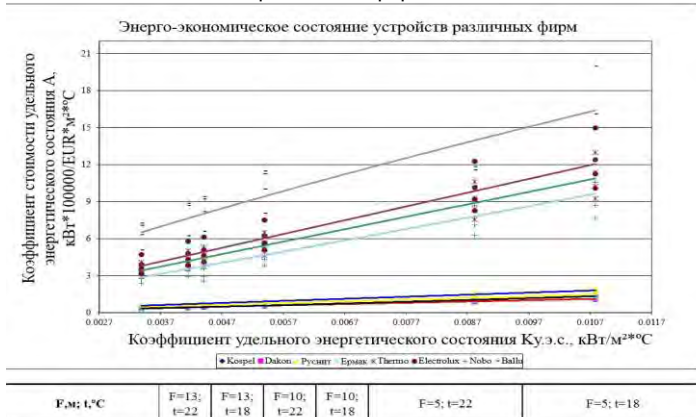
$$Y = F(h, v) = [\Delta \mathcal{E}_{пот}, K_{уэс}, A] = F[(\Delta N, K_{п.м.}, B), (F, t_{пом})], \quad (3)$$

где Y матрицы выходных, h – входных внешних и внутренних v параметров системы.

Принятое условие. Прямопропорционально увеличению мощности теплоприготавливающей установки увеличивается площадь отопляемого помещения. Для начального варианта анализа эта зависимость принята из расчета 1 кВт мощности устройства на 10 м^2 .

При разных температурных условиях коэффициент энергетического состояния для всех устройств одинаков и изменяется от $K_{уэс} = 0,0045 - 0,0054$ (рис. 1).

Рисунок 1 – Связь энергетических показателей помещения, мощности и ценовых показателей теплотехнических устройств различных фирм



Отсюда можно заключить, что полученная удельная параметрическая характеристика имеет при определенных условиях постоянное значение и может быть принята в качестве обобщенного параметра для двух групп теплоэнергетических изделий разного конструктивного исполнения.

Получены комплексные критерии, позволяющие характеризовать энергетическое состояние помещения и установки в соответствии с выбираемой оптимальной ценой стоимости энергетического продукта. Анализ функциональных связей показывает, что за одну денежную единицу можно воспроизвести меньшее или большее удельное энергетическое состояние. Т.е. существуют разные модельные реальности (реальные и

абстрактные цены) одного и того же энергетического продукта. Анализ показал, что в нашем случае эффект обесценения энергии существует и составляет величину равную примерно 9.3 раза. Для обесценения удельного энергетического состояния мы можем платить разные цены. чем больше коэффициент A , тем больше энергии при прочих равных условиях можно воспроизвести с помощью данного устройства данной фирмы. Что подтверждает справедливость аналогии, проводимой между энергетическими и стоимостными процессами.

Для изделий первой и второй групп (ЭТК и ЭТГК) коэффициент удельного энергетического состояния с изменением варьируемого параметра (рис.1) меняется в основном по линейному закону. Он имеет свои значения для изделий данной фирмы и зависит от цены и энергетического наполнения приемника энергии. A меняется для каждой фирмы по разным законам близким к линейным. Указан алгоритм определения избытка диссипационной стоимости для энергетического продукта.

Список литературы

- [1] Олемской, А.И. Синергетика сложных систем: Феноменология и статистическая теория/А.И. Олемской -М.: КРАСАНД, 2009 - 384с.
- [2] Игонин, В.И. Пути повышения эффективности теплоэнергетических систем: Монография. /В.И. Игонин. -Вологда: ВоГТУ, 2007. -119 с.

References

- [1] Olemskoj, A.I. Sinergetika slozhnyh sistem: Fenomenologija i statisticheskaja teorija, Moscow: KRASAND, 2009, 384 pp.
- [2] Igonin, V.I. Puti povysheniya jeffektivnosti teploenergeticheskijh sistem: Monografija, Vologda: VoGTU, 2007, 119 pp.

Расчет пластинчатого теплообменного аппарата

Д.А.Кругликов, Г.Н. Щербакова, В.В. Бухмиров
ФГБОУ «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Выполнено экспериментальное и расчетное исследование режимов работы пластинчатого теплообменного аппарата, установленного в лаборатории кафедры теоретических основ теплотехники. Сделан вывод о допуске к эксплуатации лабораторного стенда по изучению пластинчатого теплообменника в лаборатории кафедры ТОТ.

Ключевые слова — пластинчатый теплообменник, экспериментальное исследование, расчет коэффициента теплопередачи

Calculation of the plate heat exchanger

Dmitrij Kruglikov, Galina Shcherbakova, Vjacheslav Buhmirov
Ivanovo State Power Engineering University
Ivanovo, Russia
E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Abstract — An experimental and computational study of operating modes of the plate heat exchanger installed in the laboratory of the department of theoretical basics of heat exchange was made. The admission to operation of the laboratory stand for the study of the plate heat exchanger in the laboratory was concluded.

Keywords — plate heat exchanger, experimental research, heat transfer coefficient calculation

I. АКТУАЛЬНОСТЬ

Пластинчатые теплообменные аппараты являются основным тепловым оборудованием центральных тепловых пунктов (ЦТП) и индивидуальных тепловых пунктов (ИТП). Главной задачей расчета теплообменного аппарата является определение параметров эффективности его работы. Основным параметром эффективности работы подогревателя является коэффициент теплопередачи. В лабораторном практикуме кафедры ТОТ исследование пластинчатого теплообменного аппарата проводится впервые, т.к. экспериментальная установка смонтирована в декабре 2014 года. Результаты экспериментальных и расчетных исследований позволят включить в лабораторный практикум новую лабораторную работу «Расчет современного пластинчатого теплообменного аппарата».

II. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

К основным достоинствам пластинчатых теплообменников относят:

- высокое значение коэффициента теплопередачи от греющего теплоносителя к нагреваемому;
- небольшие габариты;
- надежность в эксплуатации.

К недостаткам пластинчатых теплообменников можно отнести их относительно высокую стоимость и необходимость чистки каналов при увеличении их гидравлического сопротивления выше допустимых значений.

III. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Существуют две группы пластинчатых теплообменных аппаратов: разборные и паяные.

Конструкция разборного пластинчатого теплообменника состоит из набора гофрированных пластин, изготовленных из коррозионностойкого материала, с каналами для двух теплоносителей, участвующих в процессе теплообмена. Пакет пластин размещается между опорной и прижимной плитами и закрепляется стяжными болтами. Каждая пластина снабжается уплотнительной прокладкой из термостойкой

резины, которая герметично изолирует канал и направляет потоки жидкости с различной температурой в чередующиеся каналы.

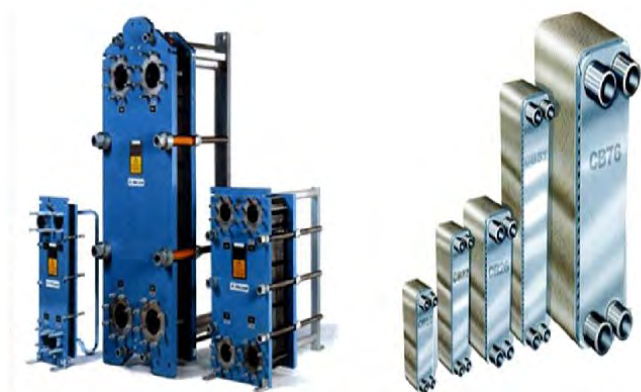


Рис. 1. Разборный и паяный теплообменные аппараты

Паяный пластинчатый теплообменный аппарат состоит из пакета тонких гофрированных металлических пластин, размещенных между двумя торцевыми пластинами. В единый теплообменный блок пластины соединены способом пайки в вакуумной печи. Рабочие теплоносители движутся по чередующимся каналам в режиме противотока (навстречу друг другу).

Пластины теплообменников имеют гофрированную форму и выпускаются 2-х типов с различной глубиной штамповки:

- Тип В – с глубиной штамповки 2,5 мм (мелкая штамповка)
- Тип М – с глубиной штамповки 4 мм (глубокая штамповка)

Пластины с разной глубиной штамповки не совмещаются между собой. Теплообменники выпускают с двумя вариантами пластин, которые отличаются углом раскрытия гофры. Пластины с большим углом наклона гофр 60 градусов (тип Н) характеризуются высокой эффективностью теплообмена, но при этом обладают большим гидравлическим сопротивлением. Пластины с меньшим углом наклона гофр 30 градусов (тип L). Имеют меньшую теплоотдачу при меньшем значении гидравлического сопротивления. Две пластины образуют канал для прохождения теплоносителя. При наличии двух типов пластин можно скомпоновать 3 типа канала:

- пластины Н и Н образуют Н-канал;
- пластины L+L образуют L-канал;
- пластины L+H или H+L образуют М-канал

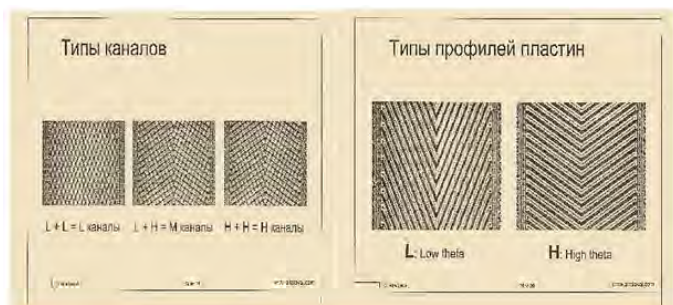


Рис. 2. Типы профилей пластин и каналов теплообменника

Пластинчатый теплообменник, установленный в лаборатории кафедры ТОТ, имеет Н-пластины типа В и Н-каналы.

IV. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Экспериментальная установка: 1 – пластинчатый теплообменник; 2 – водонагреватель; 3 – насос водонагревателя; 4 – радиатор (холодильник); 5 – насос радиатора; 6, 7 – измерители расхода горячего и холодного теплоносителей; 8, 9 – измерители температур; 10, 11 – электронные расходомеры

Греющий контур экспериментальной установки состоит из водонагревателя (2) и насоса водонагревателя (3). Охлаждающий контур включает в себя радиатор (4) и насос радиатора (5).

Для измерения температур горячего и холодного теплоносителей на входе и выходе из теплообменника установлены приборы (8,9). Для измерения расходов теплоносителей используются электронные расходомеры (10,11).

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

В ходе эксперимента при различных режимах работы теплообменного аппарата были измерены температуры и расходы горячего и холодного теплоносителей.

Опытные данные приведены в таблице 1. В первых четырех колонках – значения температур соответственно: горячего теплоносителя на входе и на выходе из теплообменника и холодного теплоносителя на входе и на выходе из теплообменного аппарата (обозначения: T_1' , T_1'' , T_2' , T_2'' , в °C). В следующих колонках – значения объёмных расходов горячего и холодного теплоносителей в м³/с (G_1 , G_2)

Таблица 1. Результаты эксперимента

№	T_1' , °C	T_1'' , °C	T_2' , °C	T_2'' , °C	G_1 , 10^{-6} м ³ /с	G_2 , 10^{-6} м ³ /с
1	45,3	43,5	41,5	43,6	61,5	46,95
2	51,7	49,3	47	49,9	58	45,9
3	57,3	53,7	51,8	55,0	54,5	61,1
4	54,7	52,4	49,7	51,8	61	54,6

Продолжение таблицы 1.

№	T ₁ , °C	T ₁ '', °C	T ₂ , °C	T ₂ '', °C	G ₁ , 10 ⁻⁶ м ³ /с	G ₂ , 10 ⁻⁶ м ³ /с
5	55,1	52,1	49,3	52,4	57,54	45,9
6	58,0	54,7	51	54,5	56,3	44,62
7	47,3	45,1	42,8	45,4	70,67	54,85
8	59,6	56,5	53,6	56,9	59,1	38,2
9	61,1	58,5	54,5	58,1	59,1	40,9
10	59,8	56,7	53,1	56,4	58,14	37,65

Для расчета коэффициента теплопередачи использованы уравнения [1]:
– теплового баланса

$$G_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_1'' - T_1') = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_2'' - T_2'), \quad (1)$$

где G_1 и G_2 – массовые расходы холодного и горячего теплоносителя, кг/с; c_{p1} и c_{p2} – удельные массовые изобарные теплоемкости холодного и горячего теплоносителей, Дж/(кг · К); T_1' и T_1'' – температуры горячего теплоносителя на входе и выходе из теплообменника, °C; T_2' и T_2'' – температуры холодного теплоносителя на входе и выходе из теплообменника, °C.

– теплопередачи

$$Q = k \cdot \Delta T \cdot F, \quad (2)$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·К; ΔT – средняя разность температур между холодным и горячим теплоносителем, °C; F – площадь поверхности теплообмена, м². Для пластинчатого теплообменного аппарата типа СВ14 по технической документации эффективная площадь $F=0,336$ м².

Среднюю разность температур рассчитывают по формуле:

$$\Delta \bar{T} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}}, \quad (3)$$

где ΔT_{\max} и ΔT_{\min} – максимальная и минимальная разность температур теплоносителей.

Таблица 2. Результаты расчета

№	ΔT, °C	T _{1cp} , °C	T _{2cp} , °C	c _{p1} , Дж/кг·К	c _{p2} , Дж/кг·К	Q ₁ , Вт	Q ₂ , Вт	k, Вт/м ² ·К
1	1,84	44,4	42,6	4166,5	4165,1	458,7	407,6	657
2	2,04	50,5	48,5	4174,3	4169,8	574,3	549,3	802
3	2,1	55,5	53,4	4176,8	4175,7	807	804	1143
4	2,8	53,6	50,8	4175,8	4174,4	577,2	473	503
5	2,8	53,6	50,9	4175,8	4174,4	710,9	587	635
6	3,6	56,3	52,8	4177,2	4175,4	764,5	644	533
7	2,1	46,2	44,1	4167,9	4171,1	642,6	589,3	838
8	2,8	58,1	55,3	4178,0	4176,6	753,8	519,2	552
9	3,47	59,8	56,3	4178,9	4177,1	631,4	605,9	519
10	3,49	58,3	54,8	4178,1	4176,4	741,0	511,7	435

В таблице 2 приведены расчетные значения: среднего температурного напора рекуператора (ΔT); средние значения температур горячего и холодного теплоносителей (T_{1cp} , T_{2cp}), по которым были определены теплофизические свойства теплоносителей; тепловая мощность горячего и холодного теплоносителей (Q_1 и Q_2) и экспериментальное значение коэффициента теплопередачи теплообменника (k).

VI. РАСЧЕТ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА НА ЭВМ

Стандартное программное обеспечение CAS200 фирмы Alfa Laval [2] предназначено для расчета и выбора пластинчатых теплообменников разборного и паяного типов.

Выполним расчет пластинчатого теплообменника в 2 этапа:

- тепловой конструктивный расчет;
- тепловой поверочный расчет.

1. Тепловой конструктивный расчет

Тепловой конструктивный расчет соответствует режиму ‘Design’ (окно 1, рис.4). Информация о горячем теплоносителе выделена красным цветом. В окна 2,3,4,7 и 9 вводим соответственно: вид горячего теплоносителя – вода, температуры горячего теплоносителя на входе и выходе из теплообменника, расход теплоносителя, допустимые потери напора (по техническим характеристикам).

Информация о холодном теплоносителе выделена синим цветом. После ввода исходных данных о холодном теплоносителе в соответствующие окна получим расчетное значение тепловой мощности теплообменника, средний логарифмический температурный напор рекуператора и график изменения температуры теплоносителей по поверхности теплообмена.

Слева внизу рисунка расположены три окна. Выбираем тип теплообменника – паяный; материал пластин – сталь и толщину пластин, т.е. те характеристики, которые соответствуют исследуемому теплообменнику. Окно 12 – начало расчета.

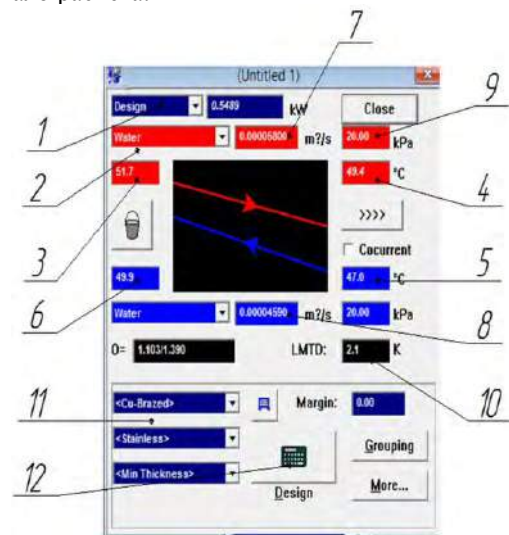


Рис. 4. Интерфейс окна «Исходные данные»

Программа CAS200 предлагает список теплообменников (рис.5), которые соответствуют заявленным исходным данным. Из предложенного списка выбираем установленный в лаборатории кафедры ТОТ пластинчатый теплообменник СВ14.

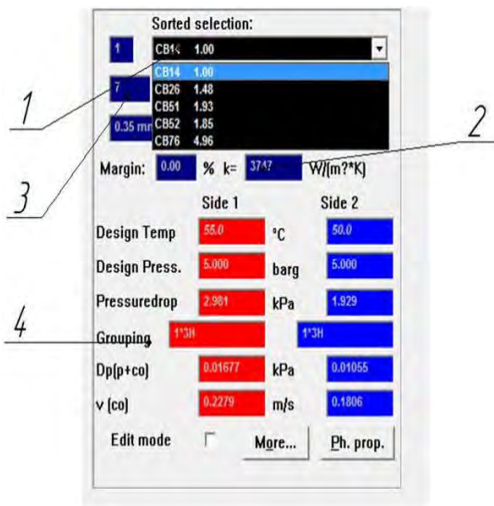


Рис.5. Интерфейс окна «Результаты конструктивного расчета»

Далее для исследуемого теплообменного аппарата необходимо внести изменения в интерфейс окна 'Grouping' (компоновка каналов): выбрать одноходовой теплообменник с H-пластинами в количестве 24 шт.

В качестве дополнительной информации 'More', следует указать число патрубков теплообменника, максимальное количество пластин, а также рабочее давление и рабочую температуру теплоносителей.

2.Тепловой поверочный расчет

Тепловой поверочный расчет теплообменника соответствует режиму 'Rating'.

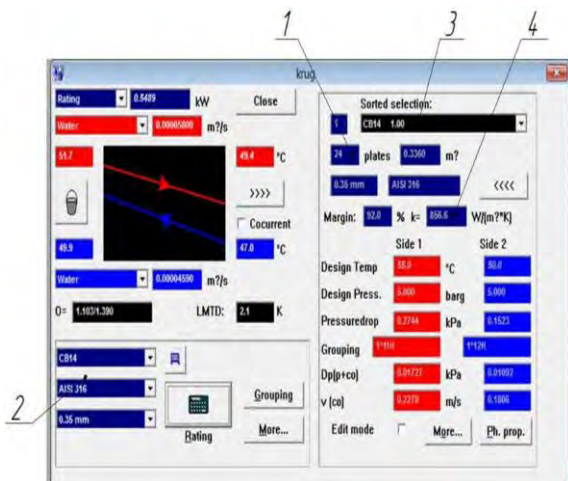


Рис.6. Интерфейс окна «Результаты теплового поверочного расчета»

В окне 4 представлено расчетное значение коэффициента теплопередачи (рис. 6).

VII. РАСЧЕТ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ПО МЕТОДИКЕ Б.С. ПЕТУХОВА [3]

Значения коэффициентов теплоотдачи по методике Б.С. Петухова определяют из соотношения, которое учитывает геометрию каналов теплообменника, теплофизические свойства сред, а также гидродинамический режим их течения в каналах:

$$Nu_0 = \frac{\xi}{8} \cdot \frac{Re \cdot Pr}{C_1 + C_2 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}; \quad (4)$$

$$Nu = \frac{Nu_0}{1 \pm R_1 \cdot \theta_a \cdot Nu_0}, \quad (5)$$

где ξ – коэффициент трения; C_1 , C_2 – поправки на коэффициент трения. Коэффициенты ξ , C_1 и C_2 рассчитываются по следующим формулам:

$$\xi = \frac{1}{\left(1.82 \cdot \lg(Re) - 1.64 - 0.19 \cdot R_1^{0.25} \right)^2}; \quad (6)$$

$$C_2 = 11.7 + 1.8 \cdot Pr^{-\frac{1}{3}}; \quad (7)$$

$$C_1 = \left(1 + 3.4 \cdot \xi \right) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{1.15 + 5.5 \cdot R_1} \right); \quad (8)$$

VIII. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Сравним экспериментальные значения коэффициентов теплопередачи с теоретическими, полученными при помощи программы CAS200 и по методике Б. С. Петухова (табл.3).

Таблица 3. Коэффициент теплопередачи, k , Вт/м²К

№	Эксперимент	CAS200	Методика Б. С. Петухова
1	657	682	577
2	519	559	581
3	603	635	594
4	552	518	561
5	533	541	590

Средняя погрешность экспериментального значения коэффициента теплопередачи по сравнению с расчетом по программе CAS200 составляет 5%, а по сравнению с расчетом по методике Б. С. Петухова – 7,6%.

IX. ВЫВОДЫ

Результаты экспериментального и расчетного исследования показали, что лабораторный стенд «Изучение современного пластинчатого теплообменного аппарата» может быть рекомендован к эксплуатации при выполнении лабораторного практикума в лаборатории тепломассообмена кафедры «Теоретические основы теплотехники».

Список литературы

- [1] Бухмиров В.В. Тепломассообмен: Учеб. пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина». -Иваново,2014.-360 с.
- [2] URL: <http://alfalaval.n4.biz>
- [3] Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при течении диссоциирующего газа в трубах/Наука, Институт высоких температур,Москва,1980.-208 с.

References

- [1] Buhmirov V.V. Teplomassoobmen: Ucheb. Posobie [Heat and mass transfer: tutorial] / FGBOUVPO "Ivanovskij gosudarstvennyj jenergeticheskij universitet imeni V.I.Lenina". - Ivanovo ,2014.-360 pp.
- [2] URL: <http://alfalaval.n4.biz>
- [3] Petuhov B.S. Teploobmen i soprotivlenie pri techenii dissocirujushhego gaza v trubah [Heat transfer and resistance in the flow of dissociating gas in a pipe] /Nauka, Institut vysokih temperatur, Moscow,1980.-208 pp.

Разработка и внедрение лабораторного стенда «Установка обратного осмоса и химического обессоливания»

Н.В. Власов

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»
Иваново, Россия

Аннотация — в данной статье рассказывается о разработанном на кафедре ХХТЭ лабораторном стенде, предназначенный для натурного изучения процессов проходящих на каждом этапе очистки как при химическом обессоливании, так и при мембранной очистке.

Ключевые слова — обратный осмос, химическое обессоливание, мембранные технологии, лабораторный стенд.

Development and implementation of laboratory stand "System of reverse osmosis and chemical desalting"

Nikita Vlasov

Ivanovo State Power Engineering University
Ivanovo, Russian Federation

Abstract — This article shows stand for a full-scale study of the processes taking place at every stage of treatment as in the chemical desalination as in the purification in the membrane.

Keywords — reverse osmosis, chemical desalination, membrane technologies, laboratory stand

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проектировании и реконструкции водоподготовительных установок ТЭС и АЭС все большее внимание уделяется мембранным методам очистки воды. Как правило эта технология включает в себя обработку воды на установках обратного осмоса, ультрафильтрации, нанофильтрации и т.д. Эти методы требуют подготовку высококвалифицированных кадров, обладающих достаточными знаниями и опытом работам на установках мембранной очистки воды.

На кафедре химии и химических технологий в энергетике ИГЭУ для студентов старших курсов нет возможности натурного ознакомления с оборудованием и процессами проходящими на каждом этапе очистки при мембранном обессоливании воды.

II. ФИЛЬТР ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ «ИСТОК-4М/Е»

На кафедру ХХТЭ ИГЭУ научно-производственной компанией «Медиана-фильтр» было поставлено оборудование для стенда, моделирующего обработку воды методами обратного осмоса и химического обессоливания. Основную часть поставленного оборудования составляет домашний фильтр для очистки воды «Исток-4М/Е».

Производительность установки, в зависимости от давления исходной воды, 150-190 литров в сутки. Рабочее давление не менее 2 атмосфер.

III. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Под руководством Ларина А.Б. был разработан, смонтирован и подготовлен к вводу в учебный процесс лабораторный стенд «Установка обратного осмоса и химического обессоливания», предназначенный для натурного ознакомления с оборудованием и процессами, проходящие на каждом этапе очистки воды как при химическом обессоливании, так и при мембранной очистке. В установку входят: питательный насос, механические фильтры, ионитные фильтры, мембранный фильтр, угольный постфильтр, накопительный бак, ограничитель и переключатель потоков. Фотография стенда представлена на рис. 1.

Разработанная установка может работать в трех режимах:

A. Режим «Химическое обессоливание»

В этом режиме исходная вода под давлением питательного насоса прокачивается последовательно через механические, Н-катионитный и ОН-анионитный фильтры и собирается в емкость при открытой задвижке пробоодборной линии. В таблице 1 представлены

результаты автоматического и лабораторного химического контроля стэнда, работающего в режиме «Химическое обессоливание».



Рис. 1. ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЭНД «УСТАНОВКА ОБРАТНОГО ОСМОСА И ХИМИЧЕСКОГО ОБЕССОЛИВАНИЯ»

Таблица I. РЕЗУЛЬТАТЫ АХК И ЛХК СТЭНДА, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ «ХИМИЧЕСКОЕ ОБЕССОЛИВАНИЕ»

	Ок	Жо	Що(К/Щф)	pH	X(25)
Исх.	5,2	3,85	3,55	7,65	405,5
М.Ф.-Уг.Ф.	5,2	4,1	3,7	7,44	407,3
RH	3,56	0,02	1,26	3,09	353,7
RH-ROH	1,88	0,02	0,02	6,47	0,535

B. Режим работы «Мембранное обессоливание»

В этом режиме исходная вода под давлением питательного насоса прокачивается последовательно через механические фильтры, попадает с торцевой части мембранного фильтра на обратноосмотический элемент, где за счет процесса обратного осмоса разделяется на премеат и концентрат. Концентрат через ограничитель потока сбрасывается в дренаж, а пермеат направляется на угольный постфильтр, на пробоотборную линию или при закрытых задвижках собирается в накопительном баке. В таблице 2 представлены результаты автоматического и лабораторного химического контроля стэнда, работающего в режиме «Мембранное обессоливание».

Таблица II. РЕЗУЛЬТАТЫ АХК И ЛХК СТЭНДА, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ «МЕМБРАННОЕ ОБЕССОЛИВАНИЕ»

	Ок	Жо	Що(К/Щф)	pH	X(25)
Исх.	5,2	3,85	3,55	7,65	405,5
М.Ф.-Уг.Ф.	5,2	4,1	3,7	7,44	407,3
Мембр.(П)	1,12	0,06	0,4	5,78	8,412
Мембр.(К)	6,2	4,5	4,1	7,58	440,3
Постф-р	1,52	0,09	2,5	6,75	26,94

C. Режим «Двухступенчатое обессоливание»

При этом режиме работы исходная вода под давлением питательного насоса прокачивается последовательно через механические фильтры, попадает с торцевой части мембранного фильтра на обратноосмотический элемент, где за счет процесса обратного осмоса разделяется на премеат и концентрат. Концентрат через ограничитель потока сбрасывается в дренаж, а пермеат направляется на ионитные фильтры, на пробоотборную линию, или при закрытых задвижках собирается в накопительном баке. В таблице 3 представлены результаты автоматического и лабораторного химического контроля стэнда,

работающего в режиме «Двухступенчатое обессоливание».

Таблица III. РЕЗУЛЬТАТЫ АХК И ЛХК СТЭНДА, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ «ДВУХСТУПЕНЧАТОЕ ОБЕССОЛИВАНИЕ»

	Ок	Жо	Що(К/Щф)	pH	X(25)
Исх.	5,2	3,85	3,55	7,65	405,5
М.Ф.-Уг.Ф.	4,8	4,1	3,7	7,44	407,3
Мембр.(П)	1,12	0,06	0,4	5,78	8,412
Мембр.(К)	6,2	4,5	4,1	7,58	440,3
М(П)-RH	0,8	0,01	0,097	4,13	32,5
М(П)-RH-ОН	0,3	0,01	0,005	7,4	0,175

По результатам видно, что получаемая со стэнда вода, прошедшая все элементы очистки установки, удовлетворяет нормам качества добавочной и питательной воды контуров АЭС иблоков ПГУ.

IV. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОЧИХ СВОЙСТВ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СТЭНДА

В ходе работы установки каждый элемент со временем полностью теряет свои фильтрующие свойства, что приводит к снижению качества обработанной воды.

Для восстановления рабочих свойств фильтрующих элементов были приспособлены и внедрены различные методы обработок:

- Механические фильтры промываются обратным поток исходной воды и при необходимости обрабатываются кислотой или щелочью.
- Для ионитных фильтров предусмотрена прямоточная и противоточная регенерация 4% растворами NaOH и HCl.
- Угольный постфильтр при необходимости промывается 0,1n раствором NaOH и отмывается обессоленной водой.
- Для восстановления рабочих свойств обратноосмотического элемента научно-производственной компанией «Медиана-фильтр» была поставлена станция химической очистки серии ДВС-М, на которой уже проводилась химическая очистка мембранного фильтра.

V. НАЗНАЧЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЭНДА.

Разработанный стэнд «Установка обратного осмоса и химического обессоливания» предназначен для проведения студентами старших курсов лабораторных и научных работ. В настоящее время ведутся работы над методическими рекомендациями для работы со стэндом, которые поанируют внести в список печатных работ кафедры ХХТЭ в 2016 году.

Список литературы

- [1] Юрчевский Е.Б., Ларин А.Б. Расчёт технологических схем обессоливания воды на ТЭС с установками обратного осмоса: Учебное пособие/ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. -84 с.

References

- [1] Yurchevsky E.B., Larin A.B. The calculation of technological schemes of water desalination in the TPP with reverse osmosis: Textbook / VPO "Ivanovo State Power Engineering University named after VI Lenin." - Ivanovo, 2011. -84 p.

Отладка и ввод в эксплуатацию двух лабораторных стандов по определению изобарной теплоемкости воздуха

Е.С. Егорова, И.М. Чухин

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина (ИГЭУ)

г. Иваново, Российская Федерация

e-mail ES-1502@mail.ru, chuhin@tot.ispu.ru

Аннотация — Приведены данные наладки и ввода в эксплуатацию двух новых учебных лабораторных стандов по определению средней массовой изобарной теплоемкости атмосферного воздуха

Ключевые слова — лабораторный стенд; теплоемкость газа; техническая термодинамика

Debugging and commissioning of two laboratory bench by definition isobaric heat capacity of air

Evgenie Egorova, Ivan Chuhin

Ivanovo state power university

Ivanovo, Russia

ES-1502@mail.ru, chuhin@tot.ispu.ru

Abstract — The data setup and commissioning of two new training laboratory stands to determine the average mass isobaric heat capacity of air

Keywords — laboratory benc; the heat capacity of the gas; technical thermodynamics

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данной работы вызвана приобретением двух новых учебных лабораторных стандов по определению средней массовой теплоемкости воздуха кафедрой теоретические основы теплотехники (ТОТ) ИГЭУ (рис. 1).



Рис. 1. Лабораторный стенд по определению изобарной теплоемкости воздуха

Стенд состоит из экспериментальной установки и подключенного к ней компьютера. На компьютер передаются данные измерительных приборов стенда, часть из которых вводится вручную.

Результаты опытных и расчетных данных стенда отражаются на экране монитора ЭВМ (рис.2). Здесь предусмотрена возможность сохранения результатов нескольких опытных результатов и построения графика зависимости удельной теплоты от разности температур.

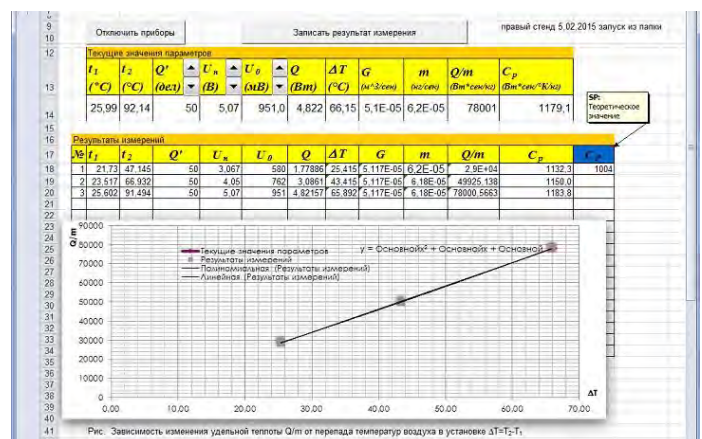


Рис. 2. Опытные и расчетные данные, представленные на мониторе ЭВМ

Авторам была поставлена задача, включающая следующие этапы:

- провести опытное тестирование данных стендов;
- указать исполнителю на его недоработки и по возможности ликвидировать их;
- адаптировать стенды к выполнению лабораторной работы студентами по определению средней массовой изобарной теплоемкости атмосферного воздуха в лаборатории кафедры ТОТ.
- выявить режимные особенности работы каждого из лабораторных стендов

II. ТЕСТОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТЕНДОВ И УСТРАНЕНИЕ ВЫЯВЛЕННЫХ НЕДОСТАТКОВ

На первом этапе были проведены серии опытов при различных режимах работы установок, включающих изменение расходов воздуха и изменения мощности нагревателя.

В ходе проведения опытов были обнаружены и устранены следующие недостатки стендов:

1 – для стенда (1) перепутаны в таблице «текущие значения параметров» значения температур t_1 на входе и t_2 на выходе из сосуда. Они были переставлены на соответствующие места (рис. 3). Обнаруженный недостаток устранен;

Подключить приборы		Записи					
Текущие значения параметров							
t_1 (°C)	t_2 (°C)	Q' (Вт)	U_n (В)	U_0 (мВ)	Q (Вт)		
58,37	25,91	90	3,85	755,0	2,90		

Результаты измерений							
№	t_1	t_2	Q'	U_n	U_0	Q	C_p
1	28,087	24,105	90	1,4	266	0,372	
2	35,803	24,648	90	2,3	451	1,037	
3	36,192	24,684	90	2,3	451	1,037	
4	56,682	25,655	90	3,85	755	2,9067	
5	57,476	25,73	90	3,85	755	2,9067	
6	58,146	25,86	90	3,85	755	2,9067	

Рис. 3. Несоответствие обозначений температур на входе t_1 и на выходе t_2 из установки (слева стенд 1 - было, справа стенд 1- стало)

2 – отсутствие обозначений величин осей координат и функции графика зависимости удельной теплоты от разности температур (рис. 4) (недостатки устранены);

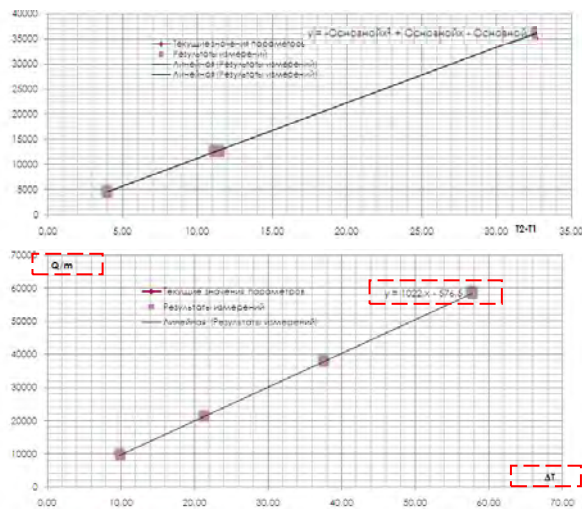


Рис. 4. График зависимости удельной теплоты от разности температур до (вверху) и после (внизу) исправления

3 – для стенда (2) обнаружено завышение в десять раз расчётного значения теплоёмкости. Было установлено, что в алгоритме расчета теплоемкости значение образцового сопротивления составляет 10 Ом, что в десять раз превышает действительное значение образцового сопротивления $R=1$ Ом. Данная ошибка была устранена путем вмешательства в программу алгоритма расчета теплоемкости на ЭВМ (рис. 5).

Подключить приборы		Записи									
Текущие значения параметров											
t_1 (°C)	t_2 (°C)	Q' (Вт)	U_n (В)	U_0 (мВ)	Q (Вт)	ΔT (°C)	G (кг/с)	m полюс	Qm (Вт/°C)	C_p (Вт/кг·°C)	C_p (кВт/кг·°C)
27,00	69,80	100	5,00	953,0	47,65	42,80	1,2E-04	1,5E-04	321472	7511,0	

Результаты измерений												
№	t_1	t_2	Q'	U_n	U_0	Q	ΔT	G	m	Qm	C_p	C_p
1	22,2	29,1	100	2	386	7,72	6,9	0,001227	1,5E-04	5,2E+04	7548,3	
2	23,6	39,5	100	3	578	17,34	15,9	0,001227	0,000148	116984,884	7357,5	
3	25,1	52,4	100	4	769	39,74	27,3	0,001227	0,000148	207523,324	7611,6	
4	27	69,8	100	5	953	47,65	42,8	0,001227	0,000148	321472,249	7511,0	

Рис. 5. Расчетные данные теплоты и теплоемкости до (вверху) и после (внизу) исправления значения образцового сопротивления для стенда 2

4 – не работают кнопки для регулирования значений напряжений U_n и U_0 (рис. 6) (недостаток устранен);

Подключить приборы		Записи					
Текущие значения параметров							
t_1 (°C)	t_2 (°C)	Q' (Вт)	U_n (В)	U_0 (мВ)	Q (Вт)		
58,37	25,91	90	3,85	755,0	2,90		

Результаты измерений							
№	t_1	t_2	Q'	U_n	U_0	Q	C_p
1	28,087	24,105	90	1,4	266	0,372	
2	35,803	24,648	90	2,3	451	1,037	
3	36,192	24,684	90	2,3	451	1,037	
4	56,682	25,655	90	3,85	755	2,9067	
5	57,476	25,73	90	3,85	755	2,9067	
6	58,146	25,86	90	3,85	755	2,9067	

Рис. 6. Исправление работоспособности кнопок U_n и U_0

5 – отсутствие размерностей ряда величин, приведенных в таблице опытных и расчетных данных на экране монитора (недостаток устранен);

6 – при сохранении опытных данных в журнал наблюдений, расчётные величины продолжают изменяться (недостаток устранен);

7 – массовый расход воздуха вычисляется при постоянной плотности (недостаток устранен введением в алгоритм расчета плотности воздуха учета его температуры и давления);

8 – при расчете теплоемкости не учитываются потери теплоты в окружающую среду (недостаток устранен)

разработкой методикой расчета теплоемкости с учетом потерь теплоты установкой во внешнюю среду).

Кроме устранения выявленных недостатков стендов были выбраны оптимальные режимы их работы, позволяющие получать качественные результаты опытных и расчетных данных не превышающие относительную погрешность в $0,5 \div 2$ % по отношению к эталонным значениям теплоемкости [1]. Предлагаемые режимы работы приведены в таблице.

ТАБЛИЦА. ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ СТЕНДОВ

Характеристика	Лабораторный стенд №40602455 (1)	Лабораторный стенд №40602456 (2)
Оптимальный расход воздуха по шкале ротаметра	83÷90 делений	70÷90 делений
Оптимальный диапазон напряжения на нагревателе	1,5÷5 В (минимальный шаг 0,5 В)	1,5÷5 В (минимальный шаг 0,5 В)
Время наступления стационарного режима	10 мин	10 мин

Данные режимы согласовывают расходы воздуха с мощностью нагревателя и оптимизируют время проведения опыта, что позволит увеличить число опытных замеров (число студентов) во время лабораторной работы на одном стенде.

После устранения недостатков стендов были сняты видеоролики по описанию стендов, порядку выполнения лабораторной работы и по анализу опытных и расчетных результатов опытов, представленных на мониторе ЭВМ, подключенной к стенду.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В процессе тестирования лабораторных стендов были обнаружены формальные и принципиальные недостатки, многие из которых были устранены.
- Найдены оптимальные режимы работы для каждого из стендов, при которых значение опытных величин ($c_p=980 \div 1020$ Дж/(кг·К)) максимально приближенно к эталонным и имеют погрешность в пределах от $0,5 \div 2$ %.
- Написаны новые методические указания «Определение средней массовой изобарной теплоемкости атмосферного воздуха» для студентов, обучающихся на кафедре ТОТ ИГЭУ, адаптированные к данным лабораторным стендам. В них приведена методика учёта потерь теплоты во внешнюю среду при расчете теплоемкости.
- Созданы видеоролики, посвящённые описанию стенда и порядку выполнения работы.
- По результатам выполненной работы стенды могут быть рекомендованы к эксплуатации в учебном процессе.

Список литературы

- [1] Чухин, И.М. Термодинамические свойства воздуха: Справ. материалы и метод. указания для определения термодинамических свойств воздуха с учетом влияния температуры на их изобарную и изохорную теплоемкость / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2001. – 36 с.

References

- [1] Chuhin I. M. Thermodynamic properties of air: Reference materials and guidelines for determining thermodynamic properties of air taking into account the effect of temperature on their Isobaric and isochoric heat capacity / Ivanovo state power University. – Ivanovo, 2001. – 36 pp.

Анализ энергоэффективности установки теплоотражающих экранов и приточных клапанов

В.М. Захаров, Н.Н. Смирнов, Е.С. Румянцев, А.С.Сафронов.
Ивановский Государственный Энергетический Университет В.И. Ленина
Иваново, Россия

Аннотация — Разработана методика по определению минимальной температуры воздуха внутри помещения при дежурном режиме отопления в случае использования в окнах теплоотражающих экранов. Также была разработана математическая модель помещения с 2 радиаторами отопления, 2 окнами и приточными клапанами над ними и 2 теплоотражающими экранами с наружной стороны окон, а также с тепловыделяющим оборудованием. Модель позволяет исследовать влияние установки различных теплоотражающих экранов и тепловыделяющего оборудования на температурное поле внутри помещения, влияние установки приточных клапанов на воздухообмен в помещении.

Ключевые слова — окна с теплоотражающими экранами, дежурный режим отопления, приточные клапаны, теплообмен, воздухообмен.

Analysis of energy efficiency of heat-setting screens and inlet valves

Vadim Mikhailovich Zakharov, Nikolay Nikolaevich Smirnov, Egor Sergeyeovich Rumyantsev, Alexander Sergeyeovich Safronov.
Ivanovo State Power University
Ivanovo, Russia

Abstract — The method to determine the minimum indoor air temperature under mode of heating on duty with using heat-reflective screens in the windows was developed. To mathematical model of room with 2 radiators, 2 windows and inlet valves over them and 2 heat-reflecting screen on the outside of windows, and also with the heat-generating equipment. Were developed this model allows to investigate the influence of installation of different heat-reflecting screens and heat-generating equipment on the temperature field inside the room, the impact of installation of inlet valves on the air exchange in the room.

Keywords — windows with heat-reflecting screens, stand-by heating mode, inlet valves, heat and mass transfer, air exchange.

1. ВВЕДЕНИЕ

В приказе Минрегионразвития от 28 мая 2010 года № 262 и в Постановлении Правительства РФ от 25 января 2011 г. №18 требования к теплозащите конструкций и к потреблению энергии зданием еще более повышаются. Требования должны выполняться при проектировании, экспертизе, строительстве, вводе и эксплуатации построенных, реконструированных или прошедших капитальный ремонт отапливаемых зданий, строений, сооружений. Так, после установления базового уровня, требования энергетической эффективности должны предусматривать уменьшение показателей, характеризующих годовую удельную величину расхода энергетических ресурсов в здании, строении, сооружении, не реже 1 раза в 5 лет: с января 2011 г. (на период 2011 ÷ 2015 годов) - не менее чем на 15 процентов по отношению к базовому уровню, с 1 января 2016 г. (на период 2016 ÷ 2020 годов) - не менее чем на 30 процентов по отношению к базовому уровню, а с 1 января 2020 г. - не менее чем на 40 процентов по отношению к базовому уровню.

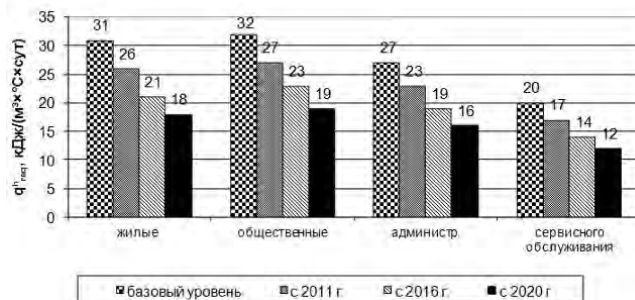


Рис. 1 Изменение нормируемого удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию, q_{net}^{red} , [кДж/(м³×°С×сут)], для отдельных видов зданий (5 этажей) на период с 2010 (базового) по 2020 гг. согласно приказа Минрегионразвития от 28 мая 2010 года № 262

Таким образом, в России, наблюдается значительное повышение требований по снижению потребления ТЭР на энергообеспечение зданий, причём законодательные органы ЕС устанавливают коэффициент сопротивления теплопередаче окон к 2020 году на уровне $1,67 \div 2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, а Российские органы власти к 2016 году – на уровне $1,0 \div 1,05 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$.

При проектировании естественной системы вентиляции предусматривается, что удаление

загрязнённого воздуха из помещения будет осуществляться через вентиляционные каналы. Замещение удалённого воздуха осуществляется через неплотности оконных конструкций. Так работает система естественной вентиляции в подавляющем большинстве зданий, как административно-бытового, так и жилого назначения. Помещение проветривается и насыщается кислородом. При удалении неплотностей в окнах, естественная вентиляция нарушается.

Для решения этой проблемы проектировщики на основе нормативных документов закладывают наличие в оконных конструкциях специальных устройств – приточных клапанов, которые обеспечивают нормативный приток воздуха и бесперебойную работу естественной вентиляции.

Таким образом, система вентиляции в помещении должна удовлетворять нормативному документу СП 60.13330.2012 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха».

II. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы являлся анализ энергоэффективности установки в моделируемой учебной аудитории с наружной стороны окна двух теплоотражающих экранов, а также приточных клапанов для улучшения системы вентиляции.

Данное исследование включает в себя:

- 1) проведение эксперимента в сертифицированной климатической камере АНО «Ивановстройиспытания»;
- 2) анализ энергоэффективности установки теплоотражающих экранов в аудитории А-324;
- 3) разработку математической модели помещения с 2 радиаторами отопления, 2 окнами и приточными клапанами над ними и двумя теплоотражающими экранами с наружной стороны окон, а также с тепловыделяющим оборудованием;
- 4) Анализ полученной математической модели

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В сертифицированной климатической камере АНО «Ивановстройиспытания» были проведены исследования по изучению влияния применения теплоотражающих экранов в окнах на повышение сопротивления теплопередаче окон и снижения тепловых потерь. Максимальный эффект даёт применение И-стекла и со стороны холодного отделения камеры дополнительно панели из двух металлических экранов, размещённых на расстоянии 10 мм друг от друга, сопротивление теплопередаче конструкции при этом составит 1,76 (м²·°C/Вт).



Рис. 2 Тепловизионная съёмка в климатической камере АНО «Ивановстройиспытания»



Рис. 3 Монтаж теплоотражающих экранов и установка датчиков

IV. АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ ТЕПЛОТРАЖАЮЩИХ ЭКРАНОВ В АУДИТОРИИ А-324

Для определения экономии тепловой энергии нам потребовались дополнительные характеристики по городам, в том числе географическая широта S , количество дней отопительного периода $n_{от.п}$, число часов неиспользования и использования экранов в течении отопительного периода n_1 и n_2 , соответственно, расчётная температура наружного воздуха $t_{расч}$ и средняя температура наружного воздуха за отопительный период $t_{ср.от.}$. Данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 Климатические характеристики города

Город	S, град. широты	$n_{от.пер.}$, дней	$t_{ср.от.}$, °C	$t_{расч}$, °C	n_1 , час	n_2 , час
Иваново	57	219	-3,9	-30	1577	3679

Расчёт производили для сопротивления окна в помещении А-324 (двойное остекление из обычного стекла в деревянных отдельных переплётах) [1], а также при использовании теплоотражающих экранов (2 слоя) равным 1,45 (м²·°C/Вт).

Внутри помещения в рабочее время суток принималась расчётная температура в 20 °С и относительная влажность 35 %. В нерабочее время (и тёмное время) суток предусматривалось применение экранов, снижение температуры воздуха при дежурном отоплении в двух вариантах – до нормируемых 12 °С и до минимально-допустимой температуры воздуха при выполнении условия недопущения образования конденсата на светопрозрачных конструкциях. Определялись потери теплоты за отопительный период с площади окна равной 4,142. Данные расчётов представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 Потери теплоты за отопительный период через светопрозрачных конструкций S=4,142 м², Гкалл

Город	Контр оль, Q _к	С применением дежурного режима отопления (t _{деж} =12°C), Q _{деж(12)}	С применением экранов, Q _э	С применением экранов и дежурного режима отопления (t _{деж} =12°C), Q _{деж(12)+э}	С применением экрана и дежурного режима отопления с пониженной температурой, Q _{деж(мин)+э}
Иваново	0,950	0,696	0,420	0,357	0,308

Таблица 3 Экономия теплоты за отопительный период, Гкалл/%

Город	Конт роль, Q _к	С применением дежурного режима отопления (t _{деж} =12°C), Q _{деж(12)}	С применением экранов, Q _э	С применением экранов и дежурного режима отопления (t _{деж} =12°C), Q _{деж(12)+э}	С применением экрана и дежурного режима отопления с пониженной температурой, Q _{деж(мин)+э}
Иваново	-	0,254/27	0,53/51	0,593/59	0,624/66

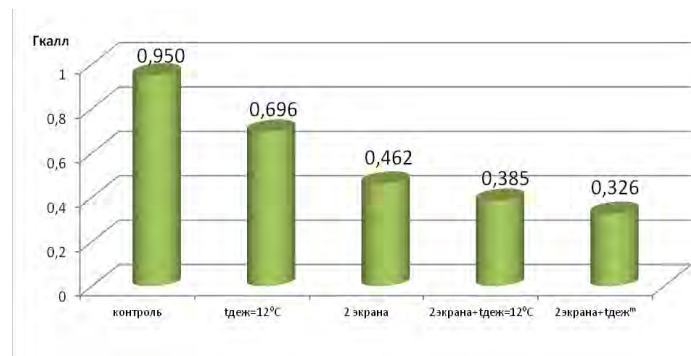


Рис. 4 Тепловые потери через оконные конструкции аудитории А-324, Гкалл.

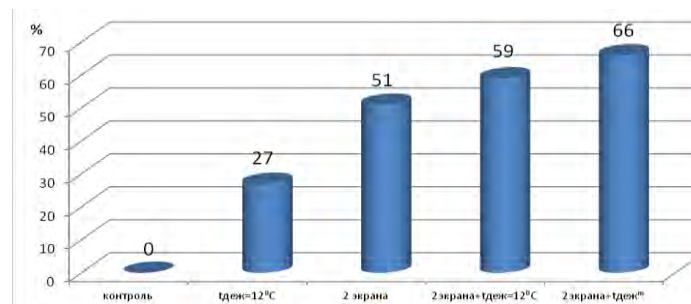


Рис. 5 Экономия теплоты за отопительный период, %

Таким образом, максимальную экономию тепловой энергии мы получили в случае использования панельного теплоотражающего экрана и системы автоматизации, рассчитанной на поддержание в нерабочее время дежурного режима отопления с минимально-допустимой температурой воздуха, исходя из условия недопущения конденсации

V. РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Также была разработана математическая модель теплообмена в помещении аудитории А-324. Модель разработана в программе COMSOL Multiphysics.

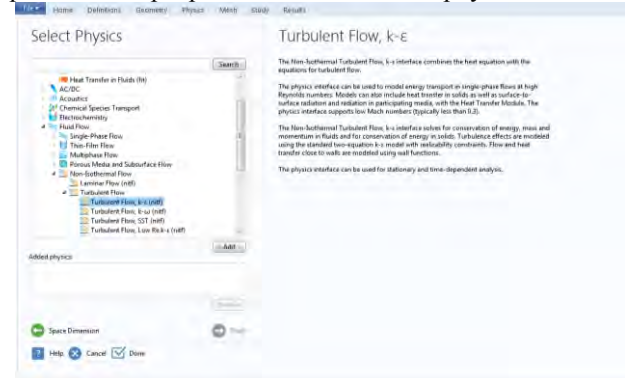
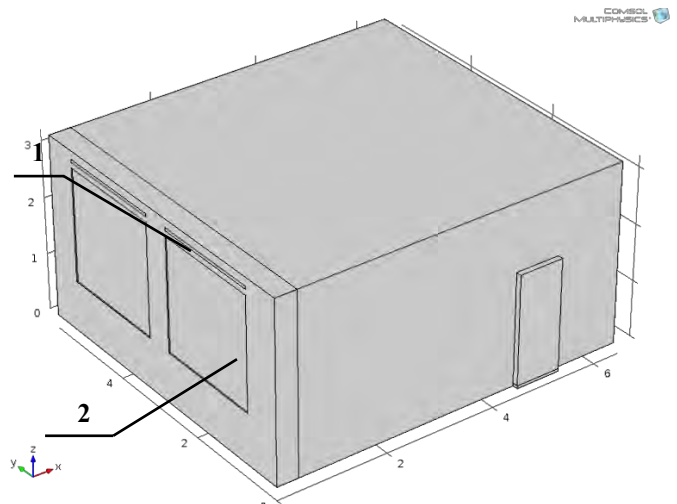


Рисунок 6 Интерфейс Comsol Multiphysics

Программный пакет COMSOL Multiphysics является интерактивной средой для моделирования, позволяет решать теплотехнические задачи. Для расчёта температурных и скоростных полей в пакете программы был выбран физический режим моделирования Non-Isothermal Flow (Неизотермический поток) [2].

3D-модель расчётной области представлена на рис. 7.



1 – Приточный клапан; 2 – Окно с теплоотражающими экранами
Рис. 7 3D-модель расчётной области в программе COMSOL Multiphysics

В моделируемом помещении размером 6х5,8х3,2 м установлено 2 радиатора отопления, 2 окна с приточными клапанами над ними и двумя теплоотражающими экранами с наружной стороны окон, а также тепловыделяющее оборудование и мебель. Через воздушные клапаны воздух поступает при 0,5 (м/с). Скорость задаётся в зависимости от ветрового давления и

сопротивления фильтров в клапанах. (Отток воздуха осуществляется через вентиляционные решётки при атмосферном давлении). Расчётная температура холодного воздуха задаётся в пределах $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура на поверхности радиатора равна $95\text{ }^{\circ}\text{C}$, начальная температура помещения $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 8 представлена 3D-модель стены с оконными конструкциями.

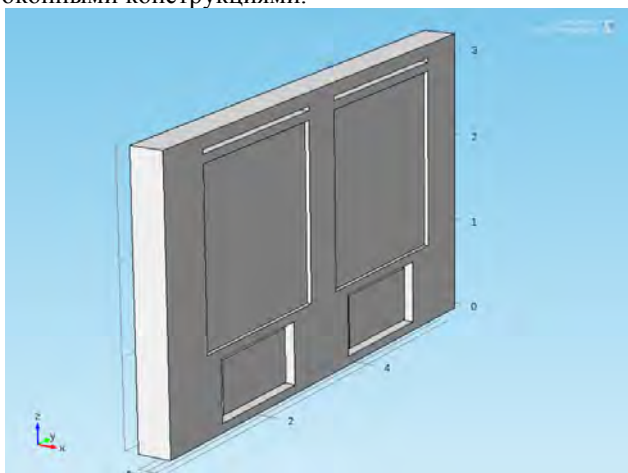


Рис. 8 3D модель стены с оконными конструкциями в программе COMSOL Multiphysics

Тепловыделяющим оборудованием в помещении аудитории являются компьютер и сушильная установка.

На рис.9 представлена 3D-модель помещения с тепловыделяющим оборудованием.

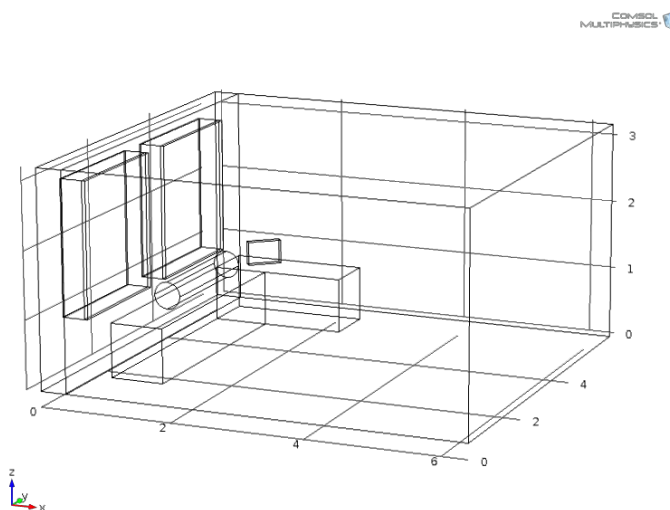


Рис. 9 3D-модель помещения с тепловыделяющим оборудованием в программе COMSOL Multiphysics

Математическое моделирование вентиляции в помещении основано на решении уравнений теплопередачи и Навье-Стокса, при решении используется метод конечных элементов. На рис.10 представлена сетка конечных элементов.

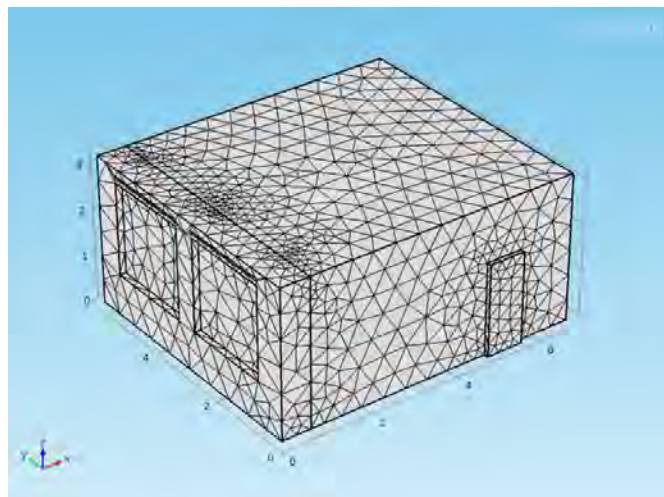


Рис. 10 Сетка конечных элементов моделируемого помещения

На рис.11-12 представлено распределение температурных полей без экранов и с экранами. Видно, что температура изменяется в кирпичной стенке. А на рис. 12 видно, что температура также заметно изменяется в областях, находящихся в непосредственной близости от тепловыделяющего оборудования, а также от радиаторов отопления. При этом температура воздуха в помещении изменяется приблизительно на 1 градус Цельсия.

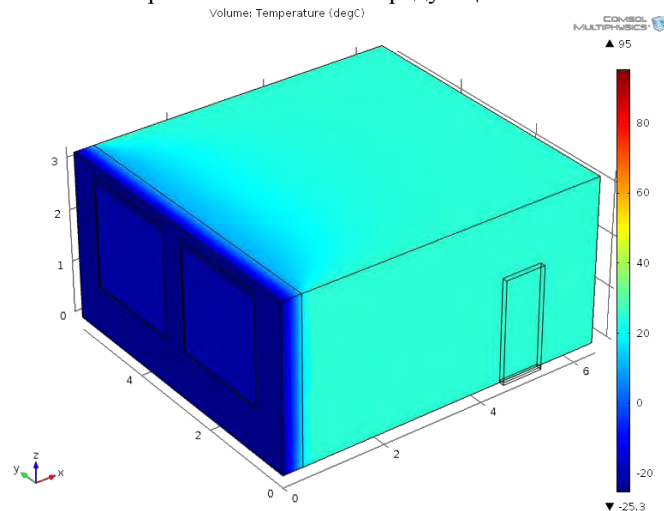


Рис. 11 Распределение температурных полей с экранами

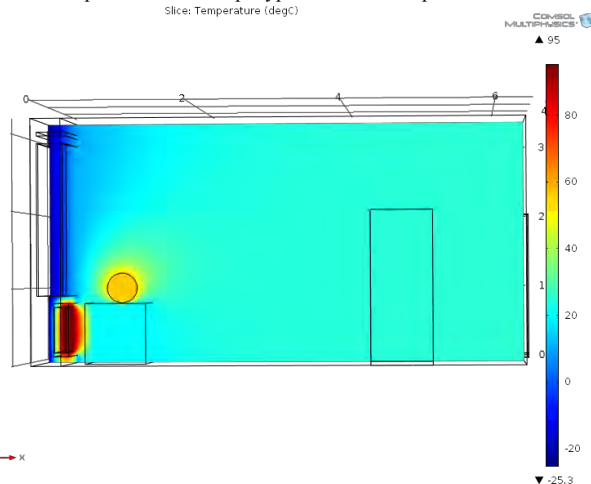


Рис 12 Распределение температурных полей с экранами (другой вид)

На рис. 13 представлено изображение изотермических поверхностей и направление температурных потоков. Видно, что наибольшие тепловые

потоки направлены от радиаторов отопления. Теплоотражающие экраны препятствуют прохождению тепловых потоков в окружающую среду.

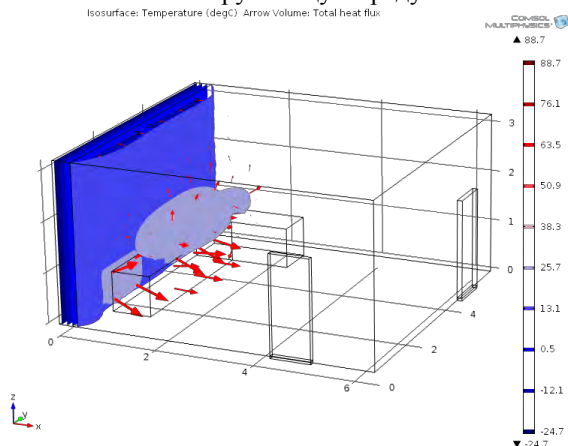


Рис. 13 Изотермические поверхности

На рис. 14-15 представлено изображение скоростных полей и векторов скоростей. Скорость воздуха в рабочей зоне помещения составляет менее 0,2 м/с и удовлетворяет санитарно-гигиеническим требованиям.

Рассмотрение математической модели позволяет утверждать, что естественная вентиляция в проектируемом помещении не нарушена, аудитория проветривается.

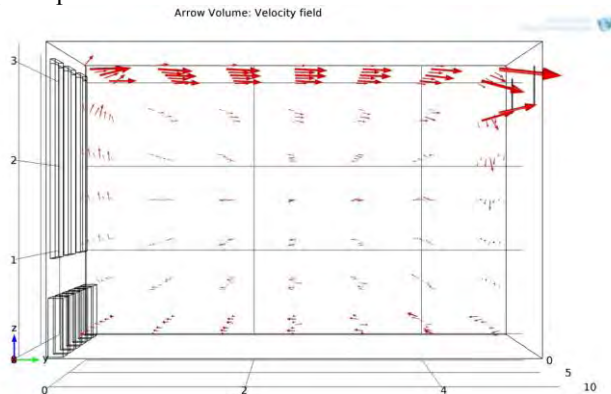


Рис. 14 Векторы скоростей (пропорционально)

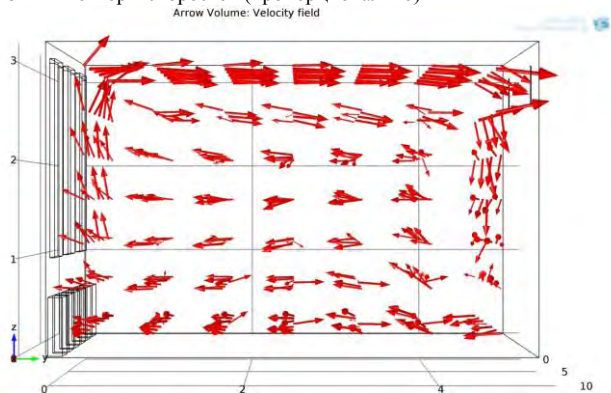


Рис. 15 Векторы скоростей (прологарифмировано)

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет исследовать влияние установки различных теплоотражающих экранов и тепловыделяющего оборудования на температурное поле внутри помещения, влияние установки приточных клапанов на воздухообмен в помещении.

Определена эффективность установки в аудитории А-324 теплоотражающих экранов, а также возможность использования приточных клапанов для улучшения вентиляции.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено экспериментальное исследование в климатической камере АНО «Ивановстройиспытания» различных вариантов применения теплоотражающих экранов в окнах и выбран оптимальный с точки зрения энергосбережения: установка 2 экранов, расположенных относительно окна в холодном отделении климатической камеры.

2. Проведён анализ энергоэффективности установки теплоотражающих экранов в аудитории А-324, в результате которого определён существенный энергосберегающий эффект. При контроле тепловые потери составили 0,95 Гкалл, а при использовании 2 теплоотражающих экранов с холодной стороны и минимальной температуры дежурного режима отопления тепловые потери - 0,326 Гкалл. Экономия тепловой энергии равна 0,624 Гкалл.

3. Разработана математическая модель помещения с 2 радиаторами отопления, 2 окнами приточными клапанами над ними и двумя теплоотражающими экранами с наружной стороны окон, а также с тепловыделяющим оборудованием, которая позволяет исследовать влияние установки различных теплоотражающих экранов и тепловыделяющего оборудования на температурное поле внутри помещения, влияние установки приточных клапанов на воздухообмен в помещении.

Список литературы

- [1] Пыжов В.К. Энергетические системы обеспечения жизни и деятельности человека: учебник / В. К. Пыжов ; Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина". –Иваново: Б.и., 2014.– 524 с: ил.–ISBN 978-5-00062-012-0.С 79.
- [2] В. Д. Лебедев, А. А. Яблоков. Моделирование физических процессов технических устройств в программе COMSOL Multiphysics: учебное пособие; Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина". – Иваново: Б.и., 2013. – 328 с: ил. – ISBN 978-5-89482-917-3.

Идентификация объектов управления с помощью генетических алгоритмов

Н.А. Зуев, М.С Смирнов, И.В. Тетеревков
Ивановский Государственный Энергетический Университет
г. Иваново, Российская Федерация
Nickzuev@mail.ru

Аннотация — Рассматривается решение задачи идентификации объектов управления при помощи генетического алгоритма. Особое внимание уделяется идентификации многомерных объектов и идентификации в замкнутом контуре.

Ключевые слова — генетический алгоритм; функция приспособленности; идентификация объектов управления.

Identification control objects using Genetic Algorithms

Nick Zuev, Michael Smirnov, Ilya Teterevko
Ivanovo State Power Engineering University
Ivanovo, Russian Federation
Nickzuev@mail.ru

Abstract — We consider the problem of identification of control objects using a genetic algorithm. Particular attention is paid to identification of multidimensional objects and identification in a closed loop.

Keywords — Genetic algorithm; fitness function; identification of control objects.

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие теории автоматического управления на современном этапе характеризуется постановкой и решением задач, учитывающих неточность наших знаний об объектах управления и действующих на них возмущениях. Это фактически означает, что управление технологическим процессом или объектом с использованием классических методов (решение задач идентификации с помощью типовых методик и применение управляющих устройств в виде типовых регуляторов с фиксированными настройками) не позволяет гарантировано обеспечить требуемое качество функционирования [1].

Современный уровень развития микропроцессорной техники и повсеместное внедрение SCADA-систем позволяют при решении задач управления технологическими объектами отказаться от привязанности к жестким, часто, особенно в условиях нестационарности, неэффективным алгоритмам реализации законов регулирования [2]. Появляется возможность широкого применения нетиповых классов систем, например, нейронных сетей или систем управления на базе нечеткой логики. В свою очередь решение задачи идентификации также может быть получено с помощью новых методик, основанных на применении нейронных сетей и генетических алгоритмов (ГА).

Нейронные сети были созданы в результате наблюдения за естественными процессами, происходящими в нервной системе живых существ, и попыток воспроизведения этих процессов. Термин *нейрон*,

соответствующий основному исполнительному элементу компьютерных нейронных сетей, заимствован из теории природных нервных систем. Аналогичным образом генетические алгоритмы возникли в ходе наблюдения и попыток воспроизведения естественных процессов, происходящих в мире живых организмов в области эволюции и связанной с ней селекцией популяций живых существ. Основой ГА стала реализация процесса естественного отбора, постоянно происходящего в живой природе. Конечно же, в реальной жизни эволюционный процесс происходит крайне медленно, но перенос идей генетики в область компьютерного моделирования снимает ограничения, накладываемые на время получения решения.

II. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Классический генетический алгоритм состоит из следующих шагов [3]:

- инициализация, или выбор исходной популяции хромосом;
- оценка приспособленности хромосом в популяции;
- проверка условия останова алгоритма;
- селекция хромосом;
- применение генетических операторов;
- формирование новой популяции;
- выбор «наилучшей» хромосомы.

Блок-схема основного генетического алгоритма изображена на рис. 1. Рассмотрим конкретные этапы этого алгоритма более подробно.



Рис. 1. Блок-схема генетического алгоритма

Инициализация, то есть формирование исходной популяции, состоит в случайном выборе заданного количества особей, каждая из которых имеет свою хромосому, кодирующую набор искомых признаков в виде двоичного кода. Размер хромосомы определяется количеством признаков и количеством бит, предназначенных для отображения каждого признака.

Оценивание приспособленности хромосом в популяции связано с расчетом функции приспособленности, отражающей качественное соответствие значений признаков, закодированных в конкретной хромосоме, желаемой цели. Максимизация функции приспособленности и составляет смысл работы генетического алгоритма.

Проверка условия останова алгоритма. Определение условия завершения работы генетического алгоритма зависит от его конкретного применения. Применительно к задачам, связанным с системами управления, остановка алгоритма чаще всего производится при прекращении улучшения значений функции приспособленности на последовательных этапах имитации эволюционного процесса.

Селекция хромосом проводится в случае, если критерий останова ГА не выполнен и состоит в выборе хромосом, участвующих в создании потомков для следующего поколения. Этот выбор производится в соответствии с идеей естественного отбора, то есть приоритетные шансы на участие в создании новых особей имеют хромосомы с наибольшими значениями функции приспособленности.

Существуют различные методы селекции. Наиболее популярным является *метод рулетки*. При этом каждой хромосоме ставится в соответствие сектор колеса рулетки, величина которого пропорциональна значению функции приспособленности этой хромосомы. Поэтому чем больше значение функции приспособленности, тем больше сектор на колесе рулетки. Поэтому вероятность случайного выбора данной хромосомы оказывается пропорцио-

нальной значению ее функции приспособленности. Результатом селекции является *родительская популяция*, подвергаемая операциям скрещивания и мутации.

Операция скрещивания. На первом этапе скрещивания выбираются пары хромосом из родительской популяции. Это производится случайным способом в соответствии с вероятностью скрещивания. Далее для каждой пары отобранных родителей разыгрывается позиция гена в хромосоме, определяющая так называемую *точку скрещивания*.

Оператор мутации с заданной вероятностью изменяет значение гена в хромосоме на противоположное (то есть с 0 на 1 или наоборот). Вероятность мутации обычно очень мала и в некоторых случаях может даже иметь нулевое значение. Тем не менее, мутация крайне полезна в случае, когда целевая функция оптимизационной задачи имеет большое количество локальных максимумов.

Формирование новой популяции. Хромосомы, полученные в результате применения операций селекции, скрещивания и мутации, образуют новую популяцию. На каждой очередной итерации рассчитываются значения функции приспособленности для всех хромосом этой популяции, затем проверяется условие останова алгоритма и либо фиксируется результат в виде лучшей хромосомы, либо снова проводится селекция и формирование новой популяции.

Выбор «наилучшей» хромосомы. Если условие завершения алгоритма выполнено, то лучшим решением считается хромосома с наибольшим значением функции приспособленности.

III. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ

По своей сути генетический алгоритм представляет собой способ решения задачи многомерной оптимизации. Воспользуемся этим для решения проблемы проведения идентификации объектов управления. Предположим, что в качестве исходных данных у нас есть некоторая выборка значений пар «входная (x) /выходная (y) величина объекта», соответствующая данным по интересующему нас каналу и снятая с одинаковым шагом по времени. В этих условиях логичным представляется строить модель объекта в виде разностного уравнения в рекуррентной форме:

$$y(k) = \sum_{i=0}^{na-1} a_i x(k-i) + \sum_{i=1}^{nb} b_i y(k-i),$$

где a_i и b_i – коэффициенты уравнения при $y(m)$ и $x(m)$; na и nb – количество коэффициентов (определяется видом и порядком полиномов передаточной функции объекта, а также способом построения разностного уравнения); $y(m)$ и $x(m)$ – значения выходной и входной величин на m -ом шаге.

Сформулируем оптимизационную задачу. В качестве функции приспособленности выберем функцию типа

$$\Phi = \frac{k}{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{mi})^2},$$

где k – некоторый масштабирующий коэффициент; N – объем исходной выборки;

y_i и y_{mi} – значения выходной переменной, полученные из выборки и по выстраиваемому разностному уравнению соответственно.

В знаменателе выражения для Φ фактически стоит квадрат «невязки» выходной координаты по расчетной модели и экспериментальных данных. Естественно, что задача сводится к нахождению максимума функции Φ . В качестве аргументов оптимизационной задачи будут выступать искомые коэффициенты разностного уравнения.

Для формирования исходной популяции особей необходимо предварительно определиться со структурой хромосомы. Для этого достаточно знать количество коэффициентов разностного уравнения, а также выбрать для каждого коэффициента допустимый диапазон поиска и количество возможных значений внутри этого диапазона, то есть определиться с количеством бит для кодирования каждого коэффициента. После этого, задавшись количеством особей в популяции и применив датчик случайных чисел, имеем возможность создать начальную популяцию.

Итак, мы свели постановку задачи идентификации объекта управления к виду, характерному для применения генетических алгоритмов. Дальнейший расчет сводится к проведению генетических операций, рассмотренных в разд. I. Расшифровка хромосомы каждой особи из рассматриваемой популяции дает набор значений коэффициентов разностного уравнения. Расчет с применением данных исходной выборки на основании текущего набора коэффициентов и принятого вида разностного уравнения позволяет каждой хромосоме поставить в соответствие значение ее функции приспособленности. Применение операций селекции, скрещивания и мутации приводит к формированию следующего поколения особей, кодирующих коэффициенты разностного уравнения. Исходя из личного опыта авторов, наилучшим критерием останова итерационной процедуры будет прекращение изменения как максимального, так и среднего значения функции приспособленности рассматриваемых популяций на двух последовательных шагах итерационной процедуры на величину, большую заданной.

Существенным достоинством применения ГА к решению задачи идентификации является вычислительная устойчивость. Тем не менее, результат имеет и свои ограничения:

1). В связи с некоторой «случайностью», применяемой в процессе решения, далеко не всегда удается найти строго оптимальное решение. Тем не менее, как показывает практика, ГА способен привести к решению задачи с требуемой точностью.

2). Решение ищется в «дискретной» области, так как невозможно получить значения коэффициентов, находящиеся вне узлов заданной сетки. Негативное влияние этого фактора легко снижается с помощью увеличения числа бит, предназначенного для кодирования конкретного коэффициента.

Для примера покажем результат применения ГА к решению задачи идентификации объекта управления с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{7p^2 + 3p + 1}{5p^3 + 10p^2 + 4p + 1}$$

Применение метода левых разностей с учетом шага квантования $T = 1$ с приводит к истинному разностному уравнению

$$y(k) = 0,55 \cdot x(k-2) - 0,85 \cdot x(k-1) + 0,35 \cdot x(k) + 1,95 \cdot y(k-3) - 1,25 \cdot y(k-2) + 0,25 \cdot y(k-1)$$

Необходимо определить значения шести коэффициентов разностного уравнения. Для кодирования каждого коэффициента будем использовать по 7 бит (что позволит получить по 128 возможных значений), а начальные диапазоны установим в соответствии с данными табл. 1. Коэффициент k в выражении для функции приспособленности примем равным 100.

Таблица 1 Интервал поиска коэффициентов

Коэффициент	Минимальное значение	Максимальное значение
a_0	0,42	0,68
a_1	-1,06	-0,64
a_2	0,26	0,44
b_1	1,46	2,4
b_2	-1,56	-0,94
b_3	0,19	0,32

Сформировав начальную популяцию из 10 особей и применив операции селекции (методом рулетки), мутации (с вероятностью 0,2) и скрещивания, проводим итерационную процедуру расчета. После рассмотрения 12 популяций срабатывает критерий останова по малому приращению функции приспособленности (рис. 2).



Рис. 2. Изменение функции приспособленности в ходе эволюционного процесса

В результате выбора лучшей особи из последней популяции получаем следующее разностное уравнение, приводящее к значению функции приспособленности 195,75:

$$y(k) = 0,5149 \cdot x(k-2) - 0,643 \cdot x(k-1) + 0,4257 \cdot x(k) + 1,489 \cdot y(k-3) - 0,999 \cdot y(k-2) + 0,2261 \cdot y(k-1)$$

Для наглядности на рис. 3 показаны переходные процессы на выходе истинного объекта и построенной модели при действии на входе случайного процесса в виде дифференцируемого марковского процесса.

Авторами разработан программный комплекс, позволяющий решать задачи идентификации с помощью ГА. Это позволило исследовать влияние различных аспектов применения ГА. В результате сформированы следующие рекомендации:

1). Фактором, наиболее критично влияющим на качество получаемого решения, является правильность задания порядков передаточной функции объекта.

Настроечные параметры (ширина исходных диапазонов, количество бит на кодирование признака) влияют на качество решения в значительно меньшей степени.

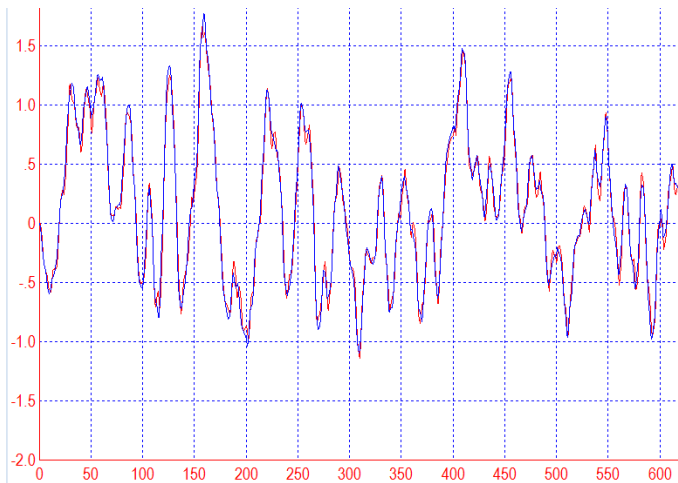


Рис. 3. Переходные процессы в истинном объекте и модели, построенной с помощью ГА

2). Крайне желательной является операция мутации, позволяющая выбраться из «оврагов» и «холмов» целевой функции.

3). В отличие от объема исходной выборки ее «качество» является существенным фактором. «Бедность» входного сигнала (например, подача всего лишь одного ступенчатого воздействия) может привести к неудовлетворительным результатам. Поэтому желательно в качестве входного воздействия применять либо последовательность ступенчатых возмущений, либо использовать генераторы случайных сигналов.

IV. "ПРОБЛЕМНЫЕ" ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ИХ РЕШЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ГА

В реальных условиях задача идентификации осложняется следующим обстоятельством. Выходной параметр, как правило, зависит не от одного, а от нескольких входных параметров, то есть объект является многомерным. Например, на рис. 4,а показана структура двумерного объекта с двумя входами и одним выходом. На рис. 4,б приведена расчетная схема формирования выходного сигнала. Классическая постановка задачи идентификации требует при получении выборки либо полностью стабилизировать X , либо полностью стабилизировать λ . Естественно, что в реальных условиях это невозможно. Отдельно идентифицировать оба канала мы смогли бы, если бы сумели каким-то образом получить выборки значений Y_1 и Y_2 . Но на практике наблюдаемыми являются только значения Y , являющиеся суммой Y_1 и Y_2 .

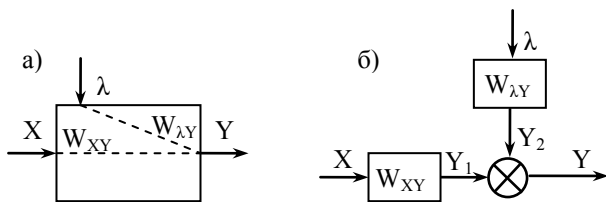


Рис. 4. Структура двумерного объекта и его расчетная модель

Применение генетического алгоритма позволяет решить задачу идентификации для многомерного объекта,

причем сложность решения практически соответствует сложности задачи одномерной идентификации: размерность задачи определяется не количеством каналов, а общим числом коэффициентов разностных уравнений, описывающих свойства этих каналов. Для примера рассмотрим решение задачи идентификации объекта со структурой, соответствующей рис. 4, и передаточными функциями

$$W_{XY}(p) = \frac{3}{12p^2 + 7p + 1}; W_{\lambda Y}(p) = \frac{2}{10p^2 + 7p + 1}.$$

Сформировав выборку значений X , λ и Y , поставим задачу поиска 6 коэффициентов общего разностного уравнения (по 3 коэффициента для каждого канала, шаг разностного уравнения 1 с). В результате реализации ГА получили изменение максимальной функции приспособленности, показанное на рис. 5 (для большей наглядности демонстрации устойчивости решения работа алгоритма не прекращена на 16-м поколении, как этого требует критерий останова, а продолжена до 20-го поколения).

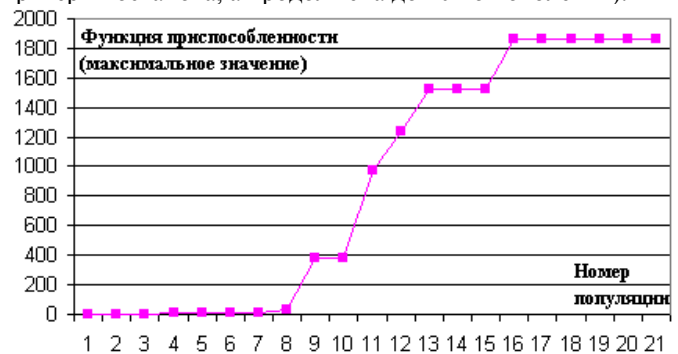


Рис. 5. Функция приспособленности в задаче идентификации двумерного объекта

Лучшая хромосома приводит к решению

$$\begin{cases} y_1(k) = 0,1726 \cdot x(k) - 0,5292 \cdot y_1(k-2) + 1,47224 \cdot y_1(k-1); \\ y_2(k) = 0,1369 \cdot \lambda(k) - 0,4487 \cdot y_2(k-2) + 1,3846 \cdot y_2(k-1); \\ y(k) = y_1(k) + y_2(k). \end{cases}$$

Переходные процессы в истинных каналах объекта и процессы, полученные по построенным моделям при возмущениях X и λ в виде дифференцируемых марковских процессов показаны на рис. 6.

Обозначим еще одну существенную проблему, связанную с решением задачи идентификации. Современные объекты управления требуют проведения быстрой и качественной идентификации без вывода их из контура регулирования. Традиционные методы идентификации (частотные или метод площадей) не позволяют проводить идентификацию в замкнутом контуре. Сложность задачи состоит в том, что при наличии замкнутого контура регулирования не только выход объекта коррелирован с входом, но и входная величина статистически зависит от выходной переменной. В отличие от классических методов идентификации, генетические алгоритмы позволяют построить модель объекта на основании данных, полученных в замкнутом контуре системы регулирования.

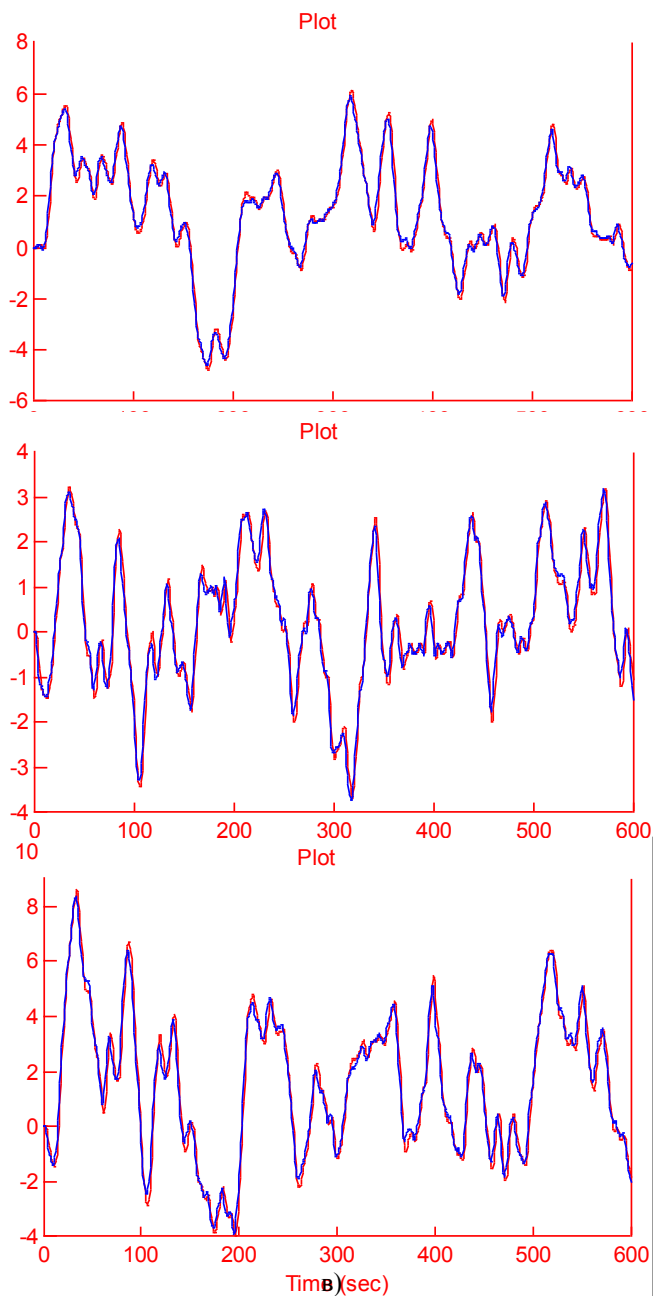


Рис. 6. Графики переходных процессов в двумерном объекте
а – канал ХУ, б – канал λУ, в – общий выход объекта

Рассмотрим пример решения задачи идентификации в замкнутом контуре для системы с объектом с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1}{5p^2 + 10p + 1}, \quad \%$$

и ПИ-регулятором со следующими настройками: $K_p = 4,68 \, \%/ \%$; $T_i = 3,44 \, \text{с}$. Получим выборку значений "вход/выход" при действии внутреннего возмущения в виде суммы ступенчатого воздействия и шума (марковский процесс). Шаг разностного уравнения установим равным 1 с. Реализация генетического алгоритма привела к графику зависимости максимального значения функции приспособленности от номера популяции (рис. 7), позволившему найти лучшую особь, соответствующую разностному уравнению

$$y(k) = 0,001598 \cdot x(k) - 0,83445 \cdot y(k-2) + 1,8329 \cdot y(k-1).$$

Качество полученной модели вполне сопоставимо с качеством моделей, получаемых при идентификации в

разомкнутом контуре (рис. 8). Ошибки в определении динамических свойств практически нет, а ошибка в статике составляет 1,5%, что не превышает допустимого значения.



Рис. 7. Функция приспособленности в задаче идентификации в замкнутом контуре

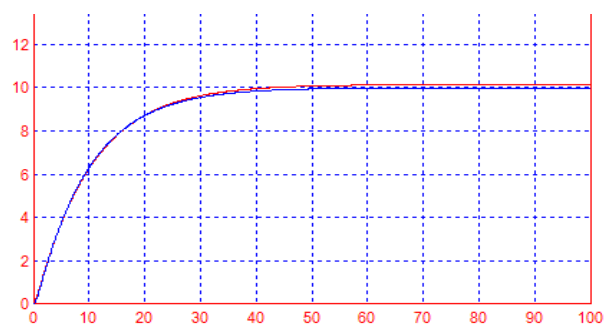


Рис. 8. Сравнение переходных характеристик истинного объекта и модели, построенной при идентификации в замкнутом контуре

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный программный комплекс и проведенные исследования подтверждают практическую полезность применения ГА для решения задачи идентификации объектов управления. По сравнению с классическим решением этой задачи ГА характеризуются повышенной вычислительной устойчивостью. В результате применения ГА становится возможным решение задачи идентификации в замкнутом контуре регулирования и проведение идентификации для многомерных объектов.

Список литературы

- [1] Holland J. H., Adaption in Natural and Artificial Systems, Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [2] Зуев Н.А., Смирнов М.С., Тетеревков И.В. Применение генетических алгоритмов в задачах автоматического управления; ИГЭУ им В.И. Ленина, Иваново, 2014.
- [3] Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л., Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. - М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452с.

References

- [1] Holland J. H., Adaption in Natural and Artificial Systems, Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [2] Zuev N., Smirnov M., Teterevko I. Application of genetic algorithms in problems of automatic control; Ivanovo State Power University, Ivanovo, 2014.
- [3] D. Rutkovskaya, Pilinsky M. Rutkowski L. Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems: Trans. from Polish. - M.: Hotline - Telecom, 2006, pp 452.

Расчет показателей надежности систем автоматизации с применением полумарковских процессов

В. О. Шатских, И. В. Тетеревков
Ивановский Государственный Энергетический Университет
г. Иваново, Российская Федерация

Аннотация — Рассматривается применение полумарковских процессов для расчета показателей надежности систем автоматизации. Изложена методика расчета, позволяющая снять основные ограничения переходных методов. Приведен пример расчета показателей надежности измерительного канала в соответствии с изложенной методикой.

Ключевые слова — показатели надежности; переходные методы; полумарковский процесс.

Calculation of the reliability of automation systems using semi-Markov processes

Vladislav Shatskih, Ilya Teterevkov
Ivanovo State Power Engineering University
Ivanovo, Russian Federation

Abstract — The application of semi-Markov processes for indicators of reliability of automation systems, the methods of calculation, thus relieving the main limitations of transient methods is considered. An example of calculating the reliability of the measurement channel in accordance with the procedure laid down.

Keywords — parameters of reliability; transitional methods; semi-Markov process.

I. ВВЕДЕНИЕ

Качество работы АСУ определяется не только по переходным процессам, но также связано с надежностью работы системы автоматизации. Расчет показателей надежности позволяет сделать важные практические выводы как на этапе проектирования, так и во время эксплуатации АСУ. Реальные системы автоматизации обычно рассматривают как восстанавливаемые, а для расчета надежности подобных систем применяют переходные методы [1]. Отметим, что применение этих методов связано с существенными ограничениями. Наиболее полный набор показателей надежности (ВБР, функция и коэффициент готовности, интенсивность потока отказов, средняя наработка до отказа) позволяет определить метод переходных интенсивностей. Существенным ограничением на реализуемость этого метода является требование экспоненциальности законов распределений всех наработок, хотя в реальных условиях время восстановления и длительность проведения диагностических работ чаще распределены равномерно или нормально. Метод переходных вероятностей работает с дискретным временем, требуя стационарности потока отказов, но не накладывая ограничение на вид законов распределений. Это не позволяет получить решение в виде формулы. Результат чаще всего имеет численный

вид, а из показателей надежности можно найти только коэффициент готовности.

II. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУМАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ

Совместить достоинства обоих методов можно за счет применения полумарковского процесса [2], при котором вероятности и направления переходов из состояния в состояние не зависят от времени, а время пребывания в каждом состоянии – случайная величина с произвольным законом распределения. В соответствии со сформированным графом состояний составляется матрица переходов

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{pmatrix},$$

где n – количество возможных состояний; p_{ij} – вероятность перехода из j -го состояния в i -ое, причем

$$p_{ij} = \int_0^{\infty} F_{ij}(t) dt,$$

где $F_{ij}(t)$ – функция распределения длительности нахождения процесса в состоянии i при условии перехода в состояние j . Если из состояния i возможен только один переход – в состояние j , то $p_{ij} = 1$. Естественно, что сумма всех вероятностей переходов в каждом столбце матрицы \mathbf{M} должна быть равна единице. Для нахождения показателей надежности необходимо рассчитать

предельные вероятности P_i , получаемые в результате решения системы, аналогичной соответствующей системе метода переходных вероятностей:

$$\left\{ P_1 = \sum_{k=1}^n P_k \cdot p_{k1}; \dots; P_n = \sum_{k=1}^n P_k \cdot p_{kn}; \sum_{j=1}^n P_j = 1. \right.$$

Рассмотрев каждое состояние системы и применив теорему об умножении вероятностей, можно определить зависимости вероятностей пребывания в i -ых состояниях с учетом всех возможных выходов из этих состояний от времени $P_i(t)$. Это позволяет найти среднее время пребывания полумарковского процесса в i -ом состоянии как

$$\tau_i = \int_0^{\infty} P_i(t) dt.$$

Зная значения P_i и τ_i , можно найти среднюю наработку на отказ и среднее время простоя, связанное с восстановлением и заменой

$$\tau = \frac{\sum_{ir=1}^{kr} P_{ir} \cdot \tau_{ir}}{\sum_{ir=1}^{kr} P_{ir} \cdot \sum_{in=1}^{kn} p_{irin}} \quad \text{и} \quad \tau_n = \frac{\sum_{in=1}^{kn} P_{in} \cdot \tau_{in}}{\sum_{ir=1}^{kr} P_{ir} \cdot \sum_{in=1}^{kn} p_{irin}},$$

где индексом ir отмечены работоспособные состояния (в количестве kr), а индексом in – неработоспособные (в количестве kn). Эти значения позволяют рассчитать коэффициент готовности

$$K_G = \frac{\tau}{\tau + \tau_n}.$$

Параметр потока отказов можно определить как

$$\omega(t) = \frac{1}{t} \sum_{in=1}^{kn} \frac{P_{in} \cdot t}{\sum_{i=1}^n P_i \cdot \tau_i}.$$

Таким образом, реализация метода позволяет получить аналитические выражения для таких показателей надежности как средняя наработка на отказ, коэффициент готовности и параметр потока отказов.

III. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

Для иллюстрации возможностей метода покажем пример расчета показателей надежности измерительного канала. Сначала рассмотрим работу измерительного канала при отсутствии диагностической системы. Допустим, что явные внезапные отказы происходят намного реже, чем неявные параметрические и, вследствие этого, влиянием явных отказов пренебрежем. Параметрические отказы, связанные с нарушением качества предоставления информации (например, с утечками в кабельных линиях или метрологическим отказом датчика) будут обнаруживаться только в результате проверок, проводимых с равной периодичностью T_p . Граф состояний, соответствующий рассматриваемому случаю, показан на рис. 1. Возможные состояния системы обозначены следующим образом:

"0": работоспособное состояние после ввода в эксплуатацию или завершения восстановления;
 "1": состояние параметрического отказа;
 "2": состояние проверки, проводимой после наступления параметрического отказа с дальнейшим восстановлением системы;

"3": состояние проверки, проводимой до наступления параметрического отказа;

"4": состояние безотказной работы после проверки.

Составим матрицу переходов

$$M = \begin{pmatrix} 0 & p_{01} & 0 & p_{03} & 0 \\ 0 & 0 & p_{12} & 0 & 0 \\ p_{20} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{34} \\ 0 & p_{41} & 0 & p_{43} & 0 \end{pmatrix}$$

и учтем, что в системе существует три безусловных перехода: 3-4, 1-2 и 2-0. Вероятности этих переходов равны 1. Найдем остальные вероятности переходов с использованием основных теорем теории вероятности.

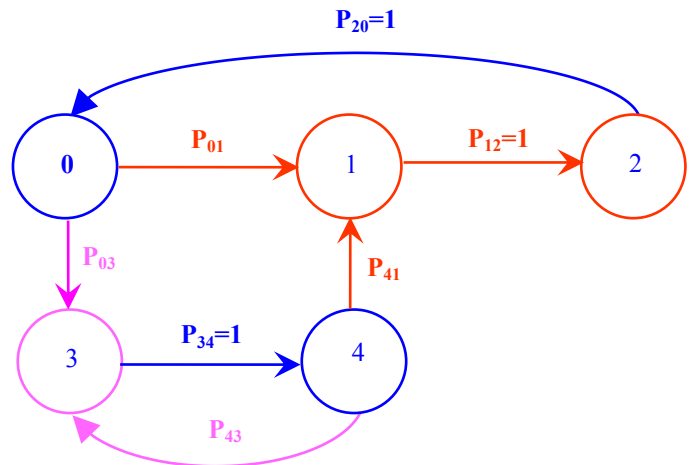


Рис. 1. Граф состояний измерительного канала

Из состояния "0" в состояние "1" система переходит при условии, что отказ наступит раньше, чем начнется очередная проверка, что в предположении экспоненциальности закона распределения наработки на параметрический отказ с параметром α дает нам окончательную формулу

$$p_{01} = P\{T < T_p\} = 1 - e^{-\alpha T_p}.$$

Определимся с вероятностью перехода p_{41} . Событие, состоящее в осуществлении этого перехода, состоит из группы несовместных событий $\{A_i\}$ ($i = 1 \div \infty$), каждое из которых заключается в том, что система откажет до начала $(i+1)$ -ой проверки при условии, что отказа до i -ой проверки не было. Поэтому в соответствии с теоремой о сложении вероятностей несовместных событий запишем выражение для p_{41} :

$$\begin{aligned} p_{41} &= \sum_{i=1}^{\infty} P\{T < (i+1) \cdot T_p\} \cdot P\{T > i \cdot T_p\} = \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} (1 - e^{-(i+1) \cdot \alpha \cdot T_p}) \cdot e^{-\alpha \cdot i \cdot T_p} = \sum_{i=1}^{\infty} (e^{-\alpha \cdot i \cdot T_p} - e^{-(2+i) \cdot \alpha \cdot T_p}) = \\ &= \frac{e^{-\alpha \cdot T_p}}{1 - e^{-\alpha \cdot T_p}} - \frac{e^{-3 \cdot \alpha \cdot T_p}}{1 - e^{-2 \cdot \alpha \cdot T_p}}. \end{aligned}$$

С учетом того, что из состояний "0" и "4" существует всего по два выхода, запишем выражения для вероятностей переходов 0-3 и 4-3:

$$p_{03} = 1 - p_{01}; \quad p_{43} = 1 - p_{41}.$$

Составим систему уравнений для нахождения предельных вероятностей и подставим в нее значения вероятностей переходов, равные единице:

$$\begin{cases} P_0 = p_{20} \cdot P_2; \\ P_1 = p_{01} \cdot P_0 + p_{41} \cdot P_4; \\ P_2 = p_{12} \cdot P_1; \\ P_3 = p_{03} \cdot P_0 + p_{43} \cdot P_4; \\ P_4 = p_{34} \cdot P_3; \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1. \end{cases}$$

Это упрощает запись и позволяет легко найти решение этой системы в общем виде:

$$P_0 = P_1 = P_2 = \frac{p_{41}}{2 + 3 \cdot p_{41} - 2 \cdot p_{01}}; P_3 = P_4 = \frac{p_{01} - 1}{2 + 3 \cdot p_{41} - 2 \cdot p_{01}}.$$

Найдем среднее время пребывания системы в рассматриваемых состояниях. В момент времени t система находится в состоянии "0" при условии, что параметрический отказ еще не наступил и не истек первый после ввода в эксплуатацию или восстановления межповерочный интервал:

$$P_0(t) = P\{t < T, t < T_{\Pi}\} = P\{t < T\} \cdot P\{t < T_{\Pi}\}.$$

Наработка на метрологический отказ распределена экспоненциально, а длительность межповерочного интервала принимаем постоянной величиной:

$$P\{t < T\} = e^{-\alpha \cdot t}, P\{t < T_{\Pi}\} = \begin{cases} 1, \text{ при } t < T_{\Pi}; \\ 0, \text{ при } t \geq T_{\Pi}. \end{cases}$$

Среднее время пребывания в состоянии "0" находим как интеграл от вероятности пребывания в этом состоянии:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= \int_0^{\infty} P_0(t) dt = \int_0^{T_{\Pi}} e^{-\alpha \cdot t} \cdot 1 dt + \int_{T_{\Pi}}^{\infty} e^{-\alpha \cdot t} \cdot 0 dt = \\ &= \int_0^{T_{\Pi}} e^{-\alpha \cdot t} dt = -\frac{1}{\alpha} \cdot e^{-\alpha \cdot t} \Big|_0^{T_{\Pi}} = \frac{1 - e^{-\alpha \cdot T_{\Pi}}}{\alpha}. \end{aligned}$$

В момент времени t система находится в состоянии "4", если рассматриваемый момент находится после завершения поверки и отказ к этому времени еще не наступил:

$$P_4(t) = P\{t < T, t > T_{\Pi}\} = P\{t < T\} \cdot P\{t > T_{\Pi}\}.$$

Среднее время пребывания в состоянии "4" находим как

$$\begin{aligned} \tau_4 &= \int_0^{\infty} P_4(t) dt = \int_0^{T_{\Pi}} e^{-\alpha \cdot t} \cdot 0 dt + \int_{T_{\Pi}}^{\infty} e^{-\alpha \cdot t} \cdot 1 dt = \\ &= \int_{T_{\Pi}}^{\infty} e^{-\alpha \cdot t} \cdot 1 dt = -\frac{1}{\alpha} \cdot e^{-\alpha \cdot t} \Big|_{T_{\Pi}}^{\infty} = \frac{e^{-\alpha \cdot T_{\Pi}}}{\alpha}. \end{aligned}$$

В момент времени t система находится в состоянии "1", если выпадает один из следующих вариантов:

1. Нарabотка на параметрический отказ меньше t и время проведения первой поверки еще не пришло.

2. Рассматриваемый момент времени находится на интервале между первой и второй поверкой, параметрический отказ наступил, но уже после первой поверки.

3. Рассматриваемый момент времени находится на интервале между второй и третьей поверкой, параметрический отказ наступил, но уже после второй поверки: $2T_{\Pi} < t < 3T_{\Pi}$, $2T_{\Pi} < T < t$.

...

i. Рассматриваемый момент времени находится на интервале между i -ой и $(i + 1)$ -ой поверкой, параметрический отказ наступил, но уже после i -ой поверки: $iT_{\Pi} < t < (i + 1)T_{\Pi}$, $iT_{\Pi} < T < t$.

Приведенный набор образует группу несовместных событий, поэтому вероятность нахождения системы в состоянии "1" рассчитываем с использованием теоремы о сложении вероятностей несовместных событий:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= P\{T < t < T_{\Pi}\} + P\{T_{\Pi} < t < 2 \cdot T_{\Pi}, T_{\Pi} < T < t\} + \\ &P\{2 \cdot T_{\Pi} < t < 3 \cdot T_{\Pi}, 2 \cdot T_{\Pi} < T < t\} + \dots + \\ &+ P\{i \cdot T_{\Pi} < t < (i + 1) \cdot T_{\Pi}, i \cdot T_{\Pi} < T < t\} + \dots = \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} P\{i \cdot T_{\Pi} < t < (i + 1) \cdot T_{\Pi}, i \cdot T_{\Pi} < T < t\} = \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} P\{i \cdot T_{\Pi} < t < (i + 1) \cdot T_{\Pi}\} \cdot P\{i \cdot T_{\Pi} < T < t\}. \end{aligned}$$

Второй сомножитель внутри суммы в полученной формуле можно найти как вероятность одновременного наступления двух совместных событий: наступления параметрического отказа до момента времени t и предшествующей безотказной работы до момента времени $i \cdot T_{\Pi}$:

$$P\{i \cdot T_{\Pi} < T < t\} = (1 - e^{-\alpha \cdot t}) \cdot e^{-\alpha \cdot i \cdot T_{\Pi}}.$$

Первый сомножитель описывает вероятность нахождения между двумя соседними окончаниями межповерочного интервала. Поэтому рассматриваемая вероятность равна единице внутри рассматриваемого интервала и нулю вне его. Поэтому среднее время пребывания системы в состоянии "1" равно указанному интегралу:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \int_0^{\infty} P_1(t) dt = \\ &= \int_0^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} P\{i \cdot T_{\Pi} < t < (i + 1) \cdot T_{\Pi}\} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot t}) \cdot e^{-\alpha \cdot i \cdot T_{\Pi}} dt = \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \int_{i \cdot T_{\Pi}}^{(i+1) \cdot T_{\Pi}} (1 - e^{-\alpha \cdot t}) \cdot e^{-\alpha \cdot i \cdot T_{\Pi}} dt = \\ &= \frac{T_{\Pi} \cdot e^{-\alpha \cdot T_{\Pi}} + T_{\Pi} + \frac{1}{\alpha} \cdot (e^{-\alpha \cdot T_{\Pi}} - 1)}{1 - e^{-\alpha \cdot 2 \cdot T_{\Pi}}}. \end{aligned}$$

Для упрощения расчетов примем, что время пребывания в состояниях "2" и "3" постоянно. Время нахождения в состоянии "2" складывается из времени на проведение поверки и осуществления восстановления, а время в состоянии "3" – из времени на проведение поверки. С учетом полученных ранее выражений для предельных вероятностей, вероятностей переходов и средних времен пребывания в состояниях записываем формулу для средней наработки на отказ

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P_0 \cdot \tau_0 + P_4 \cdot \tau_4}{P_0 \cdot (p_{01} + p_{03}) + P_4 \cdot (p_{41} + p_{43})} = \\ &= \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1 + e^{-\alpha \cdot T_{\Pi}} - 2 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot T_{\Pi}}}{2 + e^{-\alpha \cdot T_{\Pi}} - 2 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot T_{\Pi}}}. \end{aligned}$$

Для вычисления среднего времени простоя учтем время нахождения в состоянии параметрического отказа и

время, затрачиваемое на проведение проверок и восстановлений:

$$\tau_n = \frac{P_1 \cdot \tau_1 + P_2 \cdot \tau_2 + P_3 \cdot \tau_3}{P_0 \cdot (p_{01} + p_{03}) + P_4 \cdot (p_{41} + p_{43})} =$$

$$= \frac{e^{-4 \cdot \alpha \cdot T_{п}} \cdot (\tau_2 + \tau_3) - e^{-3 \cdot \alpha \cdot T_{п}} \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + T_{п} + \tau_2 \right) + 2 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot T_{п}} \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + T_{п} - \tau_2 - \tau_3 \right) + \tau_2 \cdot e^{-\alpha \cdot T_{п}} + T_{п} + \tau_2 + \tau_3 - \frac{1}{\alpha}}{2 + e^{-\alpha \cdot T_{п}} - 4 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot T_{п}} - e^{-3 \cdot \alpha \cdot T_{п}} + 2 \cdot e^{-4 \cdot \alpha \cdot T_{п}}}$$

Найденные выражения для средней наработки и среднего времени простоя позволяют найти выражение для коэффициента готовности.

Подставим в полученные формулы следующие исходные данные: длительность проверки 2 часа, время восстановления 8 часов, параметр экспоненциального распределения наработки на параметрический отказ равен $0,001 \text{ ч}^{-1}$, ширина межповерочного интервала равна 2000 ч. Получаем следующие значения показателей надежности: средняя наработка на метрологический отказ равна 523,52 ч; среднее время простоя равно 768,56 ч; K_g равен 0,405.

Теперь рассмотрим работу этого же измерительного канала при условии, что система снабжена средствами программной функциональной диагностики, позволяющими обнаруживать возникновение параметрического отказа в течение некоторого времени диагностики. В этом случае состояние "1" будет соответствовать параметрическому отказу с одновременной работой диагностической процедуры, после завершения которой выявляется факт параметрического отказа, и система незамедлительно подвергается восстановлению. Состояние "3" – это состояние восстановления. Также условимся, что применение программных средств диагностики не отменяет периодического проведения проверок. Для упрощения расчетов будем считать, что $\tau_{\text{диагностики}}$ – величина постоянная и пренебрежем вероятностью отказа диагностических средств. В отличие от предыдущего случая, при данном варианте $\tau_2 = \tau_{\text{восстановления}}$; $\tau_1 = \tau_{\text{диагностики}}$; $\tau_3 = \tau_{\text{проверки}}$.

По сравнению с предыдущим вариантом расчета средняя наработка на параметрический отказ остается без изменения, а среднее время простоя изменяется:

$$\tau_n = \frac{-e^{-2 \cdot \alpha \cdot T_{п}} \cdot (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) + e^{-\alpha \cdot T_{п}} \cdot (\tau_1 + \tau_2) + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3}{2 + e^{-\alpha \cdot T_{п}} - 2 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot T_{п}}}$$

что приводит к изменению и коэффициента готовности.

Принимая в качестве исходных данные предыдущего расчета и полагая $\tau_{\text{диагностики}} = 2 \text{ ч}$, получаем следующие значения показателей надежности измерительного канала с программной диагностикой параметрического отказа: средняя наработка на метрологический отказ равна 523,52 ч; среднее время простоя равно 6,26 ч; K_g равен 0,988. Таким образом, за счет работы средств диагностики среднее время простоя (включая время неправильного

функционирования после параметрического отказа) снизилось в 122,8 раза, а коэффициент готовности повысился в 2,44 раза.

Естественно, что улучшение показателей надежности будет во многом зависеть от величин α и $T_{п}$. На графике (см. рис. 2) показана зависимость эффективности по повышению коэффициента готовности в системе с диагностикой по сравнению с системой без диагностики от периодичности проверок $T_{п}$ при различных значениях α .

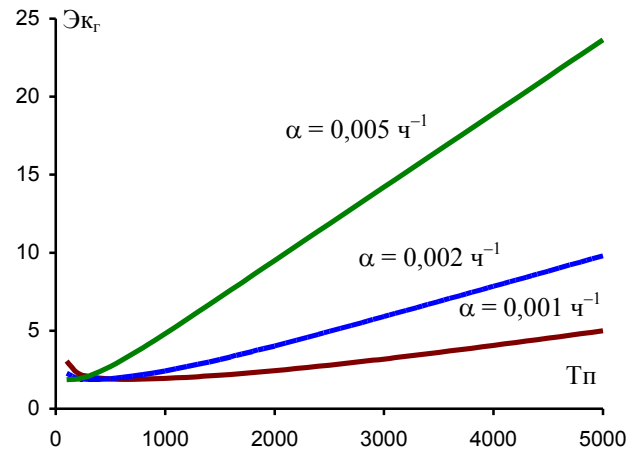


Рис. 2. Эффективность по повышению K_g

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная методика расчета показателей надежности с применением полумарковских процессов позволяет обойти ограничения переходных методов, накладываемые на экспоненциальность законов распределения. Кроме того, результаты расчета получаются в виде аналитических зависимостей, а не набора числовых значений. Это позволяет проводить исследование влияния различных параметров на показатели надежности систем и предлагать мероприятия по улучшению надежности.

Список литературы

- [1] Ястребенский, М.А. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами: Учеб. пособие для вузов. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 264 с.
- [2] Тетеревков, И.В. Надежность систем автоматизации: Учеб. пособие для вузов. – Иваново: ИГЭУ, 2007. – 344 с.

References

- [1] M.A. Yastrebenskiy. The reliability of automated process control systems: Proc. manual for schools. - Moscow: Energoatomizdat, 1989, pp. 264.
- [2] I.V. Teterevko. Reliability of automation systems: Proc. manual for schools. - Ivanovo: Izd-vo ISPU, 2007, pp. 344.

Актуальность модернизации автоматики теплового пункта ИвТЭЦ-3

Ю. Ю. Кольчугина
ИГЭУ
г. Иваново, Российская Федерация

Аннотация — данная статья посвящена вопросам модернизации автоматики теплового пункта ивановской теплоэлектростанции №3. Рассмотрена действующая система автоматизации, учтены ее недостатки. Предложена новая система автоматизации на базе интеллектуальных модулей «ТЕКОНИК».

Ключевые слова — Иваново; система теплоснабжения; автоматизация; интеллектуальный модуль (Ключевые слова)

The urgency of upgrading of the heat substation for Ivanovo thermal power plant №3

Julija Kol'chugina
Ivanovo State Power Engineering University
Ivanovo, Russian Federation

Abstract — this article is dedicated to the modernization of the substation automation Ivanovo thermal power plant №3. We consider the action of an automation system that takes into account its shortcomings. The new automation system based on intelligent modules "TECONIK."

Keywords — Ivanovo; heating system ; automation; intelligence module (key words)

I. ВВЕДЕНИЕ

Ивановская теплоэлектростанция №3 - крупнейшая в Ивановской энергосистеме, в настоящее время является филиалом ОАО «ТГК-6». Она снабжает тепловой энергией жилой сектор и промышленные предприятия городов Иваново и Кохмы и поставляет электрическую энергию на оптовый рынок электроэнергии России. Строительные работы на площадке ТЭЦ-3 начались в 1970 году, 3 октября 1974 года был пущен в эксплуатацию пиковый водогрейный котел №1, а через месяц, в ноябре - котел №2. 31 декабря 1974 г. ТЭЦ-3 была введена в число действующих предприятий - это день рождения электростанции.

В настоящее время Ивановская ТЭЦ-3 располагает следующим оборудованием: 5 энергетических котлов ТП-87 паропроизводительностью по 420 т/час, 2 водогрейных котла ПТВМ-100 и два КВГМ-100 теплопроизводительностью по 100 Гкал/час, 4 турбины типа: ПТ-60, Т-100, и две ПТ- 80.

В связи с отсутствием внешних потребителей пар из производственных отборов станционных турбин используется только для покрытия собственных нужд станции.

II. СХЕМА ТРУБОПРОВОДОВ СЕТЕВОЙ ВОДЫ

Система теплоснабжения представляет собой сложный комплекс установок, устройств и агрегатов, режимы которых взаимосвязаны в непрерывном теплоэнергетическом процессе (рис. 1).

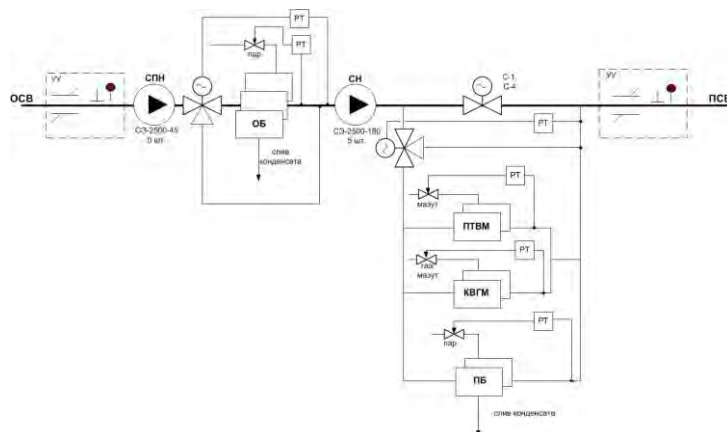


Рис. 1. Схема трубопроводов сетевой воды

Теплофикационные отборы турбин используются для нагрева сетевой и подпиточной воды. Сетевая вода, пришедшая из города по обратным трубопроводам теплосети, прокачивается сетевыми подпорными

насосами (СПН) через трубные системы подогревателей сетевых горизонтальных (ПСГ) турбин Т-100 и ПТ-80, где нагревается паром из регулируемых отопительных отборов до заданной диспетчером температуры. Нагретая сетевая вода поступает на всас сетевых насосов и, далее, по прямым трубопроводам отправляется в город потребителю. В зимнее время, при недостаточном нагреве сетевой воды в ПСГ турбин, эта вода может дополнительно нагреваться в водогрейных котлах пиковой котельной. В котельной установлены два котла типа ПТВМ-100 (топливо-мазут) и два котла типа КВГМ-100 (топливо-газ/мазут) тепловой производительностью 100 Гкал/час каждый.

Возникающие в процессе потребления потери сетевой воды восполняются подпиточной водой. На ТЭЦ-3 для подпитки используется питьевая вода из городского водопровода.

III. ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ УЗЛОМ

Управление данной системой очень сложный и трудоемкий процесс, потому что нужно решать многие характерные задачи, стоящие перед автоматизированными системами. Такие как: экономичность технологического процесса, экономичное использование энергоносителей, экономия электрической энергии, безошибочность работы персонала, достаточное информационное сопровождение. Исходя из требований количественного и качественно-количественного регулировки производства тепла, необходимо поддерживать определенный гидравлический режим котельных агрегатов, а так же производить регулирование температуры, давления и расхода воды.

Разрабатываемая система автоматизации должна обеспечивать необходимую температуру на входе в городскую теплотрассу, в зависимости от диспетчерского графика нагрузок, а так же поддерживать необходимое давление в магистралях.

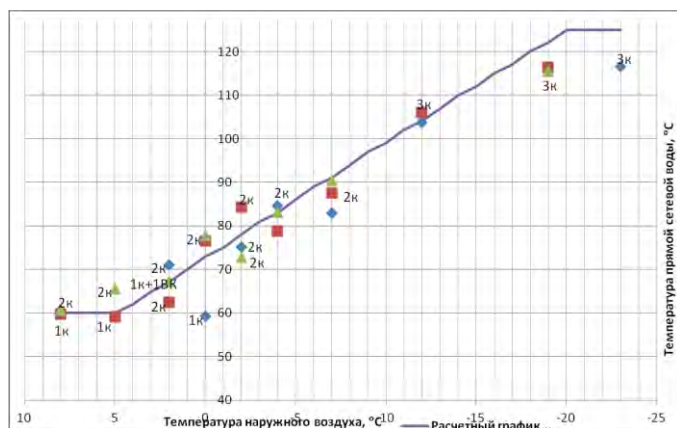


Рис. 2. Расчетный и реальный графики нагрузки.

На рис. 2 показаны графики нагрузок: сплошная линия это расчетный график, а точками указаны температуры прямой сетевой воды, взятые из реального графика нагрузок.

Из графика видно, что реальная температура никак не соответствует расчетной температуре. Из этого можно сделать вывод, что система практически неуправляема. Она не отвечает главным задачам, которые перед ней стоят.

IV. НЕДОСТАТКИ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Действующая система автоматизации реализована с помощью комплекса аналоговых средств «Каскад» и «Каскад-2». Оперативный контроль и управление основными технологическими процессами осуществляется с группового щита управления, вспомогательного оборудования – с местных щитов управления.

На сегодняшний день регуляторы Р-21 и Р-27, входящие в этот комплекс, морально устарели. И если еще прием заказов на аппаратуру «Каскад-2» ведется по договорной цене, то «Каскад» не выпускается вообще.

Так же у существующей системы присутствуют следующие недостатки:

- Система позволяет реализовать только простые алгоритмы управления.
- Имеет низкий уровень автоматизации и большое количество контрольно-измерительных и преобразовательных приборов, что экономически и технически нецелесообразно.

В связи с этим перед нами и возникает задача модернизации.

V. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Система автоматизации должна обеспечивать:

- Нормативный уровень теплоэнергосбережения;
- Нормативный уровень надежности;
- Требования экологии;
- Безопасность эксплуатации.

Система автоматизации должна обеспечивать автоматическое регулирование следующих параметров:

- Уровень конденсата греющего пара в ПСГ и пиковых бойлерах (ПБ), с помощью регулирующего клапана (РК) на сливе конденсата греющего пара
- Температуру воды на выходе из сетевого подогревателя, воздействуя на РК греющего пара.
- Температуру воды на выходе из группы сетевых подогревателей, с помощью трехходового регулирующего клапана на линии обратной сетевой воды (ОСВ).
- Давление сетевой воды в обратной магистрали тепловой сети, т. е. поддержание давления на всасе СПН.
- Давление и температуру сетевой воды в прямой магистрали тепловой сети.
- Температуру воды за водогрейным котлом (ВК), с помощью РК на линии подачи топлива.
- Температуру воды за группой ВК, с помощью трехходового РК на линии ОСВ.

II. ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ

- Экономичность, надежность и безопасность атомных электрических станций
- Теплообмен в промышленных установках
- Безопасность жизнедеятельности в техносфере
- Моделирование физических процессов

Повышение эффективности турбопитательных насосов АЭС с использованием нейросетевых технологий

В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков, В.А. Дунаев
Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина
Иваново, Российская Федерация
nik-lon@mail.ru, andreyd6767@mail.ru

Аннотация

В данной статье рассматриваются проблемы поиска путей повышения эффективности эксплуатации тепломеханического оборудования на основе анализа режимов работы оборудования АЭС и определение технически обоснованных норм расхода энергии. Для проведения анализа и повышение эффективности работы оборудования рассматривается технология, основанная на нейросетевом моделировании. Приведена возможность использования технологии на примере одного из турбопитательных насосов блока № 2 Калининской АЭС.

Ключевые слова — турбопитательный насос, эффективность, анализ, нейросетевые технологии, эксплуатация энергоблока, параметры работы, нормы расхода тепловой энергии.

Improving the efficiency of NPP turbine driven feed water pumps using neural network technologies

Vladimir Gorbunov, Nikita Lonshakov, Vladislav Dunaev
Ivanovo State Power Engineering University
Ivanovo, Russian Federation
nik-lon@mail.ru, andreyd6767@mail.ru

Abstract

This article discusses the problem of finding ways to improve the operational efficiency of thermal and mechanical equipment on the basis of the analysis of modes of NPP equipment and determination of technically based rate of use energy. For analyze and improve the performance of the equipment is considered a technology based on neural network modeling. The possible of the use of technology as an example of one of the turbine drive feed water pumps block number 2 of Kalinin NPP.

Keywords — turbine drive feed water pump, efficiency, analysis, neural network technology, operation of power generating unit, operating parameters, rate of use heat energy.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в атомной энергетической промышленности активно развивается система энергоменеджмента. В основе формирования данной системы лежат требования международного стандарта ISO 50001-2011 «Система энергетического менеджмента. Требования и руководства по применению» [1]. Внедрение этого стандарта обязывает администрации атомных станций проводить мероприятия по улучшению энергоэффективности, энергобезопасности и энергопотребления. В энергетической политике ОАО «Концерн Росэнергоатом» для каждой атомной электростанции сформулированы стратегические цели, направленные на снижение затрат тепловой и электрической энергии, отпускаемой на собственные и

хозяйственные нужды станции. Турбопитательные насосы АЭС являются одними из основных потребителей тепловой энергии пара, направляемой на собственные нужды станции.

Исходя из требований энергосбережения в атомной отрасли, создается программный комплекс, предназначенный для анализа и повышения эффективности эксплуатации турбопитательных насосов (ТПН) АЭС.

II. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТУРБОПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ АЭС

В основе создаваемого программного комплекса лежит математическое моделирование с привлечением

нейросетевой технологии. Предлагаемая технология для анализа и повышения эффективности эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС имеет следующие преимущества по сравнению с другими[2]:

- алгоритм программного комплекса строится на использовании экспериментальных данных существующего ТПН, поэтому он учитывает все особенности работы данного насоса;
- низкая погрешность результатов полученных в результате работы программного комплекса, которая составляет менее 3%;
- программный комплекс обладает малой ресурсоёмкостью по временным, трудозатратным и аппаратным ресурсам;
- программный комплекс может создаваться в условиях ограниченного информационного обеспечения.

В качестве объекта исследования выбран турбопитательный насос №1 блока №2 Калининской АЭС.

Были получены значения одиннадцати тепломеханических параметров, снимаемые в процессе эксплуатации энергоблока за период с 1 января по 31 декабря 2014 года (табл. 1).

Таблица 1. ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ДИАПАЗОН ИХ ИЗМЕНЕНИЯ

Наименование параметра	Диапазон изменения
Давление питательной воды на входе в бустерный насос, МПа (кгс/см ²)	0,85 – 0,92 (8,35 – 9,09)
Давление питательной воды на входе в главный питательный насос, МПа (кгс/см ²)	2,38 – 3,56 (23,3 – 34,9)
Давление питательной воды на выходе из главного питательного насоса, МПа (кгс/см ²)	7,39 – 8,69 (72,5 – 85,3)
Расход питательной воды за питательным турбопитательным агрегатом, кг/с (т/ч)	433 – 952 (1560 – 3430)
Температура питательной воды за питательным турбопитательным агрегатом, °С	162 – 165
Расход пара на приводную турбину, кг/с (т/ч)	12,1 – 20,0 (43,6 – 72,0)
Температура пара перед главной паровой задвижкой, °С	174 – 229
Давление пара перед стопорным клапаном, МПа (кгс/см ²)	0,80 – 0,94 (7,86 – 9,20)
Давление пара за регулирующим клапаном, МПа (кгс/см ²)	0,34 – 0,62 (3,34 – 6,08)
Температура пара на выходе из приводной турбины, °С	26,4 – 43,0
Вакуум в конденсаторе приводной турбины, МПа (кгс/см ²)	-0,09 – -0,10 (-0,88 – -1,00)
Температура пара в конденсаторе приводной турбины, °С	18,2 – 41,3
Температура охлаждающей воды на входе в конденсатор приводной турбины, °С	6,00 – 31,2
Температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора приводной турбины, °С	11,7 – 37,5

На рис.1 представлена принципиальная схема турбопитательного насоса и перечислен состав оборудования, исследуемого в процессе создания программного комплекса.

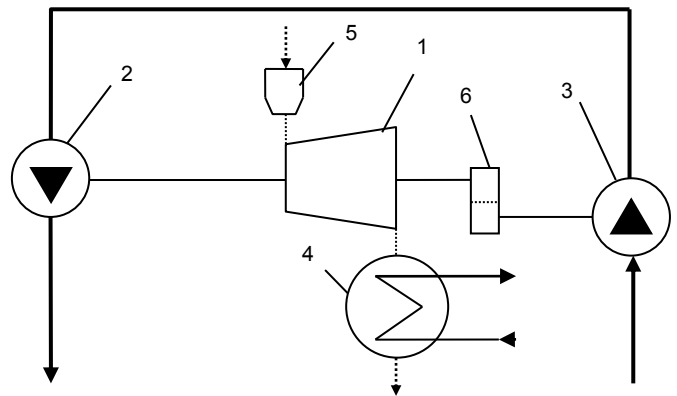


Рис. 1. Принципиальная схема питательного турбопитательного агрегата: 1 - паровая турбина ОК-12А; 2 - главный питательный насос ПТ-3750-75; 3 - бустерный насос 400-QHD-spec; 4 - конденсатор турбины; 5 - стопорно-регулирующий клапан; 6 - редуктор Р2.

Полученные данные подвергались первичной обработке и анализу. В ходе анализа было выявлено изменение коэффициента полезного действия (КПД) работы насоса в диапазоне от 9,81% до 16,03%. В данном случае под КПД насоса понимается отношение энергии, получаемой питательной водой от ТПН, к тепловой энергии пара, затрачиваемой на работу насоса (1).

$$КПД = \frac{G \cdot (P_2 - P_1)}{D \cdot (h_1 - ct_k)} \quad (1)$$

где, G - расход питательной воды за турбопитательным насосом;
 P_2 - давление питательной воды за турбопитательным насосом;
 P_1 - давление питательной воды перед турбопитательным насосом;
 D - расход пара на приводную турбину;
 h_1 - энтальпия пара, подводимого к паровой турбине;
 ct_k - энтальпия конденсата, отводимого из конденсатора приводной турбины.

Данный показатель удобен тем, что включает в себя эффективность работы приводной турбины, эффективность работы конденсатора приводной турбины, потери энергии при трении в подшипниках вала приводной турбины, эффективность работы понижающего редуктора Р-2, эффективность перекачки питательной воды бустерным и питательным насосами. При имеющемся наборе исходных данных, определение отдельно каждого из вышеперечисленных показателей невозможно, однако данная технология позволяет с достаточно высокой точностью определить изменение результирующего КПД при изменении основных тепломеханических параметров работы ТПН.

В ходе предварительного анализа также выявлено изменение затрат тепловой энергии на перекачку 1000 тонн питательной воды в диапазоне от 11,60 Гкал до 17,55 Гкал (2).

$$q_{пер} = \frac{D \cdot (h_1 - ct_k)}{G \cdot 4,19} \cdot 10^3 \quad (2)$$

На основе обработанных исходных данных создана математическая модель работы турбопитательного насоса,

имеющая максимальную погрешность вычислений не более 3% в диапазоне изменения эксплуатационных параметров, представленном в табл. 1. На основе полученной модели создается программный комплекс на языке программирования C#.

В настоящее время интерактивная часть программного комплекса состоит из двух вкладок различной функциональности. На первой вкладке (рис. 2) реализована возможность определения эффективности работы ТПН и удельных затрат тепловой энергии, отпускаемой на ТПН при заданном комплексе значений эксплуатационных параметров (в одной точке).

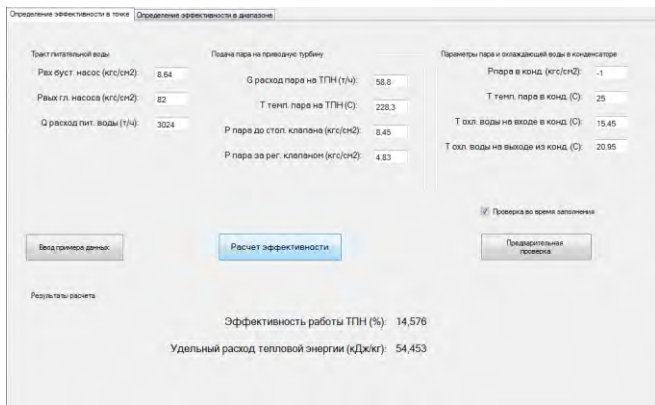


Рис. 2. Первая интерактивная вкладка программного комплекса

На второй вкладке программного комплекса (рис. 3) реализована возможность исследования изменения эффективности работы ТПН и количества отпускаемого на его работу тепловой энергии в зависимости от изменения какого-либо эксплуатационного параметра в заданном диапазоне.

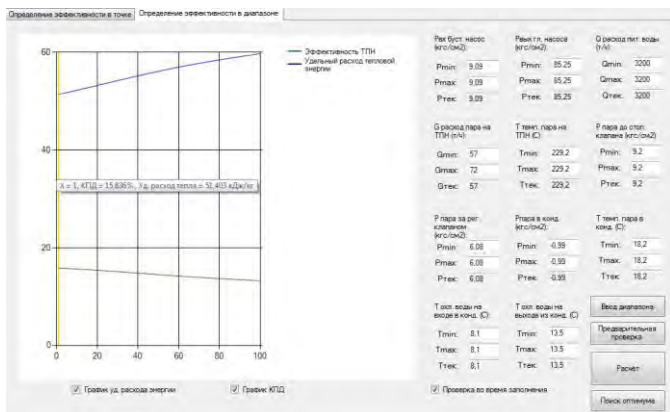


Рис. 3. Вторая интерактивная вкладка программного комплекса

При вводе диапазона изменения параметров и нажатии кнопки «Расчет» происходит определение значений КПД и удельных затрат тепловой энергии в каждой точке диапазона с автоматически заданным интервалом. Полученные результаты выводятся в виде двух линий, соответствующих изменению КПД и удельных затрат тепловой энергии. Предусмотрена возможность программного определения значений входных и выходных параметров в каждой интересующей точке диапазона.

Как было отмечено ранее, модель работает с достаточно высокой точностью в заданном диапазоне изменения эксплуатационных параметров, однако в

процессе исследования изменения КПД и удельных затрат тепловой энергии предусмотрена возможность выхода за диапазон изменения параметров, представленного в таблице 1. В этом случае на графиках отразятся линии-границы диапазона работы модели с погрешностью не превышающей 3% (рис. 4).

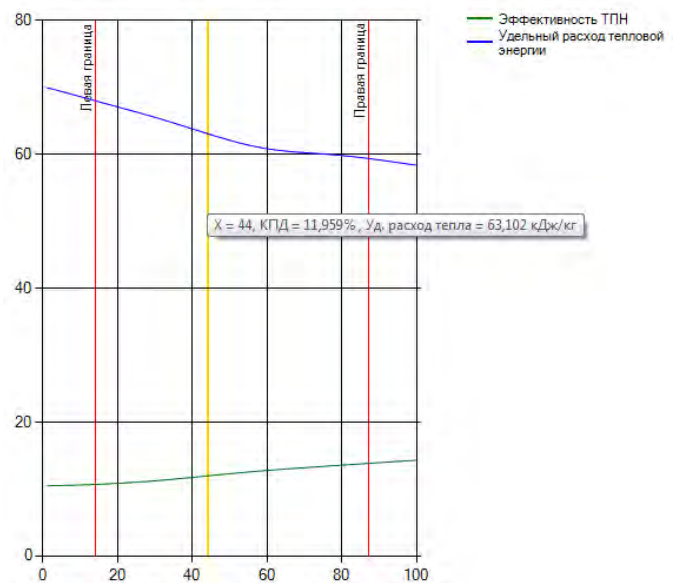


Рис. 4. Линии изменения КПД и удельных затрат тепловой энергии,

Кнопка «Поиск оптимума» предназначена для нахождения режима с наибольшей эффективностью работы насоса. При нажатии на эту кнопку происходит перебор комбинаций регулируемых оператором параметров (в данном случае в качестве регулируемых были приняты следующие параметры: расход пара на приводную турбину, давление пара за регулирующим клапаном, вакуум в конденсаторе) с целью поиска и вывода значений комбинации параметров, при которой наблюдается наибольший КПД работы ТПН.

Во всем программном комплексе предусмотрена защита от ввода комплекса параметров, при котором ТПН не может эффективно работать.

Далее проводился подробный анализ работы ТПН в течение 2014 года. Определялась эффективность работы насоса и затраты тепловой энергии, отпускаемой на привод насоса каждые 6 часов за исключением времени простоя энергоблока (рис.5).

В процессе анализа грубо определены затраты отпускаемой на работу насоса тепловой энергии – 255 000 Гкал/год. Использование данной технологии позволило определить технически обоснованные нормы расхода тепловой энергии для каждого исследуемого режима работы. За счет разницы между реальными затратами тепловой энергии, отпускаемой на ТПН, и определенными технически обоснованными нормами расхода тепловой энергии, выявлена возможность экономии до 13 000 Гкал/год тепловой энергии, отпускаемой на ТПН. Использование данной энергии пара в последующих ступенях энергетической турбины позволило бы увеличить электрическую мощность энергоблока в среднем на 0,5 МВт.

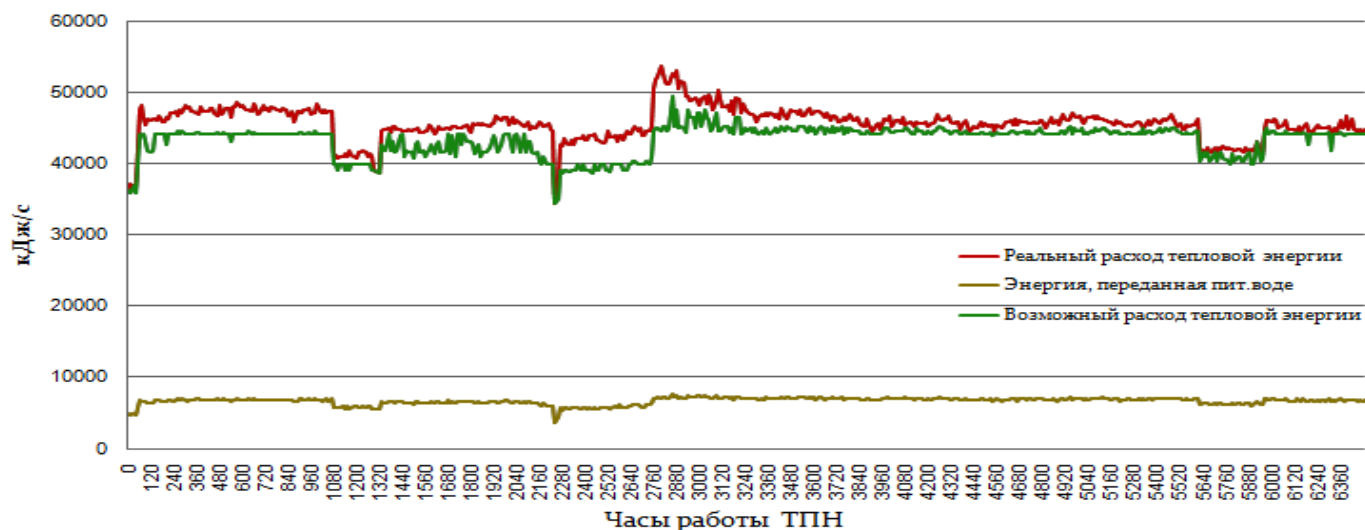


Рис. 5. Изменение затрат тепловой энергии при работе ТПН

В табл. 2 приведены основные показатели, отражающие эффект от применения данной технологии к ТПН №1 блока №2 Калининской АЭС.

Таблица 2. Показатели эффективности применения технологии

Параметр	Величина
Максимально возможная экономия тепловой мощности, МВт (Гкал/ч)	9,90 (8,51)
Минимально возможная экономия тепловой мощности, МВт (Гкал/ч)	0,00(0,00)
Среднее значение тепловой мощности, которую возможно экономить, МВт (Гкал/ч)	2,50 (2,14)
Максимально возможный расход пара, который возможно экономить, т/ч	13,0
Минимально возможный расход пара, который возможно экономить, т/ч	0,00
Среднее значение расхода пара, который возможно экономить, т/ч	3,24
Максимально возможный прирост выработки электроэнергии за счет сэкономленного пара турбопитательного насоса, МВт	2,02
Средний возможный прирост выработки электроэнергии за счет сэкономленного пара турбопитательного насоса, МВт	0,50
Максимально возможная экономия тепловой энергии за 1 год, Гкал	13000
Максимально возможная выработка электрической энергии за счет сэкономленного пара за 1 год, МВт*ч	3270

За исследуемый промежуток времени наблюдались как режимы работы турбопитательного насоса с наименьшими возможными затратами тепловой энергии (наибольшей эффективностью работы), так и режимы, при которых существовала возможность экономии тепловой мощности подводимого пара до 9,90 МВт. Это соответствует снижению расхода отбираемого пара на 13,0 т/ч, что позволяет увеличить электрическую мощность турбоустановки на 2,02 МВт.

III. ВЫВОДЫ ПО ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ

1. Данная технология позволяет получить технически обоснованные нормы расхода тепловой энергии на

эксплуатацию турбопитательного насоса №1 блока №2.

2. Использование результатов полученных на основе программного комплекса, позволит экономить тепловую энергию собственных нужд на привод турбопитательного насоса до 13 000 Гкал в год с турбопитательного насоса №1 блока № 2. Использование тепловой энергии пара для цилиндров среднего и низкого давления основной турбины приведет к среднему росту электрической мощности блока на 0,5 МВт (0,05% Nном).
3. В перспективе планируется создание электронных режимных карт работы турбопитательного насоса №1 блока №2 на основе использования разработанного программного комплекса.
4. Разработанная технология может применяться к анализу и другого тепломеханического оборудования атомной станции.

Список литературы

- [1] Приложение №2 к приказу ОАО «Концерн Росэнергоатом» от 15.11.2013 № 9/1055-П «Стратегические цели и цели в области энергоэффективности на среднесрочную перспективу».
- [2] Горбунов В.А. Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетических университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 475 с.

References

- [1] Appendix №2 to Order ОАО «Koncern Rosjenergoatom» of 15.11.2013 № 9/1055-P «Strategicheskie celi i celi v oblasti jenergojefektivnosti na srednesrochnuju perspektivu».
- [2] Gorbunov V.A. Ispol'zovanie nejrossetevyh tehnologij dlja povyshenija jenergeticheskoj jefektivnosti teplotehnologicheskikh ustanovok / FGBOUVPO «Ivanovo State Power Engineering University». – Ivanovo, 2011. – 475 s.

Моделирование магнитных полей однородно намагниченных тел

А.В. Дмуховская, М.Ф. Фадеева, Г.А. Шмелева
Ивановский Государственный Энергетический Университет имени В.И. Ленина
Иваново, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрено применение аналитического метода фиктивных «магнитных зарядов» и численного метода с применением прикладного программного пакета Radia в интегрированной символьной системе Wolfram Mathematica 9 для расчета магнитных полей однородно намагниченного цилиндра и цилиндра с закругленным верхом — щупа. Исследовалось осевое магнитное поле однородно намагниченного стержня для случаев разных радиусов, высот. Найдена аналитическая зависимость напряженности магнитного поля на оси стержня и показано соответствие аналитической и численных моделей.

Ключевые слова — фиктивный «магнитный заряд», Wolfram Mathematica 9, постоянный магнит

Simulation of the magnetic field is uniformly magnetized bodies.

Alena Dmuhovskaya, Marina Fadeeva, Galina Shmeleva
Ivanovo State Power University named by V.I. Lenin
Ivanovo, Russian Federation

Abstract. Implementation of analytical fictitious «magnetic charges» method and numerical method by the means of the Radia application software as a part of Wolfram Mathematica 9 symbolic framework for magnetic field calculation in case of uniformly magnetized cylinder and circled-top cylinder – probe was taken into consideration in this article. Axial magnetic field of uniformly magnetized rod was analyzed in case of different radiuses and heights. Analytic dependence for axial magnetic field gradient was found and correlation between analytical and numerical model was proved.

Keywords — Fictitious «magnetic charges», Wolfram Mathematica 9, permanent magnet

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач магнитостатики является расчёт магнитных полей от разных источников. К наиболее распространённым источникам постоянного магнитного поля (МП) относятся системы проводников с токами и постоянные магниты. В роли простых объектов выступают однородно намагниченный шар, эллипсоид, плоскость, параллелепипед, цилиндр. К точно аналитически решаемым задачам в магнитостатике относятся: однородно намагниченные эллипсоид (его предельные случаи: шар, бесконечный цилиндр, плоскость) и параллелепипед.

Целью нашей работы являлось исследование и сравнение МП постоянного магнита в форме цилиндра с закругленным торцом аналитическим и численным методами с применением программного пакета Radia в системе Wolfram Mathematica 9. Одним из возможных расчетов в случае МП однородно намагниченного прямоугольного параллелепипеда является решение с

помощью модели магнитных зарядов [1]. Модель магнитных зарядов позволяет использовать аналогию с электростатическим полем электрических зарядов [2].

Уравнения электростатики и магнитостатики в электродинамике Максвелла идентичны. Любой задаче электростатики соответствует аналогичная задача магнитостатики. При замене напряженности электрического поля \vec{E} на напряженность магнитного

поля \vec{H} , и вектора поляризации $\frac{\vec{P}}{\epsilon_0}$ на вектор

намагниченности \vec{M} , для нахождения МП можно применить модель фиктивных «магнитных зарядов» [2].

Следовательно, для расчета МП мы рассматриваем электрическое поле такой же системы электрических зарядов. Для электрического поля сначала находим

потенциал $\varphi = \int d\varphi = \int k \frac{dq}{r}$, потом находим $\vec{E} = -grad\varphi$. В дальнейшем переходим к МП с

напряженностью \vec{H} . Такого рода задача рассматривается на примере аналогии электрического поля однородно поляризованного шара и МП однородно намагниченного шара [3,4]. В данной работе рассчитывается более простой пример МП однородно намагниченного цилиндрического стержня на его оси.

II. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Будем рассматривать МП создаваемое равномерно намагниченным вдоль аксиальной оси цилиндром с высотой ℓ и радиусом a . Одним из возможных аналитических решений задачи в данном случае является решение с помощью модели фиктивных «магнитных зарядов». Ввиду равномерного распределения магнитных диполей можно считать, что МП создаётся «магнитными зарядами», равномерно распределёнными по торцевым поверхностям цилиндра.

Модель «магнитных зарядов» позволяет использовать аналогию с электростатическим полем электрических зарядов [5,6]. Для МП цилиндра применение метода фиктивных «магнитных зарядов» равносильно подсчёту напряженности электрического поля, создаваемого заряженным цилиндром, имеющим поверхностную плотность электрического заряда, численно равную намагниченности насыщения $\sigma = |\vec{M}_s|$. Для вычисления электрического поля сначала рассчитываем потенциал $\varphi = \int d\varphi = \int k \frac{dq}{r}$, потом находим напряженность электрического поля через связь с потенциалом $\vec{E} = -grad\varphi$. В дальнейшем переходим к МП с напряженностью \vec{H} .

III. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МЕТОДОМ ФИКТИВНЫХ «МАГНИТНЫХ ЗАРЯДОВ»

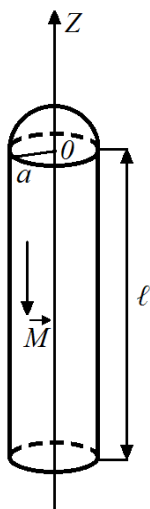


Рис.1

Рассмотрим МП однородно намагниченного стержня высотой ℓ в виде «магнитного шупа». Торцев стержня имеет вид полусферы радиусом a (рис.1). Намагниченность стержня равна \vec{M} . Применение метода фиктивных «магнитных зарядов» позволило найти напряжённость магнитного поля \vec{H} на оси стержня Z .

Электрическое поле однородно поляризованного стержня можно рассчитать по принципу суперпозиции.

Поверхностная плотность связанного заряда $\sigma = P \cos(\theta)$, где

\vec{P} вектор поляризации. Разобьем

поверхность полусферы на элементарные кольцевые зоны радиусом r и высотой dz (рис.2). Элементарный заряд каждой зоны площадью dS запишется через поверхностную плотность связанного заряда σ :

$$dq = \sigma dS = \sigma 2\pi r d\theta = P \cos(\theta) 2\pi a^2 \sin(\theta) d\theta.$$

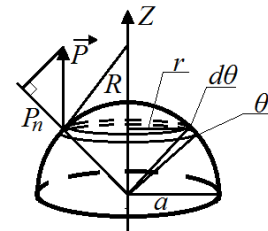


Рис.2

Элементарный потенциал каждой зоны с зарядом dq в произвольной точке на оси стержня будет равен

$$d\varphi = \frac{k dq}{R}, \text{ где расстояние от зоны до выбранной точки:}$$

$$R = \sqrt{r^2 + (z - a \cos(\theta))^2} = \sqrt{a^2 \sin^2(\theta) + (z - a \cos(\theta))^2} = \sqrt{a^2 + z^2 - 2az \cos(\theta)}.$$

Найдем потенциал от всей полусферы:

$$\begin{aligned} \varphi &= kP \int_0^{\pi/2} \frac{2\pi a^2 \sin(\theta) \cos(\theta)}{\sqrt{z^2 + a^2 - 2az \cos(\theta)}} d\theta = \left| \frac{t=a \cos(\theta)}{dt=-a \sin(\theta) d\theta} \right| = \\ &= \int_0^a \frac{kP 2\pi t}{\sqrt{z^2 + a^2 - 2zt}} dt = \left| \frac{2zt = \tau}{d\tau = 2z dt} \right| = \frac{kP}{4z^2} \int_0^{2za} \frac{2\pi \tau}{\sqrt{z^2 + a^2 - \tau}} d\tau = \\ &= \left| \frac{z^2 + a^2 - \tau = x}{dx = -d\tau} \right| = \frac{2\pi kP}{4z^2} \int_{(z-a)^2}^{z^2+a^2} \frac{z^2 + a^2 - x}{\sqrt{x}} dx = \\ &= \frac{2\pi kP}{4z^2} \left(2z^2 x^{1/2} + 2a^2 x^{1/2} - \frac{2}{3} x^{3/2} \right) \Big|_{(z-a)^2}^{z^2+a^2} = \\ &= \frac{2\pi kP}{3z^2} \left(a^3 - z^3 + (z^2 + a^2)^{3/2} \right) \end{aligned}$$

Для напряженности на оси стержня:

$$E_z = -\frac{d\varphi}{dz} = \frac{2}{3} \pi kP \left(1 + 2 \left(\frac{a}{z} \right)^3 + \left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{3/2} - 3 \left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{1/2} \right)$$

При замене напряженности электрического поля \vec{E} на напряженность магнитного поля \vec{H} , и вектора поляризации $\frac{\vec{P}}{\epsilon_0}$ на вектор намагниченности \vec{M} , находим напряженность МП \vec{H} на оси стержня.

$$H(z) = \frac{M}{6} \left(1 + 2 \left(\frac{a}{z} \right)^3 + 2 \left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{3/2} - 3 \left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{1/2} \right)$$

На рис.3 дан график зависимости напряженности магнитного поля $H(z)$ для стержней разного радиуса. Условная намагниченность образца была взята равной 100 А/м. График 1 соответствует радиусу стержня 1 мм, график 2 – 5 мм, 3 – 1 см.

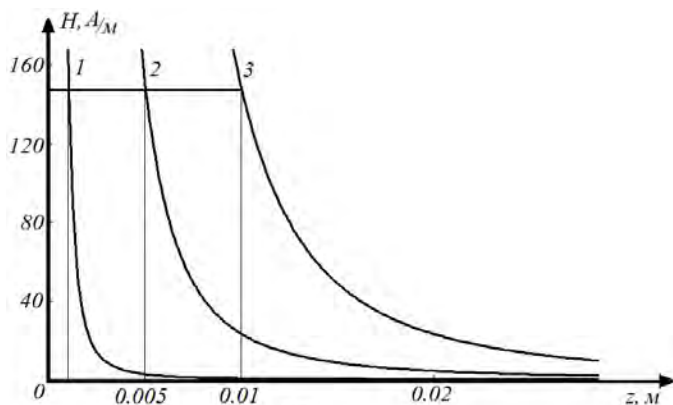


Рис.3

Из графиков зависимости напряженности магнитного поля $H(z)$ видно, что при одной и той же намагниченности вещества стержня магнитное поле тонкого «магнитного щупа» убывает быстрее. На больших расстояниях магнитное поле стремится к нулю, как следует из теории. Напряженность магнитного поля вблизи торца стержня при $z=a$ не зависит от радиуса полусферы и имеет одно и то же значение, соответствующее значению магнитного поля на поверхности полусферы.

Возможное практическое применение модели связано с тем, что сила \vec{F} , действующая на магнитные моменты атомов вещества \vec{p}_m в неоднородном магнитном поле с индукцией \vec{B} , равна $\vec{F} = (\vec{p}_m \nabla) \vec{B}$.

Для тонкого «магнитного щупа» скорость изменения магнитного поля выше, чем для стержня большего радиуса. Следовательно, сила, действующая на малых расстояниях от стержня, будет больше для малого стержня.

IV. ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ПОЛЯ В СИСТЕМЕ WOLFRAM MATHEMATICA 9

В настоящее время в высших учебных технических заведениях широко используются системы автоматизированного проектирования (САПР), производства и расчетов. В САПР применяются современные численные методы, реализованные в универсальных программных системах, таких как ANSYS, Maple, MATLAB. К одному из наиболее известных и приспособленных для математических символьных вычислений и математического моделирования методов относится программа Mathematica.

Численный метод расчёта МП в форме цилиндра с закругленным торцом выполнен с применением прикладного программного пакета Radia в интегрированной символьной системе Wolfram Mathematica 9 (ИССМ). В данной среде для расчета МП применяют процедуры двух видов: построения объектов и вывода значений полей. Для построения щупа потребовались две процедуры:

```
radObjCylMag[{x,y,z}, r, h, nseg, {mx,my,mz} :{0,0,0}],
SphericalVolume[R_, nnφ_, nz_, {mx_,my_,mz_}].
```

Первая процедура `radObjCylMag[{x,y,z}, r, h, nseg, {mx,my,mz} :{0,0,0}]` задает цилиндр, для которого рассчитывается МП. Объект имеет вид цилиндра с

центром в точке $\{x,y,z\}$. Здесь применяются прямоугольные декартовы координаты. Размеры цилиндра задаются параметрами: r — радиус цилиндра, h — высота, n — количество сегментов. Намагниченность образца задается значениями проекций вектора намагниченности соответственно по осям X, Y, Z $\{mx,my,mz\}$ в системе СИ.

Вторая процедура `SphericalVolume[R_, nnφ_, nz_, {mx_,my_,mz_}]` задает объект в виде сферы с центром в точке $\{x,y,z\}$. Здесь применяются сферические координаты. Размеры сферы задаются параметрами: R — радиус сферы, $nnφ$, nz — углы. Намагниченность образца задается значениями проекций вектора намагниченности соответственно по осям X, Y, Z $\{mx,my,mz\}$ в системе СИ.

Для расчета МП объектов применялась процедура `radFld[obj, fid, {x,y,z}]`. Эта процедура `radFld[obj, fid, {x,y,z}]` для заданного объекта `obj` возвращает значение проекции поля `fid`. Такими значениями могут быть проекции вектора магнитной индукции b_x , b_y , b_z или модуль вектора индукции b , проекции вектора напряженности магнитного поля h_x , h_y , h_z или модуль вектора напряженности магнитного поля h для точки поля $\{x,y,z\}$. В качестве выводимых значений полей может быть несколько величин.

Программный модуль для расчета МП сложного объекта в виде магнитного щупа приведен ниже. Магнитный «щуп» может быть представлен как суперпозиция примитивов: цилиндра и полусферы и его магнитное поле есть суперпозиция полей цилиндра и полусферы.

```
<<Radia`;
m=radObjCylMag[{x,y,z},r,h,n,{0,0,Mexp}];
my=0;mz=100;nnφ=40;nz=40;mx=0;
SphericalVolume[
R_, nnφ_, nz_, {mx_,my_,mz_}]:=Module[{z, dz, θ, cosθ,
φ, dφ, SlicePgn, AllSlicePgns},
dz=2.*R/nz; z=-R+dz; dφ=2.*φ/nnφ;
AllSlicePgns={{0.,0.}, -R}};
For[i=1, i<=(nz-1), i++,
θ=ArcSin[z/R]; cosθ=Cos[θ]; φ=dφ;
SlicePgn={R*cosθ, 0.};
For[k=1, k<=(nnφ-1), k++,
SlicePgn=Append[SlicePgn, {R*Cos[φ]*cosθ,
R*Sin[φ]*cosθ}]; φ+=dφ];
AllSlicePgns=Append[AllSlicePgns,
{SlicePgn, z}]; z+=dz];
AllSlicePgns=Append[AllSlicePgns, {{0.,0.}, R}];
radObjMltExtPgn[AllSlicePgns, N[{mx,my,mz}]]];
aSphere =SphericalVolume[1., 40, 40, {0,0,100.}];
t=radObjDrwAtr[aSphere, {0,0.5,0.8}];
g1=radObjCnt[{m,t}];
МП сложного объекта рассчитывается с помощью
приведенных ниже процедур.
radObjDrwAtr[g1,{0,1,0.5}].
```

RA = Table[{z, SetPrecision[radFld[g1, "Bz", {x, y, z}], 5]}, {z, zmin, zmax, hz}];

Сравнение МП «щупа» на оси численным методом и аналитическим методом фиктивных «магнитных зарядов» представлено на рис.4, где сплошной график соответствует аналитическому расчету, а точки — численному расчёту. Условная намагниченность образца была взята равной 100 А/м, радиус стержня 1 мм.

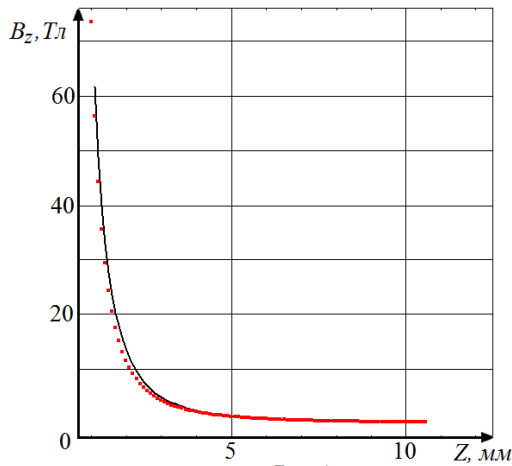


Рис.4

V. ВЫВОДЫ

В ходе проделанной работы мы освоили расчёт магнитных полей объектов, составленных из простых частей: цилиндр, сфера, в ИССМ Wolfram Mathematica 9 с помощью прикладного программного пакета Radia. С помощью предложенных методов можно получать объекты разных форм. Получено хорошее соответствие аналитической и численной моделей, что говорит о достоверности расчётов МП обоими методами.

Применение полученных результатов возможно в учебном процессе, в разработках, связанных с

определением МП различных тел, исследования МП постоянных магнитов.

Список литературы

- [1] Вагин Д.В., Герасименко Т.Н., Поляков П.А. Точное аналитическое выражение для индукции магнитного поля образца прямоугольной формы. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2008. – № 6. – С. 54-56.
- [2] Тамм И.Е. Основы теории электричества: Учеб.пособие для вузов. – 11-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.
- [3] Смайт В. Электростатика и электродинамика. М.: Изд-во иностр. лит., 1954. – 606 с.
- [4] Герасименко Т.Н. «Применение конформных преобразований к расчётам распределения токов, температур и магнитных полей двумерных проводников» Дис. ...к. ф.-м. наук: 01.04.02. – Москва, 2012. 144с.
- [5] Гетьман А.В., Константинов А.В.: «Цилиндрические гармоники магнитного поля однородно намагниченного цилиндра»//Электротехника и электромеханика.-2011.-№5.-С.51-53.
- [6] Engel-Herbert R. and Hesjedal T., Calculation of the magnetic stray field of a uniaxial magnetic domain. // J. Appl. Phys, 97, 074504 (2005).

References

- [1] Vagin D.V., Gerasimenko T.N., Polaykov P.A. Exact analytical expression for the magnetic field of the sample of rectangular shape. // Bulletin of Moscow University. Series 3. Physics. Astronomy. – 2008. – № 6. – p. 54-56.
- [2] Tamm I.Y. Fundamentals of the theory of electricity. Moscow. FIZMALIT, 2003. – 616 p
- [3] Smythe W.R. Static and dynamic electricity. Moscow. 1954. – 606p.
- [4] Gerasimenko T.N. The use conformal transformations to calculate the distribution of currents, temperatures and magnetic fields of two-dimensional conductors. diss.: 01.04.02. – Moscow, 2012. 144p.
- [5] Getman.A.V., Konstantinov A.V.: «Cylindrical harmonics of magnetic field of a uniformly magnetized cylinder»//Electrical and electromechanical.-2011.-№5.-p.51-53.
- [6] Engel-Herbert R. and Hesjedal T., Calculation of the magnetic stray field of a uniaxial magnetic domain. // J. Appl. Phys, 97, 074504 (2005).

Моделирование систем теплоснабжения с помощью программного модуля ANSYS FLUENT

Д.А. Долинин, доц., Н.В. Кувшинов, студ.
ИГЭУ
Иваново, Российская Федерация
tevp@tvp.ispu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты математического моделирования систем теплоснабжения в программном модуле ANSYS Fluent и их сравнение с данными, полученными в ходе ручных расчетов. Результаты моделирования на базе программного комплекса ANSYS также могут быть использованы для разработки лабораторных работ по курсам «Техническая термодинамика», «Гидрогазодинамика», «Нагнетатели и тепловые двигатели», «Энергетические системы обеспечения жизнедеятельности»

Ключевые слова — моделирование; теплоснабжение

Modeling of heat supply systems by means of the program ANSYS FLUENT

D. A. Dolinin, associate professor, N. V. Kuvshinov, student.
ISPU
Ivanovo, Russian Federation
tevp@tvp.ispu.ru

Abstract. In this scientific work results of mathematical modeling of systems of heat supply in the program ANSYS Fluent module and their comparison with the data obtained during manual calculations are presented. Results of modeling on the basis of the program ANSYS complex can be also used for development of laboratory works on the courses "Technical Thermodynamics", "Hydraulic gas dynamics", "Superchargers and Heat Engines", "Power Systems of Ensuring Activity"

Keywords — modeling; heat supply

I. Введение

Отопление — одна из ключевых систем жизнеобеспечения любого жилого помещения, будь то квартира или частный дом. В зависимости от требуемых условий есть несколько видов отопления. Для индивидуального жилого дома чаще всего рассматривают автономное устройство отопительной системы. В многоквартирных домах пока преобладает централизованное отопление, но его устройство должно быть предметом не менее пристального внимания. Например, одним из ключевых элементов централизованной системы теплоснабжения (Рис. 1) является элеваторный узел. Масштабное использование элеваторов заставляет обратить внимание на эффективность, энергосбережение и экономическую целесообразность данного элемента системы теплоснабжения.

Элеватор — это водосмесительная установка, которая применяется для подачи горячей воды в систему теплоснабжения зданий и выравнивания температуры путем смешения с обратной водой. Различают элеватор водоструйный и элеватор пароструйный. Водоструйный элеватор устанавливается на участке тепловой сети для снижения температуры горячей воды, подаваемой в местные системы отопления, путем смешивания ее с обратной водой в смешивающей камере, и создает напор, необходимый для циркуляции.

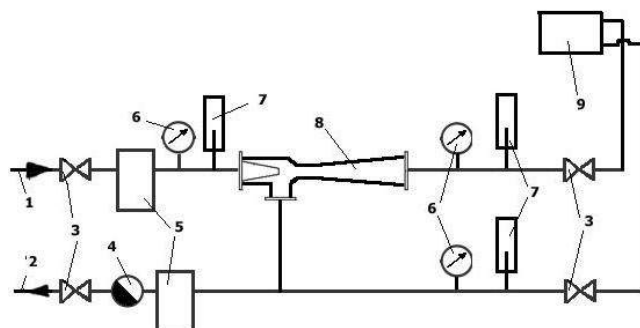


Рис. 1. Схема теплового пункта: 1 — подающий трубопровод; 2 — обратный трубопровод; 3 — задвижки; 4 — водомер; 5 — грязевики; 6 — манометры; 7 — термометры; 8 — элеватор; 9 — нагревательные приборы отопительной системы

Несмотря на все достоинства элеваторов, такие как низкая стоимость, простота и устойчивость работы при изменении теплового и гидравлического режимов, у них также имеются и недостатки. Например, недостаточная подача тепла в радиаторы, а также невозможность автоматической регулировки элеваторных узлов являются основными причинами проведения исследований и испытаний, введения улучшений и разработок модификаций в данной области.

Постоянное совершенствование компьютерных технологий сделало возможным использование программных пакетов для моделирования различных гидро- и газодинамических процессов. Современный уровень развития методов вычислительной гидродинамики позволяет решать с достаточной

точностью многие практические задачи. Задача анализа гидравлического сопротивления и регулирования отдельных конструктивных элементов теплоснабжения, а также систем теплоснабжения может быть решена с помощью комплекса вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent.

ANSYS Fluent – это современный программный комплекс, позволяющий проводить анализ широкого спектра промышленных задач динамики жидкости и газа в многофазных реагирующих потоках с учётом теплообмена всех видов (теплопроводность, конвекция и радиация) в стационарной и нестационарной постановке. Посредством обеспечения различных параметров моделирования и использования многосеточных методов с улучшенной сходимостью он обеспечивает оптимальную эффективность и точность решения для широкого диапазона моделируемых скоростных режимов. Изобилие физических моделей позволяет точно предсказывать ламинарные и турбулентные течения, различные режимы теплопереноса, химические реакции, многофазные потоки и многое другое на основе гибкости сеток и их адаптации на основе получаемого решения. Fluent характеризуется технологией моделирования, развитой для нерегулярных сеток, что даёт возможность работать с произвольной геометрией с огибающими кривыми, наклонными плоскостями и другими сложными поверхностями как в реальности. Возможность точно отрегулировать сетку в критических областях улучшает качество моделирования. Программное обеспечение Fluent интерактивно, что позволяет изменять точность численного анализа на любой стадии процесса, а значит экономить время и эффективно совершенствовать разрабатываемую модель.

II. Создание геометрии в системе автоматизированного проектирования SolidWorks.

Цель в данной работе – это исследование на математической модели работы элеваторного узла. В качестве объекта исследования был выбран стандартный водоструйный элеваторный узел «40с10бк №4». В зависимости от расхода по воде существует несколько вариантов (номеров) элеваторов. Внутренний диаметр входных сечений 50 мм, выходного 80 мм. Диаметр эжектирующего сопла 7 мм. Приблизительный расход 3 – 5 тонн воды в час.

Для решения задачи была построена трехмерная геометрическая модель области течения жидкости в масштабе 1:1 в пакете Solid Works (Рис. 2).



Рис. 2. Элеватор.

Для более точного расчета было принято решение продлить длину трубы на входе горячей воды и на выходе смешанного потока (Рис. 3).

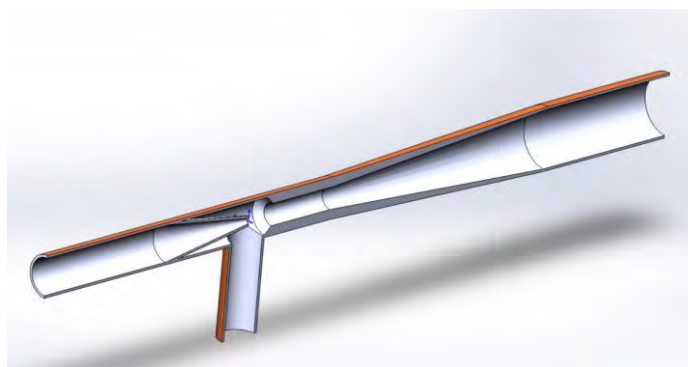


Рис. 3. Трехмерная геометрическая модель элеваторного узла

Двухмерный чертеж элеватора представлен на Рис. 4.

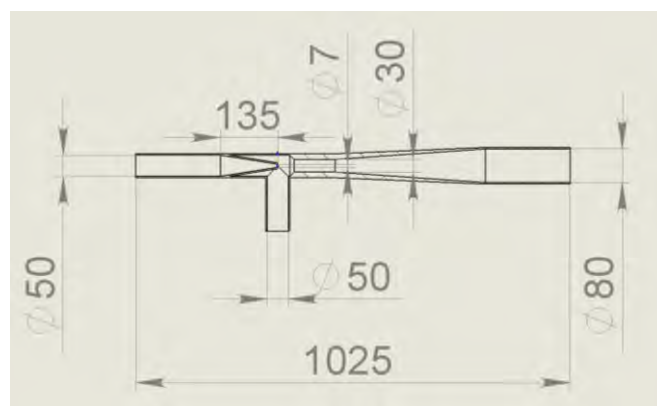


Рис. 4. Чертеж элеватора

III. Построение расчетной области в DesignModeler.

Элеватор строился в пакете SolidWorks в естественном виде (как он «есть в металле»). Для расчета необходимо выделить только область течения жидкости. Построение данной области «напрямую» является трудоемкой задачей при наличии сложной геометрии. Благодаря,

совместимости пакетов SolidWorks и DesignModeler, был осуществлен перенос трехмерной геометрической модели в DesignModeler (Рис. 5), где данная задача была решена с помощью функции Fill (заполнение объемом полый области). Далее был подавлен слой металла (Рис.6) и даны названия поверхностям входов и выхода.

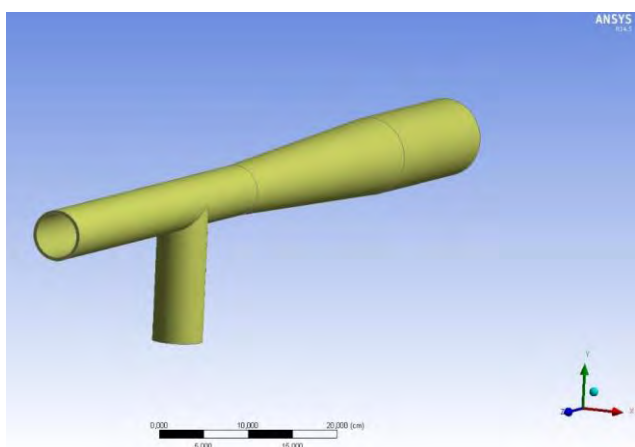


Рис. 5. Элеваторный узел в DesignModeler

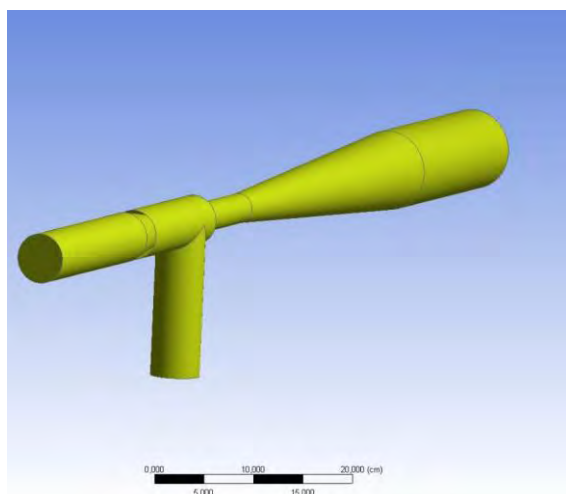


Рис. 6. Область течения жидкости в элеваторном узле

Расчетная сетка строилась в редакторе Meshing (Рис. 7).

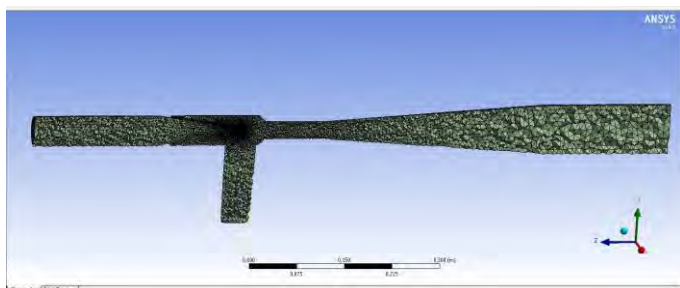


Рис. 7. Расчетная сетка в элеваторном узле.

Измельчение сетки в районе сопла производилось автоматически (рис. 8).

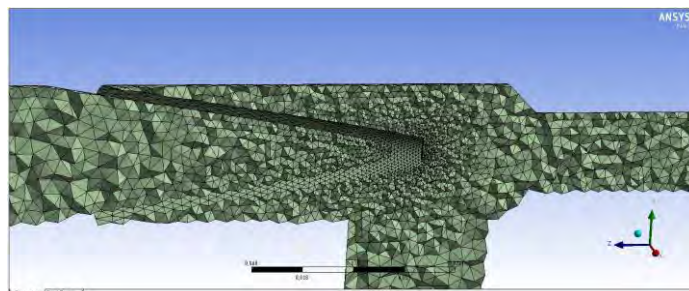


Рис. 8. Расчетная сетка в области сопла

IV. Задание граничных условий в модуле Fluent.

Расчеты производились в модуле Fluent. Задачи решались в стационарной постановке. На входах в расчетную область задаются скорости, температуры и расходы потоков (Рис. 9). На остальных поверхностях расчетной области автоматически задается условие гидравлически гладкой изотермической стенки. Использовалась стандартная К-ε модель турбулентности с пристеночными функциями. Была учтена гравитация. Число Рейнольдса $Re = 34700$. Использовалась дискретизация 2-ого порядка для всех заданных параметров, а также производилась инициализация. Производилась проверка массового и теплового балансов.

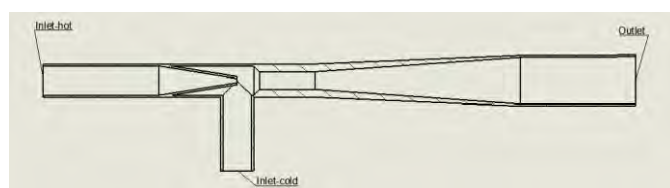


Рис. 9. Двумерная схема элеваторного узла

Inlet-hot(вход горячей воды):
 $t=150^{\circ}\text{C}$; $p=5$ бар (500000 Па); $Q=1$ т/ч; интенсивность турбулентности 1,5%.

Inlet-cold(вход холодной воды):
 $t=70^{\circ}\text{C}$; $p=3$ бар (300000 Па); $Q=3$ т/ч; интенсивность турбулентности 1,5%.

Outlet(выход):
 $t=90^{\circ}\text{C}$; $Q=4$ т/ч.

V. Визуализация результатов.

Построено продольное сечение элеватора для более наглядного представления изменения параметров: температуры воды на выходе, распределения скоростей (Рис. 12), температур (Рис. 10) и давлений (Рис. 11), эффективности смешения в расчетной области.

VI. Заключение.

Построенная модель показала высокую эффективность и точность использования комплекса ANSYS. Полученная модель является адекватной для оценки эффективности работы элеватора. Она помогает быстро и наглядно смоделировать движение жидкости с учетом внесенных в геометрию изменений. Таким образом, модель может применяться для оптимизации конструкции элеваторного узла. Планируется использовать наработки для расчета систем отопления зданий. Результаты моделирования на базе программного комплекса ANSYS также могут быть использованы для разработки лабораторных работ по курсам «Техническая термодинамика», «Гидрогазодинамика», «Нагнетатели и тепловые двигатели», «Энергетические системы обеспечения жизнедеятельности».

Список литературы

- [1] ГОСТ 8732-78 «Трубы стальные бесшовные горячедеформированные»
- [2] Применение методов вычислительной гидродинамики при проектировании теплообменного оборудования / М.А. Большухин, Д.Н. Свешников, Н.Л. Люкина, Е.А. Солунина // ANSYS Advantage. Русская редакция. – 2010. - №13. С. 23-25.
- [3] Использование средств компьютерного моделирования в курсах механики жидкости и газа: Учебно-методическое пособие / Кондратин Т.В., Ткаченко Б.К., Березникова М.В. и др. -М.:МФТИ, 2005. -112 с.
- [4] Бруяка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособ. – В.А Бруяка, В.Г. Фокин, Я.В. Кураева. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.
- [5] SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский [и др.] СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 800 с.
- [6] Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справ. пособие. М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с.
- [7] Moaveni, S. Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS / S. Moaveni // Pearson Prentice Hall, 2008. – 860 p.

Интернет-ресурсы:

<http://www.cadferm-cis.ru>

References

- [1] GOST 8732-78 "Pipes steel seamless hot-rolled"
- [2] Application of methods of computing hydrodynamics at design of the heatexchange equipment / M. A. Bolshukhin, D. N. Sveshnikov, N. L. Lyukina, E.A. Solunina//ANSYS Advantage. Russian edition. – 2010. - No. 13. Page 23-25.
- [3] Use of means of computer modeling in courses of mechanics of liquid and gas: Educational and methodical grant / Kondratin of T.V., Tkachenko B. K., Bereznikova M. V., etc. - M.: MIPT, 2005.-112 p.
- [4] Bruyaka V.A. The engineering analysis in ANSYS Workbench: studies. a grant – V.A Bruyaka, V. G. Fokin, Ya.V. Kurayeva. – Samara: Samar. the state. technical un-t, 2013. – 149 p.
- [5] SolidWorks. Computer modeling in engineering practice / A. A. Alyamovsky [etc.] SPb.: BHV-St. Petersburg, 2005. 800 p.
- [6] Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smalyuk A.F. ANSYS for engineers: Handbook. M.: Mechanical engineering-1, 2004. 512 p.
- [7] Moaveni, S. Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS/S. Moaveni//Pearson Prentice Hall, 2008. – 860 p.

Internet resources:

<http://www.cadferm-cis.ru>

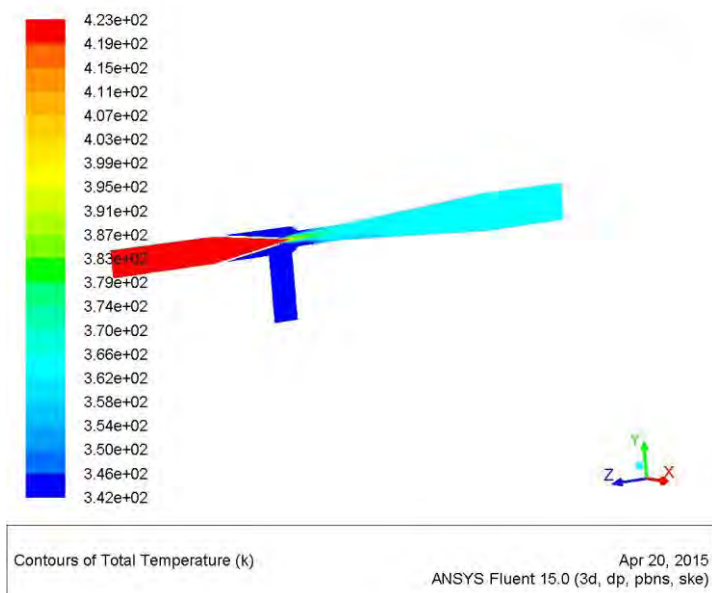


Рис. 10. Распределение температур по сечению

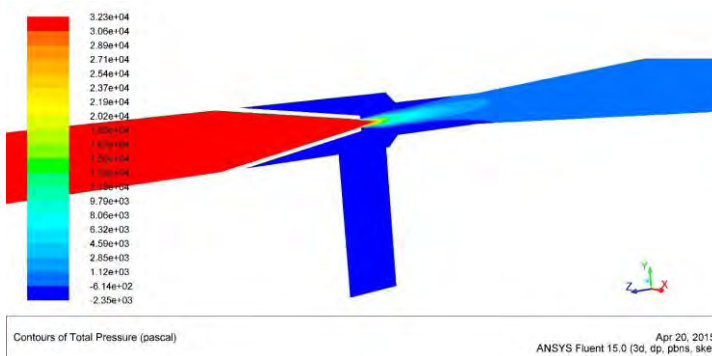


Рис. 11. Распределение полных давлений по сечению

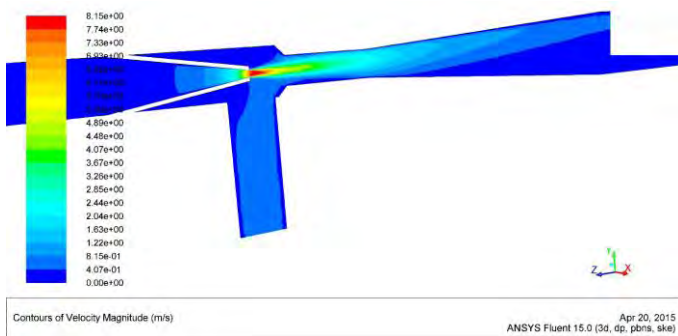


Рис. 12. Распределение скоростей по сечению

Для верификации полученной математической модели были произведены расчеты скорости истечения через сопло и расчет смешения потоков. Так, расчетная скорость истечения через сопло $7,2222\text{ м/с}$, скорость истечения в ANSYS – $7,3335\text{ м/с}$; расчетная температура воды на выходе элеватора – 363 К , результат расчета в ANSYS – $362,989\text{ К}$. Сравнение результатов дало погрешность менее $1,5\%$, что свидетельствует о высокой адекватности модели.

III. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Электрические системы
- Электроснабжение
- Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем
- Электротехника и электротехнологии
- Электрооборудование и режимы электрических станций и подстанций
- Высоковольтная электроэнергетика, электротехника и электрофизика

К вопросу о грозоупорности ультракомпактных воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ

Г. В. Власов, науч. рук. Ю. А. Лавров к.т.н., доц.
Новосибирский Государственный Технический Университет
г. Новосибирск, Россия
grisha.vlasov92@gmail.com

Аннотация — Рассматриваются особенности повышения грозоупорности ультракомпактной воздушной линии электропередачи напряжением 110 кВ. Сформулированы предварительные требования, позволяющие повысить грозоупорность линии с использованием линейных защитных аппаратов.

Ключевые слова — грозоупорность, линейный защитный аппарат, ультракомпактная воздушная линия электропередачи, композитная опора, заземляющее устройство.

On the question of lightning-surge proofness 110 kV ultracompact overhead power lines

Grigorij Vlasov, Sci. Adv. Jurij Lavrov
Novosibirskij Gosudarstvennyj Tehnicheskij Universitet
Novosibirsk, Russia
grisha.vlasov92@gmail.com

Abstract — Lightning-surge proofness increase features of 110 kV ultra-compact overhead transmission line are considered. preliminary requirements that increase lightning-surge proofness of overhead transmission line using linear protective devices are formulated.

Keywords — lightning-surge proofness, line protection devices, ultra compact overhead power line, composite support, grounding device.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все больше внимания уделяются внедрению в отечественный электросетевой комплекс так называемых ультракомпактных воздушных линий (УКВЛ) электропередачи напряжением 110 кВ, сооружение которых должно осуществляться с применением следующих инновационных технических решений:

- узкобазовых конструкций быстромонтируемых опор из полимерных композитных материалов;
- изолирующих траверс с нормированной жесткостью их крепления к стойке опоры;
- самонесущих изолированных проводов (СИП) с повышенными параметрами на растяжение и по рабочей температуре;
- современной концепции повышения грозоупорности ВЛ;
- прогрессивных фундаментных решений по закреплению композитных опор (КО) в грунтах с различными физико-механическими характеристиками.

II. ВАРИАНТЫ ОРГАНИЗАЦИИ ГРОЗОЗАЩИТЫ УЛЬТРАКОМПАКТНОЙ ВЛ

Конструктивные параметры КО определяются, в том числе, и необходимостью обеспечения нормируемой грозоупорности ВЛ. При организации грозозащиты линии необходимо учитывать специфику УКВЛ - применение изолированных опор (либо комбинации изолированных и заземленных опор) и изолированных проводов типа СИП-7. На рис.1 приведены различные варианты организации грозозащиты УКВЛ для выявления наиболее эффективного и применены следующие обозначения: А – анкерная опора, $i_m(t)$ – ток молнии, U_b – волна напряжения, R_{zu} – сопротивлению заземляющего устройства опоры.

Вариант №1

Вариант, приведенный на рис.1,а отвечает случаю отсутствия грозозащитного троса и применения на всем анкерном пролете (длиной около 2,0-2,5 км)

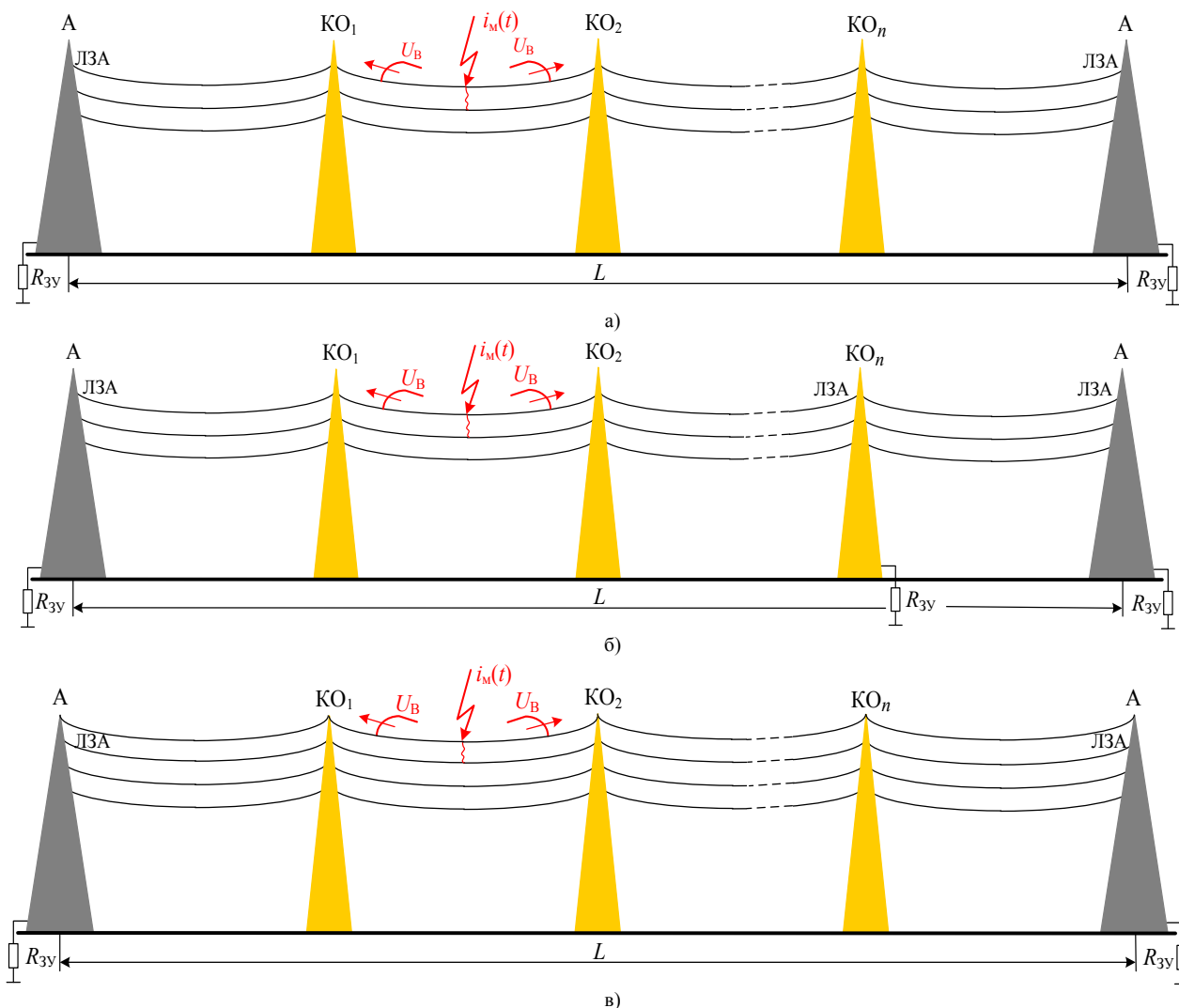


Рис. 1. К анализу различных вариантов организации грозозащиты УКВЛ напряжением 110 кВ

промежуточных композитных опор с использованием их изоляционных свойств (опоры не заземлены) и изолирующей арматуры.

В этом случае предполагается установка линейных защитных аппаратов (ЛЗА) на анкерных стальных опорах, которые должны привести к снижению потенциала импульсной волны в точке грозового поражения изолированного провода для предотвращения межфазного перекрытия и, как следствие, отключения ВЛ при двухфазном КЗ. Однако эффективность ЛЗА в рассматриваемом случае будет наблюдаться только при грозовом поражении ВЛ на расстоянии (в зависимости от крутизны токов молнии) двух-трех пролетов от анкерной опоры. При грозовом поражении ВЛ в середине анкерного пролета ($L/2$, рис.1,а) отключение линии в аварийном режиме двухфазного короткого замыкания неизбежно. При этом следует отметить следующие негативные моменты рассматриваемого случая:

- во-первых, в отличие от ВЛ с применением стальных опор за счет обратных перекрытий с тела опоры на провод (при грозовом поражении в опору) или при импульсном перекрытии с провода на опору (при ударе молнии в провод) возникает однофазное короткое замыкание, которое отключает линейный выключатель, при использовании же диэлектрических опор возникает

двухфазное КЗ, т.е. работают на отключение КЗ уже два линейных выключателя;

- во-вторых, при грозовом поражении изолированного провода условия горения импульсной дуги тока молнии будут несколько тяжелее по отношению к проводу типа АС, поскольку более интенсивно будет локально выгорать алюминиевый сплав провода (несущий механическую нагрузку), в то время как у провода типа АС стальная (несущая) компонента не повреждается;

- в-третьих, при двухфазном КЗ энергия, выделяемая в месте горения дуги на двух изолированных проводах, будет больше по отношению к случаю выделения энергии при грозовом поражении провода, за счет значительных величин токов КЗ и времени горения дуги, обусловленного временем срабатывания релейной защиты (0,4-0,6 с).

Таким образом, вариант организации грозозащиты УКВЛ напряжением 110 кВ согласно рис.1,а имеет определенные недостатки. Вместе с тем, вариант применения диэлектрических опор на анкерном участке имеет право на «жизнь», если принять во внимание следующие моменты:

- рассматриваемый вариант УКВЛ наименее затратный, поскольку, во-первых, не требует сооружения заземляющего устройства на нескольких композитных опорах на анкерном пролете и, во-вторых, нет грозоторса;

- при уменьшении величины охранной зоны для УКВЛ с 20,0 м до 5,0 м и при прохождении трассы УКВЛ в городских условиях или лесных массивах за счет эффекта экранировки резко уменьшается вероятность грозовых поражений линии;

- применяется изолированная арматура для крепления СИП к изолированным траверсам.

А. Вариант №2

Вариант, приведенный на рис.1,б отвечает случаю отсутствия грозозащитного троса, но с применением на всем анкерном пролете промежуточных композитных опор с комбинированным использованием их изоляционных свойств (несколько опор заземлены, которые устанавливаются через определенное количество незаземленных опор) и установкой ЛЗА на заземленных опорах. Очевидно, что в этом случае при оптимальной скважности установки ЛЗА не будет одно (двух) – фазных КЗ и, как следствие, грозовых отключений УКВЛ, что дает определенные преимущества по отношению к варианту УКВЛ рис.1.а. Но рассматриваемый вариант имеет следующие недостатки:

- остается грозовое поражение незащищенного изолированного провода;
- необходимо применять неизолированную арматуру крепления провода к траверсе;
- увеличивается стоимость определенного количества КО за счет установки на них внутренних заземляющих спусков в стойке опоры и заземляющих устройств.

В. Вариант №3

Вариант, приведенный на рис.1,в отвечает случаю установки на УКВЛ грозотроса и применения на всем анкерном пролете промежуточных композитных опор с использованием их изоляционных свойств (опоры не заземлены). В этом случае уменьшается на два-три порядка вероятность грозового поражения изолированного провода, но установка ЛЗА на тросах анкерных опор не исключает случаи импульсного перекрытия с грозотроса на провод при ударе молнии в середине пролета. Эффективно ЛЗА будут «работать» при ударах молнии в грозотрос на расстоянии трех-четырех пролетов от анкерных опор, т.е. примерно половина анкерного пролета с точки зрения грозового поражения троса будет опасна для УКВЛ.

Можно рассмотреть вариант организации грозозащиты УКВЛ напряжением 110 кВ, сочетающий в себе выше отмеченные моменты, например применение грозотроса и ЛЗА на анкерных опорах и части КО в анкерном пролете.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для оценки электрической прочности изоляционных промежутков были рассчитаны ВСХ для воздушных промежутков: провод-провод ($S = 1.5$ м) и грозотрос провод ($S = 2.7$ м). Расчеты выполнялись согласно эмпирической формуле 50%-ных разрядных напряжений стержневых промежутков в воздухе из [1].

$$U_p = 4,95S(1 + 2,34/t) \quad (1)$$

Расчетные осциллограммы грозовых перенапряжений сравнивались с полученными значениями ВСХ изоляции.

Для оценки оптимальной скважности установки ЛЗА для варианта грозозащиты изображенного на рис 1, б была создана модель одноцепной ВЛ без грозотроса. Волновые и первичные параметры линии были рассчитаны в прикладном пакете simulink. Модель рис. 2., созданная в программе схемотехнического моделирования PSpice, позволяла варьировать расстояние от места удара молнии до ближайших ЛЗА (на каждой опоре, через одну опору). Импульс тока, принятый в расчетах, имел параметры $I_m = 25$ кА, $\tau_f/\tau_n = 1,2/50$. Расчетный пролет 220 м, удар молнии приходится в середину пролета.

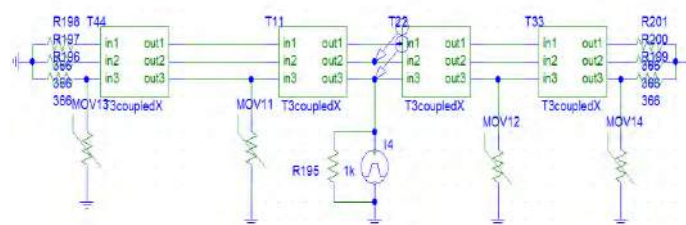


Рис. 2. Модель для расчета грозовых перенапряжений на УКВЛ с установленными ЛЗА.

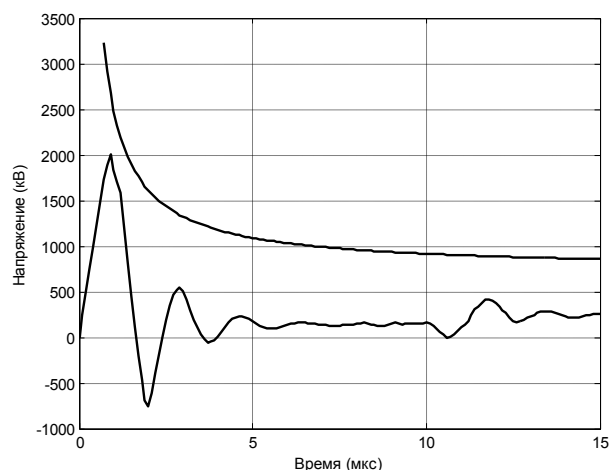


Рис. 3. Осциллограмма напряжения между проводами при ударе молнии в провод, ЛЗА установлены на каждой опоре.

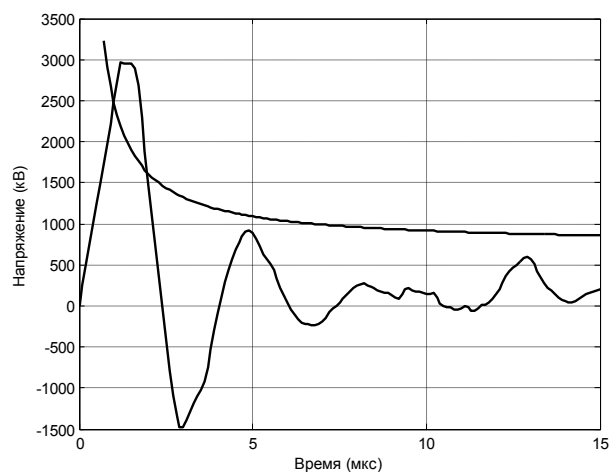


Рис. 4. Осциллограмма напряжения между проводами при ударе молнии в провод, ЛЗА установлены через одну опору.

В результате моделирования было получено, что при установке ЛЗА через одну опору импульс напряжения успевает превысить ВСХ изоляционного промежутка провод-провод, а значит данный вариант грозозащиты

УКВЛ возможен лишь при установке защитных аппаратов на каждой опоре.

Для варианта грозозащиты изображенного на рис 1, в была создана модель четырехпроводной линии, волновые и первичные параметры которой были рассчитаны в прикладном пакете simulink по существующей геометрии композитной опоры. Модель рис. 5., созданная в программе схемотехнического моделирования PSpice, позволяла варьировать расстояние от места удара молнии в трос до ближайшего заземляющего спуска (на каждой опоре, через одну опору, через две опоры). Импульс тока, принятый в расчетах, имел параметры $I_M = 25$ кА, $\tau_f/\tau_n = 1,2/50$ мкс. Расчетный пролет 220 м, удар молнии приходится в середину пролета.

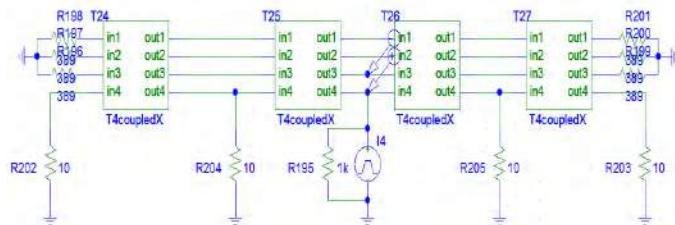


Рис. 5. Модель для расчета грозовых перенапряжений на УКВЛ с применением грозотроса.

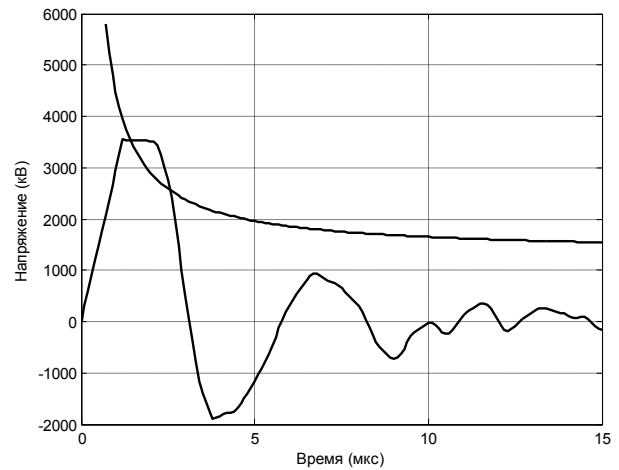


Рис. 5. Осциллограмма напряжения между грозотросом и проводом при ударе молнии в провод, заземление грозотроса выполнено через две опоры.

В результате было получено, что при заземлении грозотроса через одну опору импульс напряжения не превышает ВСХ изоляционного промежутка трос – провод. А значит использование такого варианта грозозащиты является возможным.

IV. ИТОГИ

На данном этапе исследований наиболее предпочтительным вариантом исполнения грозозащиты УКВЛ является установка грозозащитного троса с его заземлением через опору на промежуточных опорах и на всех анкерных опорах.

Очевидно, что окончательный вариант организации грозозащиты УКВЛ будет определяться на основе технико-экономического сравнения применения различных мер, приводящих к нормируемому показателю грозового отключения ВЛ напряжением 110 кВ.

Задачами дальнейших исследований являются:

- Уточнение электрической прочности изоляционных промежутков УКВЛ.
- Расчет электромагнитного фона вблизи трассы ВЛ.
- Проведение более детальных численных исследований по оптимизации схемы грозозащиты УКВЛ.

В процессе разработки УКВЛ могут быть изменены характеристики СИП на напряжение 110 кВ, а также конструктивные параметры композитных опор, например высота подвеса грозозащитного троса. Данный фактор должен быть учтен в будущей работе.

Список литературы

- [1] Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под ред. И. А. Баумштейна, С. А. Бажанова. – 3-е изд., перераб. И доп.- М.: Энергоатомиздат, 1989. – 768 с.: ил.

References

- [1] Spravochnik po jelektricheskim ustanovkam vysokogo naprjazhenija / Pod red. I. A. Baumshtejna, S. A. Bazhanova. – 3-e izd., pererab. I dop.- M.: Jenergoatomizdat, 1989. – 768 s.: il.

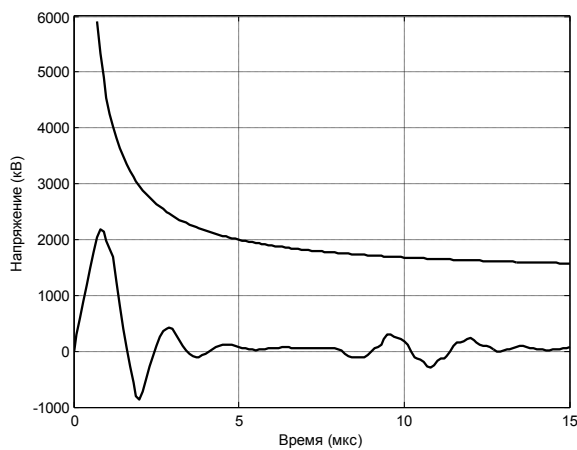


Рис. 4. Осциллограмма напряжения между грозотросом и проводом при ударе молнии в провод, заземление грозотроса выполнено на каждой опоре.

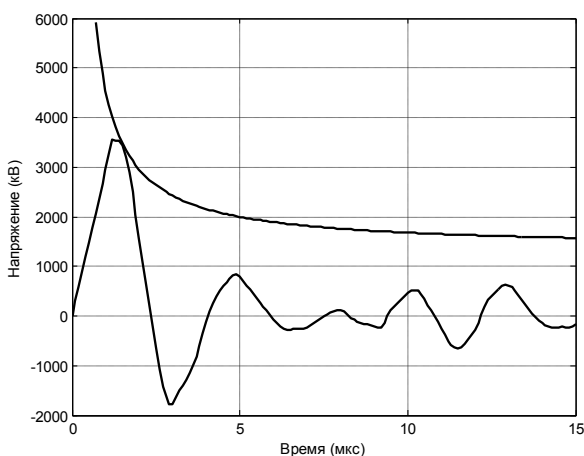


Рис. 5. Осциллограмма напряжения между грозотросом и проводом при ударе молнии в провод, заземление грозотроса выполнено через опору.

Исследование устойчивости ветро-дизельной электростанции

Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, И.А. Липужин, А.А. Смирнов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

lipuzhin.ivan@yandex.ru

Аннотация — одной из проблем, связанных с параллельной работой нетрадиционных источников энергии на общую нагрузку, является сохранение устойчивого режима работы системы. Потеря устойчивости может привести к нарушениям электроснабжения потребителей и технико-экономическим ущербам. В статье рассматриваются условия обеспечения устойчивости ветро-дизельной электростанции на основе сохранения балансов активной и реактивной мощности в системе.

Ключевые слова — ветро-дизельная электростанция; устойчивость; критерии; балансовая надежность

Stability investigation of wind-diesel power plant

E.N. Sosnina, A.V. Shalukho, I.A. Lipuzhin, A.A. Smirnov

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

lipuzhin.ivan@yandex.ru

Abstract — one problem associated with parallel operation of alternative energy sources for the load is to maintain stable operation of the system. Loss of stability can lead to violations of consumer power and technical and economic damage. In the article the conditions for ensuring the stability of wind-diesel power plant on the basis of preserving the balance of active and reactive power in the system are described.

Keywords — wind-diesel power plant; stability; criterion; balance reliability

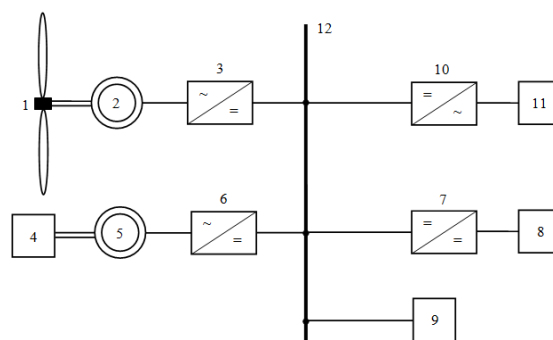
I. ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования — локальная система электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией (ВДЭС). Ветроэлектрическая установка и дизель-генератор подключаются к нагрузке по схеме с шиной постоянного тока (Рис. 1). Двойное преобразование электроэнергии позволяет снизить влияние источников энергии друг на друга и обеспечить потребителя электроэнергией требуемого качества [1].

II. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ

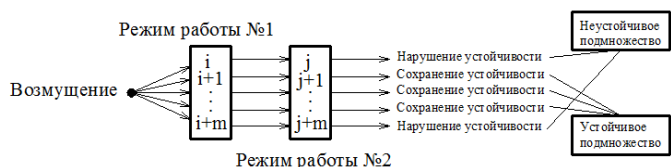
Возмущения системы (изменение скорости ветра, включение/отключение части нагрузки и т.п.) ведут к изменению режима работы ВДЭС, что может повлечь нарушение устойчивости системы [2].

Все многообразие возмущений можно разделить на два непересекающихся подмножества. Если после кратковременного возмущения система сохранит нормальный режим работы, то она устойчива. Такой режим принадлежит к устойчивому подмножеству. Если система не восстанавливает нормальный режим — она не



1 — ветротурбина; 2 — синхронный генератор на постоянных магнитах; 3, 6 — выпрямители; 4 — дизельный двигатель; 5 — синхронный генератор; 7 — контроллер заряда; 8 — аккумуляторная батарея; 9 — балластная нагрузка; 10 — автономный инвертор; 11 — потребители 220/380В; 12 — шина постоянного тока.
Рис. 1. Блок-схема ВДЭС.

устойчива. Совокупность таких режимов составляет неустойчивое подмножество (Рис. 2).



Режим работы №1 – начальное состояние системы до возмущения, режим работы №2 – состояние системы после возмущения

Рис. 2. Алгоритм анализа воздействия малых возмущений.

Вероятность нарушения устойчивости системы – вероятность появления аварийной ситуации в неустойчивом подмножестве [3].

Условием обеспечения устойчивости является сохранение балансов активной и реактивной мощности системы:

$$\begin{aligned} P_V + P_D \pm P_A &= P_N + P_{бн}; \\ Q_V + Q_D \pm Q_A &= Q_N, \end{aligned} \quad (1)$$

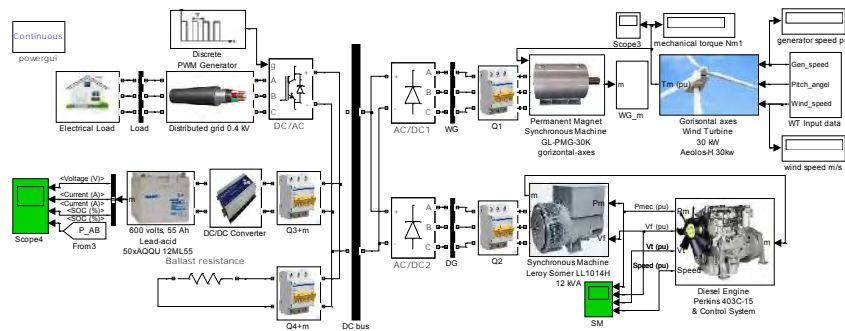


Рис. 2. Общий вид имитационной модели ВДЭС.

IV. ВЫВОДЫ

Выявление возмущений, приводящих к нарушению устойчивости, позволит разработать ряд мероприятий, направленных на уменьшение неустойчивого подмножества режимов, и провести технико-экономическую оценку затрат на данные мероприятия.

Список литературы

- [1] Баранов Н.Н., Крюков К.В. Расширение функциональных возможностей нетрадиционных источников энергии при их работе в автономных режимах и совместно с сетью. Доклад. Международный форум «Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности REENFOR-2014». – Москва. - 10-11 ноября 2014 г.
- [2] Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Анисимов С.А., Липужин И.А., Смирнов А.А. Исследование устойчивости электротехнических комплексов с ветродизельными электростанциями // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - Нижний Новгород, 2015. – № 1 (108). – С. 203-208.
- [3] Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
- [4] Повышение эффективности и устойчивости локальной системы электроснабжения на основе оптимизации работы гибридного источника энергии с ветрогенератором. Этап 1. Выбор направления исследований. Теоретические исследования повышения эффективности и устойчивости локальных систем электроснабжения с ветро-дизельными электростанциями (ВДЭС). Промежуточный отчет о прикладных научных исследованиях. Шифр 2014-14-576-0050-072. Соглашение о предоставлении

где, P, Q – активная и реактивная мощности; v – ветроустановка, d – дизель-генератор, a – аккумуляторная батарея, n – нагрузка, $бн$ – балластная нагрузка.

Предлагаемый подход к решению задачи устойчивости (1) основан на анализе большого числа реакций исследуемой системы на возмущения. Использование численных методов потребует сложных и длительных вычислений. Имитационное моделирование и статистическая обработка его результатов позволяют получить полноценную картину реакций системы на возмущения, а анализ причин нарушения устойчивости - классифицировать возмущения по характеру их возникновения.

III. ИМИТАЦИОННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ

Модель разработана на графическом языке программирования *Simulink*. Она состоит из четырех основных блоков: ВДЭС, распределительной электрической сети, комплексной нагрузки и измерительных устройств [4]. Общий вид, без блоков измерительных устройств, представлен на Рис. 3.

субсидии № 14.574.21.0009 от 17.06.2014 Н.Новгород: НГТУ, 2014. – 157 с. - №ГП 114101670043.

References

- [1] Baranov, N.N., Krjukov, K.V. *Rasshirenie funkcional'nyh vozmozhnostej netradicijnyh istochnikov jenerгии pri ih rabote v avtonomnyh rezhimah i sovместно s set'ju* [Expanding the functionality of alternative energy sources when working offline and in conjunction with the network]. Доклад. Mezhdunarodnyj forum «Vozobnovljaemaja jenergetika. Puti povыshenija jenergetičeskoj i jekonomičeskoj jeffektivnosti REENFOR-2014», Moscow, November 10-11, 2014.
- [2] Sosnina, E.N., Shalukho, A.V., Anisimov, S.A., Lipuzhin, I.A., Smirnov, A.A. Research of stability of electrotechnical complexes with wind-diesel power plants // Transactions of Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev / NSTU n.a. R.E. Alexeev. – Nizhni Novgorod, 2015, № 1 (108), pp. 203-208.
- [3] Venikov, V.A. *Perehodnye jelektromehaničeskie processy v jelektрических системах* [Transitional electromechanical processes in electrical systems], Moscow: Vysshaja shkola, 1985, 536 p.
- [4] *Povyshenie jeffektivnosti i ustojčivosti lokal'noj sistemy jelektrosnabženija na osnove optimizacii raboty gibridnogo istočnika jenerгии s vetrogeneratorom. Jetap 1. Vybor napravlenija issledovanij. Teoretičeskie issledovanija povыshenija jeffektivnosti i ustojčivosti lokal'nyh sistem jelektrosnabženija s vetro-dizel'nyimi jelektrostancijami (VDJeS)* [Improving the efficiency and sustainability of the local power supply system based on the optimization of the hybrid energy source with a wind generator. Step 1: Select the direction of research. Theoretical studies of improving the efficiency and stability of local power systems with wind-diesel power plants (WDPP)] Promezhutochnyj otchet o prikladnyh nauchnyh issledovanijah. Shifr 2014-14-576-0050-072. Soglasenie o predostavlenii subsidii № 14.574.21.0009 ot 17.06.2014 N.Novgorod: NGTU, 2014, 157 p., №GR 114101670043.

Разработка программного интерфейса к лабораторной работе "методы оперативного контроля короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя"

А.М. Захаров
ИГЭУ им. Ленина
Иваново, Россия

Практическое изучение методов оперативного контроля электрооборудования является неотъемлемой частью учебного процесса инженеров (а также бакалавров и магистров) электроэнергетических специальностей. В данной статье подробно описывается одна из лабораторных работ по контролю состояния обмоток ротора асинхронных электродвигателей, и разработанному специально для нее программному интерфейсу. Руководитель работы - Скоробогатов Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры "Электрические станции, подстанции и диагностика электрооборудования". Им и его ассистентам на базе малоомощного двигателя был создан лабораторный стенд, который позволяет получить необходимую информацию о процессах, происходящих внутри электродвигателя (ЭД). Для обработки данных и проведению оценок о техническом состоянии обмотки ротора ЭД студентом 5 курса ИГЭУ Захаровым А.М. был разработан соответствующий интерфейс. Во время проведения лабораторной работы предполагается выполнение контроля обмотки ротора двумя методами, в процессе которых студенты приобретают необходимые знания как и по физическим процессам внутри ЭД, так и по особенностям проведения оперативного контроля, что является неотъемлемой частью дисциплины "Диагностика электрооборудования".

Ключевые слова — асинхронный электродвигатель; оперативный контроль; программный интерфейс

Development of program interface for laboratory work "monitoring methods of squirrel-cage winding of induction motor"

Aleksey Zakharov
Ivanovo State Power University
Ivanovo, Russia

Studying of methods of electric equipment monitoring in practice is an integral part of educational process of the electrical power engineers (also bachelors and masters). This article describe laboratory work about monitoring of a rotor winding of induction motors, and the program interface developed especially for it. Skorobogatov Andrey Aleksandrovich, Cand.Tech.Sci., associate professor of the department "Electric power stations, substations and electrical equipment diagnostics" of the ISPU, is the project chairman. He and his assistants created the laboratory bench on the base of low-power electrical motor (EM). This bench allows to receive necessary information on the processes happening in EM. The appropriate interface for data handling and to carrying out estimates about technical condition of a rotor winding was developed by Aleksey Zakharov, the ISPU student. During laboratory work it is supposed to do monitoring of a rotor winding by two methods. In this process students acquire necessary knowledge both in physical process and in features of the monitoring, that is an integral part of the discipline "Diagnostics of electric equipment".

Keywords — induction motor; monitoring; program interface

I. ВВЕДЕНИЕ

Примерно 70% всех потребителей электроэнергии составляют электродвигатели. Они используются как в промышленности (крупной и малой), так и в жилищно-бытовом хозяйстве. Подавляющее большинство всех электроприводов - это класс асинхронных машин. Самое широкое распространение получили асинхронные двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора: из-за простоты конструкции, надежности в работе, небольших габаритах, низкой стоимости, несложного обслуживания.

Основная причина отказов электропривода - это недостатки эксплуатации ($\approx 35-50\%$ отказов).

В данной работе особое внимание уделяется отказам, связанным с повреждением стержней КЗ-обмотки ротора. Такие повреждения случаются из-за нарушения контакта в местах пайки стержня с короткозамкнутыми кольцами вследствие увеличения вибрации.

II. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Методы контроля ЭД [1] можно разделить на две группы Первая группа - ремонтные методы, которые

применяются на двигателях, выведенных в ремонт. Вторая группа - оперативные (функциональные) методы, которые применяются во время работы двигателя. Именно об этой группе методов далее пойдет речь.

Методы оперативного контроля можно разделить на методы, которые требуют установки датчиков внутри машины, и на методы, которые этого не требуют.

А. Методы, требующие установки датчиков внутри двигателя

- Способ, основанный на измерении величины магнитного потока вдоль периметра ротора, наводимого от каждого стержня [2].
- Способ, где роль диагностического признака играет изгиб выступающего из бочки ротора конца оборванного стержня [2].
- Высокочастотный метод, основанный на измерении величины высокочастотной составляющей магнитного поля в пространстве, окружающем ротор, наводимая колебаниями высокочастотных токов в дуге, которая возникает между концами оборванного стержня.

В. Методы, требующие установки датчиков снаружи двигателя

- Метод контроля, основанный на выделении определенного спектра частот вибрации корпуса.
- Способ, в котором в качестве диагностического признака принято отклонение скольжения от заданной величины при данной нагрузке на валу машины.

С. Методы, использующие штатные измерительные устройства - трансформаторы тока

- Метод, определяющий наличие обрыва стержней обмотки ротора по колебанию тока фазы с частотой скольжения асинхронного двигателя (АД). Данные колебания определяются по колебаниям стрелки амперметра (в нормальном режиме работы) либо по осциллограмме (в режиме пуска).
- Метод, основанный на спектральном анализе сигнала, в котором диагностическим параметром служит амплитуда пульсаций определенных гармоник фазного тока статора, а диагностическим признаком – их резкое возрастание при обрывах стержней.

Принципы и устройства контроля состояния обмотки ротора по глубине диагностирования можно разбить на два типа: дифференциальные и интегральные. Дифференциальные позволяют получить информацию о состоянии каждого стержня, т.е. о числе и взаимном расположении оборванных стержней, а интегральные устанавливают только наличие таковых и лишь качественно, с большой погрешностью способны оценить их количество.

Студенту предлагается выполнить контроль обмоток обоими способами, а результатом его работы будет отчет в электронном виде.

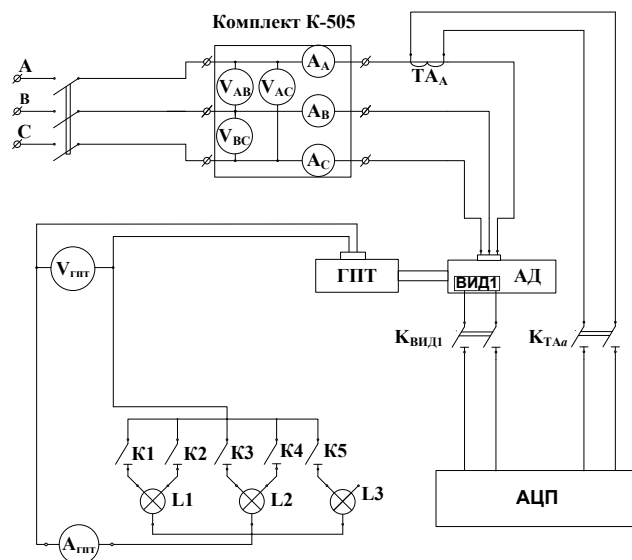


Рис. 1. Структурная схема стенда: АД – асинхронный двигатель; ГПТ – генератор постоянного тока; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ВИД – внутренний индуктивный датчик; K1÷K5 – тумблеры включения ламп накаливания; K_ВИД1 – тумблер включения датчика ВИД1; K_ТАА – тумблер включения трансформатора тока, установленного в фазе А

III. СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Вся работа состоит из двух частей. В первой студенты получают экспериментальные данные, во второй - занимаются их обработкой и анализом.

А. Экспериментальная часть

Схема лабораторного стенда представлена на рис. 1.

Объектом исследования является трехфазный асинхронный ЭД ЗВР71-2 мощностью 250 Вт с частотой вращения 2880 об/мин. Нагрузка на валу двигателя создается двенадцати вольтовым генератором постоянного тока, к которому подключаются 3 лампы накаливания. Величину нагрузки можно изменять с помощью тумблеров. В исследуемый ЭД может быть установлен (по заданию преподавателя) один из трех роторов с различным количеством оборванных стержней у каждого. Первый ротор имеет один оборванный стержень, второй ротор имеет два оборванных стержня, а третий ротор имеет исправную обмотку. При этом студентам заранее неизвестно, какой из роторов установлен в ЭД.

Перед началом экспериментов необходимо 5-10 мин прогреть двигатель при номинальной нагрузке, которая соответствует включению тумблеров K1 и K2. Пока двигатель прогревается, производится проверка работоспособности датчиков и настройка программы L-Graph, с помощью которой производится запись оцифрованных сигналов на компьютер.

После прогрева двигателя и проверки работоспособности датчиков и настройка программы L-Graph производится сбор данных. Для предотвращения путаницы файлы данных следует указывать в поле «Имя файла». Начинать сбор данных лучше при максимальной нагрузке двигателя, т. е. при включенных тумблерах K1, K2 и K3. Для предотвращения возможных ошибок и контроля правильности последовательности действий сбором данных должно заниматься как минимум два

человека. Последовательность действий при этом следующая: установить заданную нагрузку электродвигателя, включить датчик и проверить наличие сигнала с датчика на экране осциллографа. Далее во вкладке «Осциллоскоп» выбрать канал, соответствующий рассматриваемому датчику, и ввести в поле «Имя файла» во вкладке «Регистратор» имя файла. Затем проверить, правильно ли введены данные по частоте АЦП и времени сбора информации в соответствующих полях вкладки «Регистратор». После чего запустить сбор данных нажатием кнопки «Старт сбора» во вкладке «Регистратор».

Собранные данные еще не готовы для практического использования, поэтому их надо конвертировать в другой формат, который понятен другим программам. С помощью специальной программы полученные данные конвертируются в формат ".txt", с которым могут работать многие приложения. Для удобства конвертированные данные нужно систематизировать, поместив данные, полученные с одного датчика в соответствующую директорию.

В. Аналитическая часть

Полученная из экспериментальной части информация передается в специальную базу данных. Анализ и обработка данных выполняются в программе "MATLab". Данная программа позволяет проводить различные технические вычисления, а также имеет встроенный модуль для программирования интерфейса.

Не смотря на то, что данная часть работы выполняется на компьютере, она достаточно информативна и наглядна как для студентов, так и для преподавателей. Разработанный интерфейс выводит на экран не только цифры и показатели, но также воспроизводит графики рассматриваемых функций. С интерфейсом удобно работать: запрашивать выполнение требуемых операций легко и просто.

IV. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

В качестве примера можно рассмотреть дифференциальный метод контроля, т.к. он наиболее информативен.

А. Теоретическое описание метода

Обрыв стержня клетки ротора вне зависимости от числа полюсов машины приводит к перераспределению тока по стержням. Новое распределение тока можно представить в виде суммы первоначального тока (при отсутствии обрыва стержня) и фиктивного тока от оборванного стержня, причем в оборванном стержне фиктивный ток равен и противоположен первоначальному, что обеспечивает равенство нулю тока в оборванном стержне. Из сказанного следует, что любую обмотку ротора (назовем ее диагностируемой – ДОР) с поврежденными стержнями можно заменить двумя обмотками. Одна из них является исправной обмоткой ротора (ИОР), другая является фиктивной обмоткой ротора (ФОР), в которой по оборванным стержням протекают фиктивные токи, которые далее замыкаются по исправным стержням. Следовательно, в линейной плотности тока ФОР (в токораспределении по периметру ротора) будут наблюдаться пики, места расположения которых соответствуют местам расположения оборванных

стержней. Картина данного токораспределения можно уловить датчиком, который представляет из себя витки провода, намотанные на ярмо статора и уложенные в одном из пазов статора. Необходимо отметить, что каждый пик, наводимый в датчике, будет повторяться с периодом, равным периоду вращения ротора. При этом амплитуды пиков будут изменяться с частотой скольжения, так как ток в стержне пульсирует с этой частотой. Поэтому в качестве диагностического параметра в дифференциальном методе выбрано магнитное поле от ФОР.

Магнитное поле в воздушном зазоре, генерируемое токами ФОР, можно разложить в ряд Фурье. Полученную информацию можно оцифровать и использовать в качестве электронных данных для выполнения аналитической части работы.

В. Интерфейс

Когда студент запускает лабораторную программу появляется стартовое диалоговое окно (рис. 2), предлагающее выбрать метод проведения оперативного контроля.

Студент нажимает кнопку «Дифференциальный...» и далее появляются друг за другом два окна, где вводятся исходные данные. В первое из них (рис. 3) вводятся данные о нагрузке ГПТ. Во второе - данные о роторе.

После нажатия кнопки «Далее» программа выводит окно с автоматически построенными зависимостями сигнала с датчика (ВИД1) от времени - для каждого из трех роторов. Данные графики несут чисто ознакомительную функцию.

Следующим шагом в выполнении лабораторной работы будет определение скольжения. Для этого нужно перейти к следующему окну, нажав кнопку «Далее». В окне «Расчет частоты сети и скольжения», для каждого ротора строится спектральная плотность мощности. Эти графики можно масштабировать в очень широких пределах.

Приблизительное месторасположение ЗГР на графике спектральной плотности определяется с помощью формулы (1).

$$f_{ЗГР}^{(k\pm)} = k \cdot \frac{Z_p}{p} \cdot f_c \cdot (1-s) \pm f_c \quad (1)$$

Для расчета скольжения необходимо определить точное значение частоты сети. Частота сети определяется по гармонике, которая имеет максимальную амплитуду в энергетическом спектре.

После этого производится расчет скольжений $s^{(1+)}$, $s^{(1-)}$ и s_{cp} по формулам (2), (3) и (4).

$$s^{(1+)} = 1 - \frac{(f_{ЗГР}^{(k+1)} - f_c) \cdot p}{Z_p \cdot f_c} \quad (2)$$

$$s^{(1-)} = 1 - \frac{(f_{ЗГР}^{(k+1)} + f_c) \cdot p}{Z_p \cdot f_c} \quad (3)$$

$$s_{cp} = \frac{s^{(1+)} + s^{(1-)}}{2} \quad (4)$$

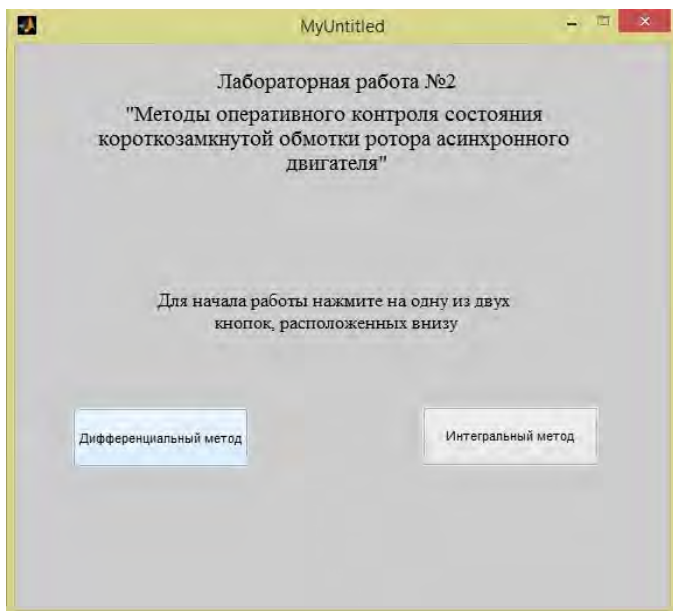


Рис. 2. Стартовое диалоговое окно

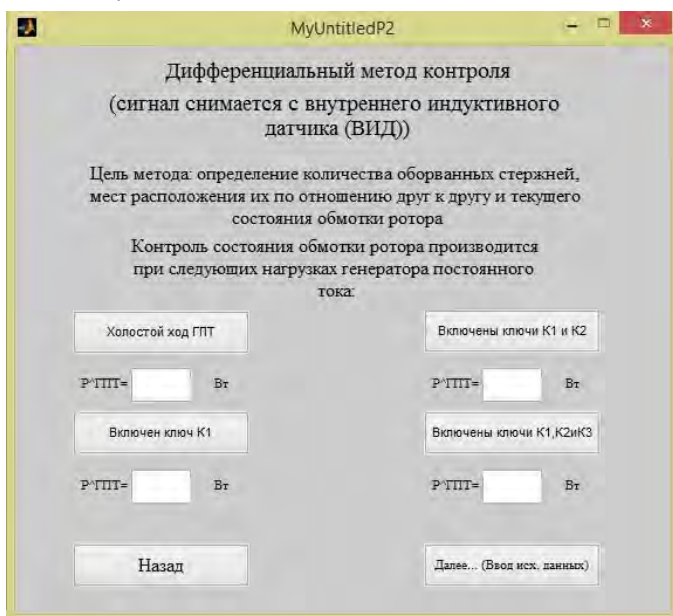


Рис. 3. Окно ввода данных о нагрузке ГПТ

Как было сказано в теоретической части, источником диагностического сигнала является ФОР. Теперь, когда стала известна величина скольжения, появилась возможность выделить из общего спектра частот именно те частоты, которые генерируются ФОР. Переходим к окну «Параметры полосового фильтра»

В соответствующих полях должны автоматически прописаться параметры фильтра. Если этого не случилось, то студент должен нажать кнопку «Назад» и проверить правильность данных, введенных в предыдущих пунктах. Убедившись, что все поля заполнены, следует нажать кнопку «Далее» и перейти к анализу диагностического сигнала. Диагностический сигнал от ФОР получается путем выделения частот $f_{3TP}^{(v\pm)}$ из общего спектра частот.

Для определения состояния обмотки ротора необходимо сначала определить количество оборванных стержней. Количество оборванных стержней равно количеству пиков на промежутке, равном периоду

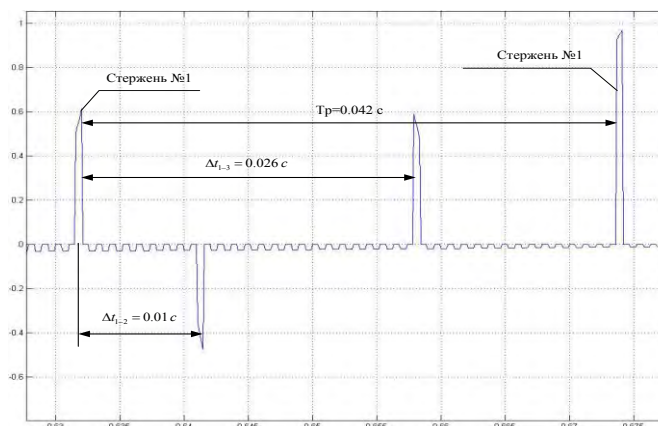


Рис. 4. Определение числа и номеров оборванных стержней для двигателя с $Z_p=40$, $p=2$ при обрыве трех стержней ротора

вращения ротора. Один из таких промежутков детально рассмотрен на рис. 4, где Z_p - количество стержней ротора, p - число пар полюсов. Из рисунка видно, что количество оборванных стержней равно 3.

Для каждой обмотки ротора рассчитывается отношение числа оборванных стержней к общему количеству стержней обмотки ротора. Исходя из полученных результатов, сделать вывод о состоянии обмотки ротора и о необходимости внепланового ремонта.

Рассчитанные значения следует занести в соответствующие поля окна программы «Определение состояний обмоток ротора». В поле «номера оборванных стержней» вводятся номера оборванных стержней. В поле «состояние обмотки ротора» вводится цифра, соответствующая определенному состоянию обмотки ротора: 0 – обмотка ротора находится в исправном состоянии; 1 – обмотка ротора находится в работоспособном неисправном состоянии; 2 – обмотка ротора находится в неработоспособном состоянии.

Удостоверившись в правильности всех введенных данных можно переходить к завершающему этапу данного раздела – формированию электронного отчета. Для этого нужно нажать «Далее».

Отчет к лабораторной работе создается в электронном виде. В процессе выполнения студентам не приходится ничего зарисовывать и чертить, все необходимые графики строит сама программа

Список литературы

- [1] Новоселов, Е.М. Методы оперативного контроля состояния обмотки ротора асинхронного электродвигателя: Методические указания / Е.М. Новоселов, А.А. Скоробогатов, Н.В. Глотова / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». - Иваново, 2011.
- [2] Рассказчиков, А.В. Разработка и исследование системы эксплуатационного контроля электродвигателей собственных нужд электростанций: дис... канд. тех. наук / А.В. Рассказчиков. – ЛПИ, 1982.–195 с.

References

- [1] Novoselov, E.M., Skorobogatov, A.A., Glotova, N.V. *Metody operativnogo kontrolja sostojanija obmotki rotora asinhronnogo jelektrodvigatelja*: [Study guide], Ivanovo: ISPU, 2011.
- [2] Rasskazchikov, A.V. *Razrabotka i issledovanie sistemy jekspluatacionnogo kontrolja jelektrodvigatelej sobstvennyh nuzhd jelektrostancij*: [dissertation]: LPI, 1982.

К оценке КПД полупроводникового преобразователя напряжения повышенной частоты

А.Д. Бачурина, Т.Е. Шадриков, А.М.Соколов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
Иваново, Россия

Рассмотрен вопрос оценки КПД полупроводникового преобразователя напряжения повышенной частоты для электропередач с нетрадиционными параметрами токов и напряжений. Отмечено, что в настоящее время из-за отсутствия приборной базы, возникают препятствия к непосредственной оценке КПД по классической формуле через отношения энергий. Рассмотрена энергетическая методика определения КПД, основанная на расчете затраченной энергии на нагрев теплоносителя и снятия показаний с приборов, измеряющих физические величины (ток и напряжение) в цепи промышленной частоты и постоянного тока.

Ключевые слова — КПД; полупроводниковый преобразователь напряжения; повышенная частота; электроэнергетические системы нового поколения; энергетическая методика

By the estimation of the efficiency coefficient of the semiconductor voltage converter of high frequency

A. Bachurina, T. Shadrikov, A. Sokolov
Ivanovo State Power University named by V. I. Lenin
Ivanovo, Russia
sam@vetf.ispu.ru

The question of evaluating efficiency of a semiconductor inverter for high frequency power with non-traditional parameters of currents and voltages was considered. Pointed that at the present moment due to the lack of instrumental p-base there is a restraint for direct estimation of the efficiency coefficient using classical formula of energy ratio. Energetic approach of efficiency coefficient estimation based on calculations of consumed energy spent on heat carrier medium heating and recordings from meters measuring physical values (currents and voltages) in circuit of power supply frequencies and direct voltage has been reviewed.

Keywords — efficiency coefficient; semiconductor converter of voltage; high frequency; a new generation of power systems; energy method

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития электроэнергетики одним из перспективных направлений является создание электроэнергетических систем (ЭЭС) нового поколения. Особенность таких ЭЭС – высоковольтные кабельные электропередачи с нетрадиционными параметрами токов и напряжений (трапецеидальная форма напряжения, повышенная/пониженная частота). Ряд публикаций [1-3] содержат наработки в данном направлении. Однако перспектива создания и применения таких электропередач требует всесторонней технико-экономической оценки (ТЭО). Определение показателей и характеристик всех компонентов высоковольтной электропередачи с нетрадиционными параметрами токов и напряжений – один из важнейших этапов такой оценки.

Для правильной ТОЭ всей электропередачи требуется определить КПД отдельных её элементов. Одним из важнейших элементов высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты является полупроводниковый преобразователь напряжения.

Применение напряжения с повышенной рабочей частотой увеличивает эксплуатационные характеристики электропередач, однако существуют проблемы измерения физических величин. Отсутствие в настоящее время промышленно изготавливаемых и калиброванных приборов для измерения несинусоидальных (нетрадиционных) физических величин (токов и напряжений) создаёт препятствия к непосредственному вычислению КПД через отношения мощностей/энергий по классической формуле. В связи с этим была разработана нетрадиционная методика оценки КПД

полупроводниковых преобразователей напряжения повышенной частоты.

ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для осуществления исследования была создана физическая модель полупроводникового преобразователя. По конструктивному исполнению преобразователь выполняется с применением транзисторов полевого типа или биполярных транзисторов с изолированным затвором (Insulated-gate bipolar transistor – IGBT). Входное напряжения преобразователя носит постоянный характер, выходное напряжение формируется преобразователем с частотой от 8 до 20 кГц.

Для измерения КПД полупроводникового преобразователя напряжения была предложена энергетическая методика эксперимента и расчёта. Основные положения базируются на расчёте затраченной энергии на нагрев теплоносителя в среде с известной теплопроводностью и снятии показаний с приборов, измеряющих токи и напряжения промышленной частоты и в звене постоянного тока.

Схема проведения опыта по экспериментальному определению КПД полупроводникового преобразователя представлена на рис. 1.

Мощность, получаемую из сети переменного тока через ЛАТР (1) фиксирует блок КИП (2), в котором установлены вольтметр, амперметр и ваттметр. Полупроводниковый выпрямитель, собранный по мостовой схеме (3), преобразует переменное напряжение сети в постоянное. В качестве преобразователя напряжения используется два типа полупроводниковых преобразователей: на силовых полевых транзисторах FQA11N90C в первом опыте и на транзисторах IGBT – во втором. В качестве потребителя электроэнергии используется ёмкость с водой, температура которой изменяется под воздействием электронагревателя (5). На поверхности ёмкости размещена теплоизоляция, состоящая из пенополистирола и пенополиуретана.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В ходе проведения опытов фиксировались и сводились в таблицы (пример заполнения – таблица 1) следующие характеристики:

- τ – время, с;
- t – температура теплоносителя, °С;
- P_c – мощность, потребляемая из сети, Вт;
- U_+ ($U_{вх}$) – постоянное напряжение, В;
- I_+ – постоянный ток, А.

На протяжении каждого опыта такие характеристики, как мощность, потребляемая из сети переменного тока (P_c), напряжение (U_+) и ток (I_+), поддерживались на определенном уровне.

Для каждого типа полупроводникового преобразователя напряжения (1 – на полевых транзисторах; 2 – на транзисторах типа IGBT) были проведены серии экспериментов при разных частотах (11 кГц, 13 кГц и 15 кГц), а также при разных значениях постоянного тока.

На нагрузке (ёмкость с водой) наблюдалась трапецеидальная форма напряжения (рис. 2). Выбор такой формы напряжения обусловлен с экономической точки зрения [1].

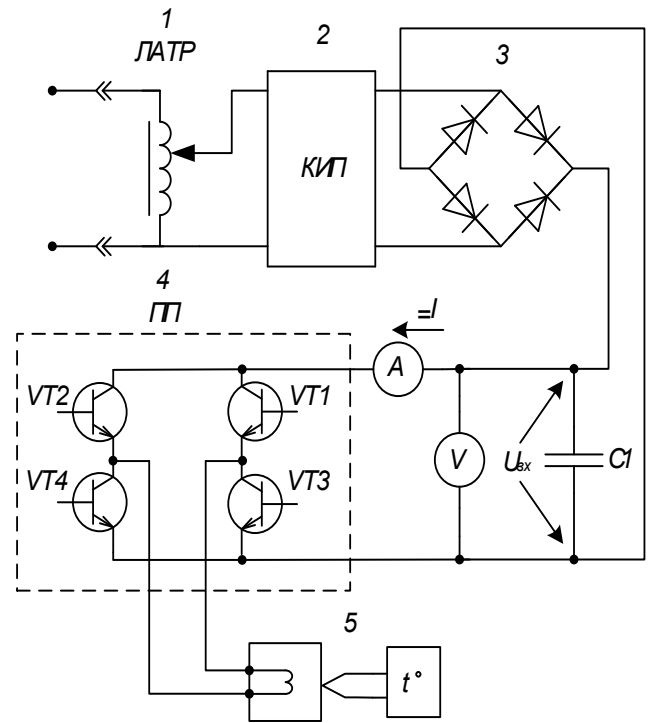


Рис. 1. Схема проведения опыта по экспериментальному определению КПД полупроводникового преобразователя: 1 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); 2 – блок контрольно-измерительной аппаратуры; 3 – полупроводниковый выпрямитель, собранный по мостовой схеме; 4 – полупроводниковый преобразователь напряжения; 5 – нагрузка (электронагреватель)

ТАБЛИЦА 1. ПРИМЕР ЗАПОЛНЕНИЯ ТАБЛИЦЫ ИЗМЕРЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН

τ , с	t , °С	P_c , Вт	U_+ , В	I_+ , А
0	23,6	1100	250	4
120	26,6	1100	250	4
240	30,1	1100	250	4
360	33,8	1100	250	4
480	36,8	1100	250	4
600	40	1100	250	4
720	43,8	1100	250	4
840	46,4	1100	250	4
960	50	1100	250	4

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА

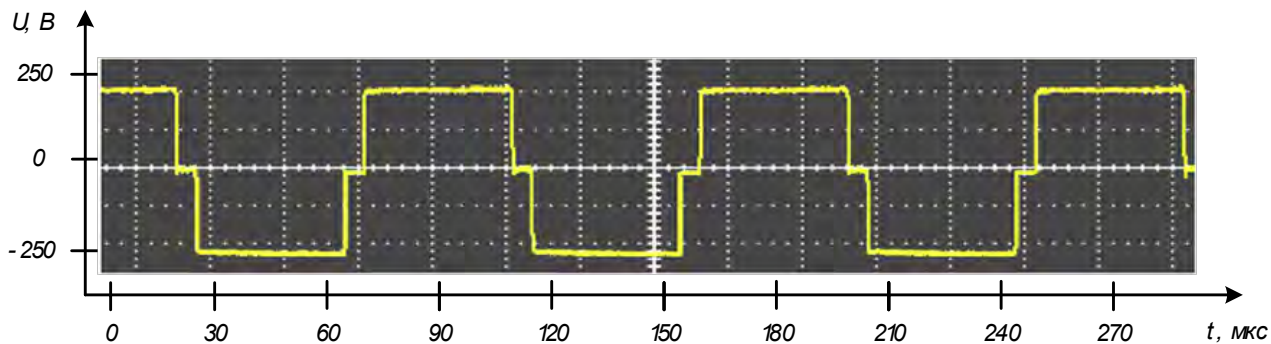
Расчёт энергии учитывает нагрев теплоносителя и ёмкости теплоносителя (1), энергию, потребляемую из сети (2), а также потери через теплоизоляцию ($W_{потери}$).

Расчетные соотношения имеют вид:

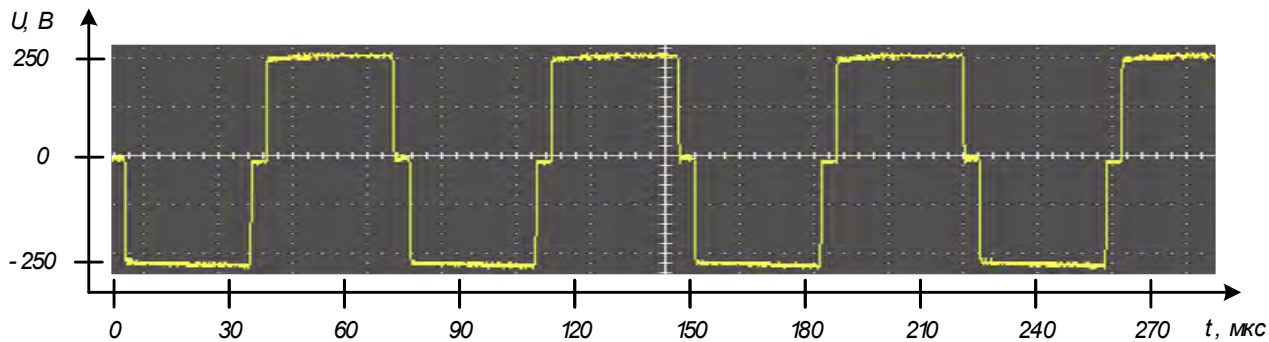
$$W_{нагр} = (C_{тн} \cdot m_{тн} + C_{ёмк} \cdot m_{ёмк}) \cdot (t - t_n), \quad (1)$$

$C_{тн}$ – удельная теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·°С); $m_{тн}$ – масса теплоносителя, кг; $C_{ёмк}$ – удельная теплоемкость ёмкости, кДж/(кг·°С); $m_{ёмк}$ – масса ёмкости, кг; $(t - t_n)$ – изменение температуры;

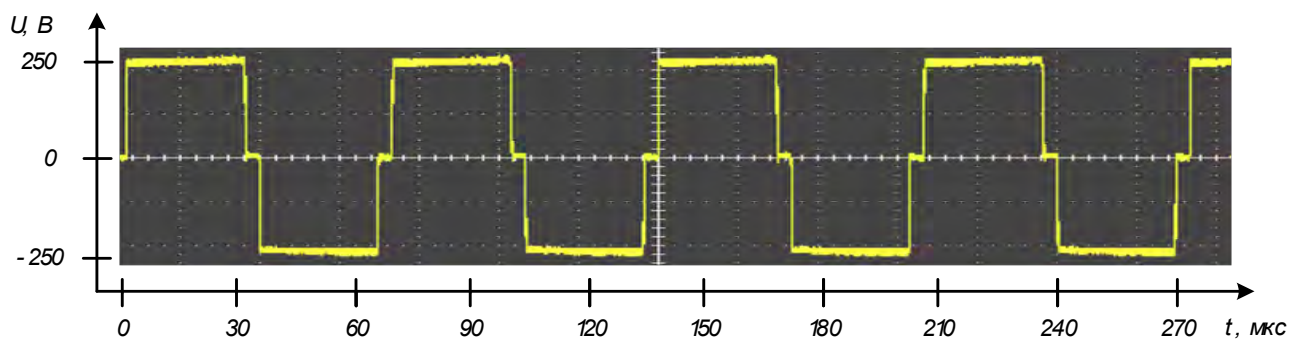
$$W_{вх} = U_+ \cdot I_+ \cdot \tau. \quad (2)$$



а



б



в

Рис. 2. Характерные осциллограммы напряжения на нагрузке: а — при частоте $f = 11$ кГц; б — при частоте $f = 13$ кГц; в — при частоте $f = 15$ кГц

Выражение для КПД полупроводникового преобразователя имеет следующий вид:

$$\eta = \frac{W_{нагр} + W_{потери}}{W_{вх}}$$

ХАРАКТЕРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

В результате измерений и расчетов были получены характерные зависимости КПД от частоты (рис. 3) и от мощности на входе преобразователя (рис. 4).

Из рисунка 3 видно, что КПД полупроводникового преобразователя напряжения мало зависит от частоты напряжения. Значение КПД в первом опыте (полевые транзисторы) составляет порядка 98,5%. Необходимо отметить, что кривая КПД для преобразователей на

с внутренним сопротивлением самих транзисторов: у полевых транзисторов FQA11N90C оно на порядок выше, чем у IGBT. Следовательно, у полевых транзисторов больше потери и меньше значение КПД.

Из рисунка 4 видно, что с увеличением входной мощности значения КПД немного снижаются. Поведение кривой зависимости КПД от мощности на входе преобразователя – предмет дальнейших исследований.

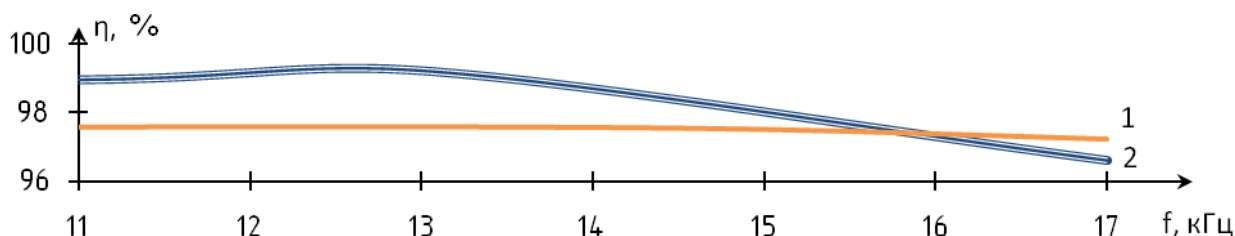
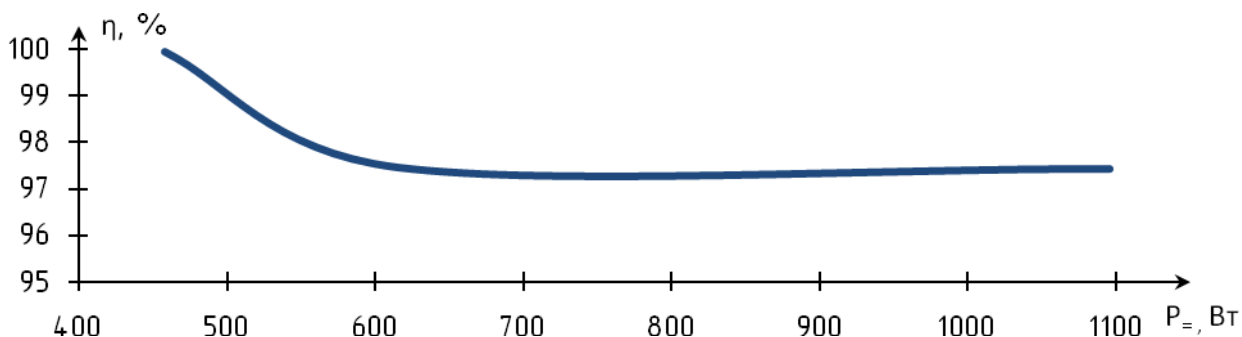


Рис. 3. Зависимость КПД от частоты, $\eta = F(f)$: 1 — полевые транзисторы, $P_{с} = 600$ Вт; 2 — транзисторы IGBT, $P_{с} = 1100$ Вт



б)

Рис. 4. Зависимость КПД от мощности на входе преобразователя, $\eta = F(P_{с})$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в настоящей работе методика позволяет определить КПД полупроводникового преобразователя напряжения, который является весьма важным элементом высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты.

Для определения характеристик (КПД) преобразователя напряжения повышенной частоты была рассмотрена его физическая модель. Причем были исследованы два типа преобразователей: на транзисторах полевых типа и на IGBT транзисторах. В результате были получены характерные зависимости КПД от значений частоты, а также от мощности на входе преобразователя.

По предложенной энергетической методике полученные значения КПД полупроводниковых преобразователей напряжения повышенной частоты составили не ниже 97% на полевых транзисторах и не ниже 98,5% на транзисторах IGBT.

В настоящее время предложенная методика определения КПД полупроводниковых преобразователей напряжения повышенной частоты является наиболее доступной.

Предполагается, что результаты проведенных исследования найдут применение в решении задач, поставленных для создания и применения ЭЭС нового поколения. Очевидно, что необходимо продолжать исследования в области высоковольтных электропередач повышенной частоты.

Список литературы

- [1] Федосов С.В., Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Бочаров Ю.Н., Соколов А.М. Принципы организации современной электроэнергетики // Энергетик. – 2014. – № 3. – С. 46-49.
- [2] Федосов С.В., Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Бочаров Ю.Н., Соколов А.М. Принципы организации современной электроэнергетики, продолжение // Энергетик. – 2014. – № 4. – С. 15-18.
- [3] Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Шадриков Т.Е., Соколов А.М. Технико-экономические показатели силовых трансформаторов высокого напряжения локальных электроэнергетических систем переменного тока повышенной частоты // Энергетик. – 2015. – № 2. – С. 11-14.

References

- [1] Fedosov S.V., Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Bocharov Ju.N., Sokolov A.M. Principy organizacii sovremennoj jelektrojenergetiki // Jenergetik. – 2014. – № 3. – S. 46 49.
- [2] Fedosov S.V., Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Bocharov Ju.N., Sokolov A.M. Principy organizacii sovremennoj jelektrojenergetiki, prodolzhenie // Jenergetik. – 2014. – № 4. – S. 15 18.
- [3] Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Shadrikov T.E., Sokolov A.M. Tehniko-jekonomicheskie pokazateli silovyh transformatorov vysokogo naprijazhenija lokal'nyh jelektrojenergeticheskikh sistem peremennogo toka povyshennoj chastoty // Jenergetik. – 2015. – № 2. – S. 11 14.

Исследование режимов работы и электромагнитной совместимости цифровой трансформаторной подстанции

Е.Н. Соснина, Р.Ш. Бедретдинов, Д.С. Асташев
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Аннотация — в статье рассмотрены особенности работы цифровой трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ. Определены оптимальные положения устройства автоматического регулирования напряжения под нагрузкой силового трансформатора в нормальных режимах работы. Получен гармонический состав электрической сети при регулировании напряжения на цифровой трансформаторной подстанции. Исследование проводилось на основе *Simulink*-моделирования

Ключевые слова — цифровая трансформаторная подстанция; режимы работы; электромагнитная совместимость

Research digital transformer substation operation modes and electromagnetic compatibility

E.N. Sosnina, R.Sh. Bedretdinov, D.S. Astashev
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract — operation aspect digital transformer substation are considered. The optimal position transformer tap change under load in the normal operation modes. Received electric power system harmonic composition for voltage regulation digital transformer substation. The research was conducted based on *Simulink*-modeling.

Keywords — digital transformer substation, operation modes, electromagnetic compatibility

I. ВВЕДЕНИЕ

Отличительной особенностью разработанной цифровой трансформаторной подстанции (ЦТП) 10/0,4 кВ [1] является наличие активно-адаптивной системы управления (ААСУ) тиристорным устройством автоматического регулирования напряжения под нагрузкой (АРПН) силового трансформатора ЦТП. В основе алгоритма регулирования лежат требования ГОСТ 32144-2013 [2], а также критерии минимумов потерь мощности и уравнивающего тока.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

При дискретном способе регулирования требуется определение оптимального положения устройства АРПН в нормальных режимах работы ЦТП (раздельная и параллельная работа трансформаторов; режим с автономным источником энергии, подключенным к шинам 0,4 кВ ЦТП). Поставленная задача решается на разработанной *Simulink*-модели системы электроснабжения. На рис. 1 приведен групповой график

нагрузки потребителей, подключенных к исследуемой двух-трансформаторной ЦТП.

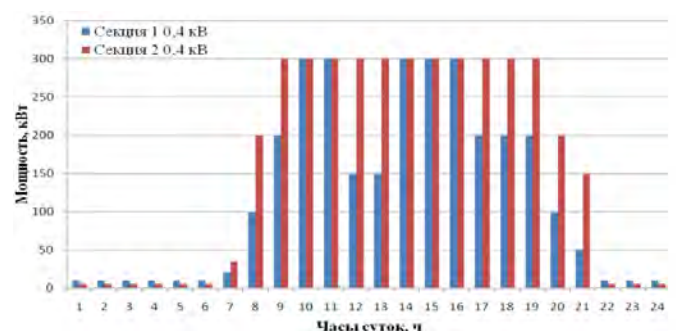
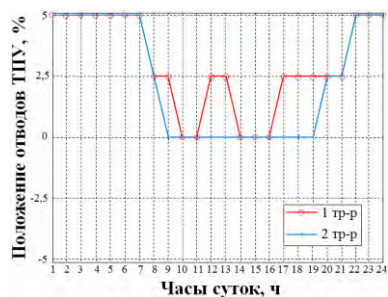


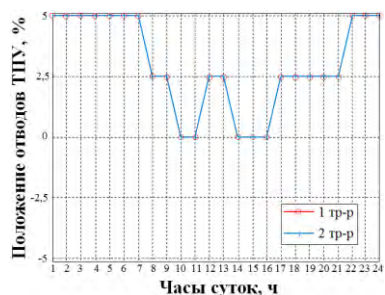
Рис. 1. График нагрузки потребителей 0,4 кВ

На рис. 2 представлены полученные графические зависимости оптимальных положений отводов тиристорного переключающего устройства (ТПУ), при которых величины потерь мощности и уравнивающего тока минимальны, а напряжение находится в допустимых пределах. Из графических зависимостей видно, что

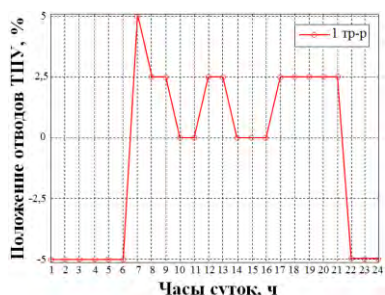
переключение отводов ТПУ коррелируется с графиком нагрузки, приведенным на рис. 1.



а)



б)



б)

Рис. 2. График переключения отводов ТПУ трансформатора ЦТП при: а) раздельной работе трансформаторов; б) параллельной работе трансформаторов; в) работе автономного источника энергии, подключенного к шинам 0,4 кВ

III. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Импульсно-фазовый способ регулирования сопровождается генерацией в сеть 0,4 кВ высших гармонических составляющих напряжения. Разложение

периодической функции напряжения в ряд Фурье позволило оценить уровень гармоник на выходе ТПУ. Максимальные значения коэффициентов несинусоидальности напряжения n-го порядка ($K_{U(n)}$) и суммарного коэффициента несинусоидальности напряжения (THD) наблюдаются при коэффициенте загрузки трансформатора $K_3=0,1$ и преобладании нагрузки индуктивного характера $\cos\varphi=0,1$ (таблица 1).

Таблица 1. МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВОМ СПОСОБЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТПУ

Параметр	Тип трансформатора	Характер нагрузки, $\cos\varphi$, о.е.	Коэффициент загрузки трансформатора, K_3 , о.е.	Максимальные значения коэффициентов высших гармоник в % от основной гармоники					
				3	5	7	9	11	THD
$K_{U(n)}$	ТСЗН-400	0,1	0,1	4,18	1,31	0,78	1,25	0,47	4,93

Как видно из таблицы 1 при импульсно-фазовом регулировании возникают нечетные гармоники, при этом полученные значения не превышают допустимых [2].

Список литературы

- [1] Соснина, Е.Н. Опытная цифровая трансформаторная подстанция с активно-адаптивной системой управления и автоматическим плавным регулированием напряжения и мощности / Е.Н. Соснина, А.Б. Лоскутов, С.М. Дмитриев и др. // Промышленная энергетика. 2013, № 12, с.8-13.
- [2] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.

References

- [1] Sosnina, E.N. Opytnaja cifrovaja transformatornaja podstancija s aktivno-adaptivnoj sistemoj upravlenija i avtomaticheskim pлавным regulirovanijem naprjazhenija i moshhnosti / E.N. Sosnina, A.B. Loskutov, S.M. Dmitriev i dr. // Promyshlennaja jenergetika. 2013, № 12, pp.8-13.
- [2] GOST 32144-2013. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehnicheskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoi jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija. M.: Standartinform, 2014, 19 pp.

К вопросу о распределении напряжения по высоковольтной обмотке трансформаторов повышенной частоты

А.А. Дьячков, Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
Иваново, Россия

В статье рассматривается вопрос распределения напряжения вдоль высоковольтной обмотки силового повышающего трансформатора, используемого в кабельной линии электропередачи повышенной частоты, при различной загрузке этой линии.

Ключевые слова — повышенная частота; распределение напряжения; распределённые ёмкости; кратность перенапряжений; силовой трансформатор; кабельная линия электропередач; высокочастотные колебания

Distribution of tension on a high-voltage winding of the transformer of the increased frequency

A. Dyachkov, T. Shadrikov, A. Sokolov
Ivanovo State Power University named by V. I. Lenin
Ivanovo, Russia
sam@vetf.ispu.ru

In article the question of distribution of tension along a high-voltage winding of the power raising transformer used in a cable power line of the increased frequency at various loading of this line is considered.

Keywords — increased frequency; distribution of tension; the distributed capacities; frequency rate of retention; power transformer; cable power line; high-frequency fluctuations

ВВЕДЕНИЕ

В связи с возникшей возможностью создания и применения высоковольтных кабельных линий электропередач повышенной частоты становится необходимой разработка одного из важнейших элементов таких электропередач – силовых трансформаторов [1-3].

Анализ существующих литературных источников показывает, что в настоящее время практически нет сведений о распределении напряжения вдоль высоковольтной обмотки силового трансформатора повышенной частоты.

Цель данной работы – исследовать на физической модели высоковольтного силового трансформатора повышенной частоты мощностью 2,5 (кВА) распределение напряжения вдоль высоковольтной обмотки в различных режимах его работы.

ПРИЧИНЫ НЕРАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ВДОЛЬ ОБМОТКИ

У высоковольтных силовых трансформаторов промышленной частоты наблюдается неравномерное распределение напряжения вдоль обмотки при падении на её вход высокочастотной волны перенапряжения

(например, грозового импульса). Наибольшая кратность перенапряжения при этом имеет место у начала обмотки, наименьшая – у её заземлённого конца. Неравномерное распределение напряжения вызвано наличием продольных (между витками) и поперечных (между элементами обмотки и заземлёнными частями трансформатора) распределённых ёмкостей обмотки. На промышленной частоте сопротивления этих ёмкостей весьма велики и влияния на работу трансформатора они практически не оказывают. Для высокочастотной волны перенапряжения эти ёмкостные сопротивления малы, при этом весьма велики индуктивные сопротивления витков обмотки. По этой причине, токи высокой частоты проходят только по ёмкостной цепи обмотки, создавая в ней падение напряжения. Наличие поперечных ёмкостей приводит к неравномерному распределению ёмкостных токов, это и является причиной неравномерного распределения напряжения по длине обмотки.

У трансформаторов повышенной частоты продольные и поперечные ёмкости обмотки также влияют на распределение напряжения по её длине. Данное явление происходит не только при падении на обмотку волны перенапряжений. Это имеет место и в нормальном режиме

работы из-за прихода на обмотку отражённой волны повышенной частоты от несогласованных участков сети.

Таким образом, с увеличением частоты приложенного на обмотку напряжения возрастает неравномерность распределения напряжения вдоль самой обмотки. Оказывается, что в обмотке трансформатора повышенной частоты распределение напряжения отличается от распределения напряжения в трансформаторах промышленной частоты при падении на обмотку волны перенапряжений. Поэтому встаёт задача более подробного изучения данного вопроса.

МОДЕЛЬ ИССЛЕДУЕМОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Для данного опыта используется модель силового двухобмоточного трансформатора мощностью 2,5 (кВА), состоящего из броневого ферритового сердечника и изоляционного каркаса с обмотками. Первичная обмотка намотана в один слой. Поверх неё расположена многослойная вторичная обмотка, причём для уменьшения её паразитных ёмкостей она разделена на пять секций. Каркас с обмотками пропитан смолой с целью повышения электрической прочности.

ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА

С выхода преобразователя на первичную обмотку исследуемого трансформатора подаётся напряжение повышенной частоты. К вторичной обмотке наглухо подключена кабельная линия, выполненная из коаксиального кабеля РК-50 длиной 12 (м), к выходу которой через понижающий силовой трансформатор включается активная нагрузка.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

От транзисторного преобразователя напряжение прямоугольной формы частотой 17 (кГц) и амплитудой до 250 (В) подаётся на первичную обмотку исследуемого трансформатора. На отпайках вторичной обмотки поочередно осциллографируется напряжение относительно её заземлённого вывода. Схема опыта показана на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В ходе опыта были получены осциллограммы напряжений на отпайках исследуемого трансформатора при различных режимах его работы. На рис. 2 показаны характерные осциллограммы напряжений на выходе трансформатора. По этим осциллограммам измерялось наибольшее амплитудное значение напряжения U_m и рабочее напряжение после затухания высокочастотных колебаний U_p .

Выходное напряжение имеет трапециевидную форму, это связано как с несовершенством процессов переключения транзисторов в преобразователе, так и с удешевлением последнего. Преобразователь представляет собой, по существу, генератор прямоугольных импульсов, вследствие чего его схема довольно проста.

При отсутствии активной нагрузки на выходе трансформатора имеют место большие по величине колебания частотой около 250 (кГц) и амплитудой до 10% от номинального значения напряжения. Высоковольтная обмотка трансформатора имеет собственную индуктивность, которая образует с ёмкостью кабеля и ёмкостями самой обмотки паразитные колебательные контуры. Вследствие этого возникает переходный

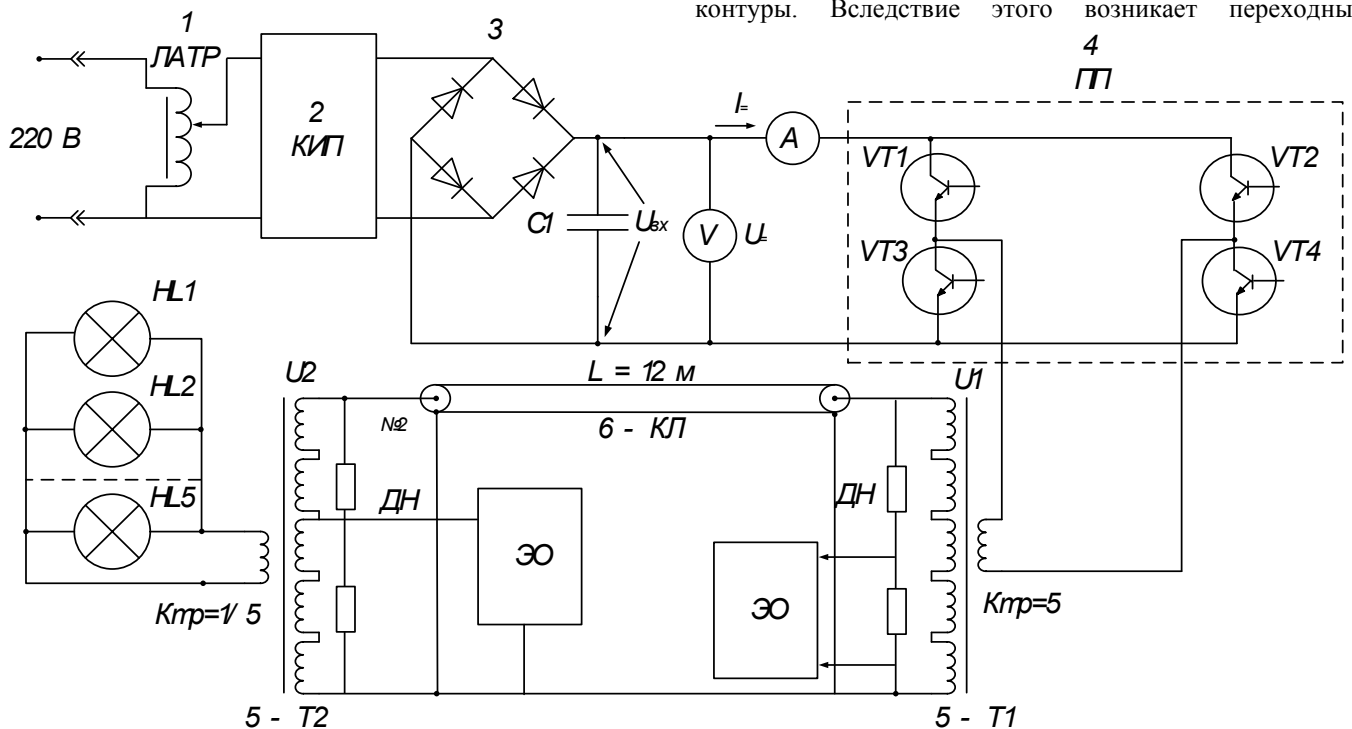
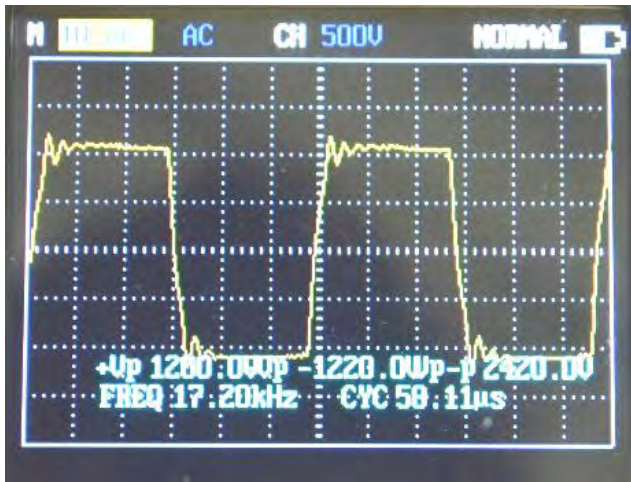
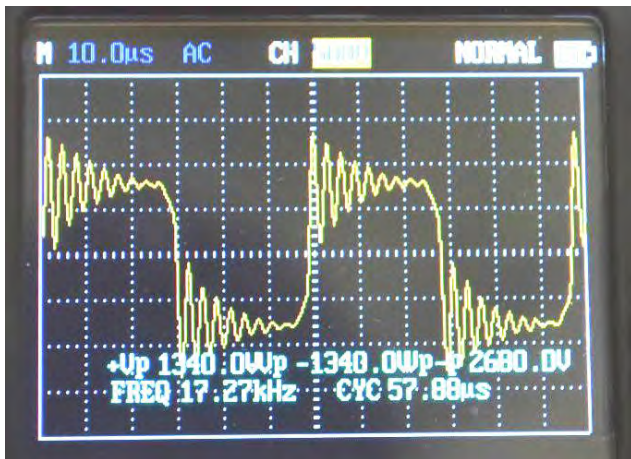


Рис.1. Схема проведения опыта по определению распределения напряжения по обмотке силового высоковольтного трансформатора повышенной частоты: 1 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); 2 – блок контрольно-измерительной аппаратуры; 3 – полупроводниковый выпрямитель, собранный по мостовой схеме; 4 – полупроводниковый преобразователь напряжения; 5 – понижающий (T2) и исследуемый (T1) трансформаторы; 6 – кабельная линия



а



б

Рис. 2. Форма напряжения на выходе трансформатора: а – при включенной нагрузке; б – при отключении понижающего трансформатора на конце кабельной линии

процесс, сопровождающийся возникновением высокочастотных колебаний, затухающих из-за наличия активных сопротивлений обмотки трансформатора и жилы кабеля. Собственная частота высокочастотных колебаний зависит от значений индуктивности обмотки силового трансформатора, её паразитной ёмкости и ёмкости кабельной линии.

Если к кабельной линии подключена активная нагрузка, то она шунтирует паразитный колебательный контур, из-за чего колебания весьма быстро затухают. Таким образом, активная нагрузка на конце кабельной линии не допускает появления колебаний с большой амплитудой.

Значения напряжений, измеренных осциллографом относительно заземлённого вывода обмотки при отсутствии активной нагрузки, показаны в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОТПАЙКАХ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ

Понижающий трансформатор отключен					
Напряжение (В)	Номер отпайки				
	1	2	3	4	5
Установившееся, U_p	220	450	650	900	1200
Наиб.пиковое, U_m	625	860	1130	1430	1660
Кратность (U_m/U_p)	2,84	1,91	1,74	1,59	1,38
Понижающий трансформатор включен					
Напряжение (В)	Номер отпайки				
	1	2	3	4	5
Установившееся, U_p	220	450	700	900	1200
Наиб.пиковое, U_m	700	850	1000	1200	1600
Кратность (U_m/U_p)	3,18	1,89	1,45	1,33	1,33

ХАРАКТЕРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ КРАТНОСТЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

По результатам измерений для каждого из этих режимов работы были получены зависимости отношения максимальной амплитуды напряжения к рабочему напряжению U_m/U_p (кратности перенапряжений), показанные на рис.3.

Отсюда следует, что при работе кабельной линии электропередач в режиме холостого хода напряжение вдоль высоковольтной обмотки силового трансформатора, установленного в начале линии, распределяется неравномерно. В этом режиме особенно заметны импульсные перенапряжения, возникающие вследствие появления паразитных высокочастотных колебаний в цепи трансформатора. Причём наибольшая кратность таких перенапряжений имеет место у заземлённого вывода обмотки. В ходе выполнения опытных исследований распределения напряжения вдоль высоковольтной обмотки силового трансформатора повышенной частоты при различных режимах его работы выяснилось, что данное распределение в большой степени зависит от характера нагрузки трансформатора.

Очевидно, что полученные в ходе экспериментов кратности свидетельствуют о том, что необходимо принимать меры по их ограничению в процессе работы высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты. В наиболее тяжелых режимах работы высокочастотных перенапряжений могут достигать величин в 15-20% от номинального напряжения, что требует создания методики их учета при расчете и проектировании изоляции обмоток силового высоковольтного трансформатора повышенной частоты. Для моделирования процессов, происходящих в трансформаторе, очевидно, необходимо создать математическую модель трансформатора повышенной частоты в программном комплексе MATLAB.

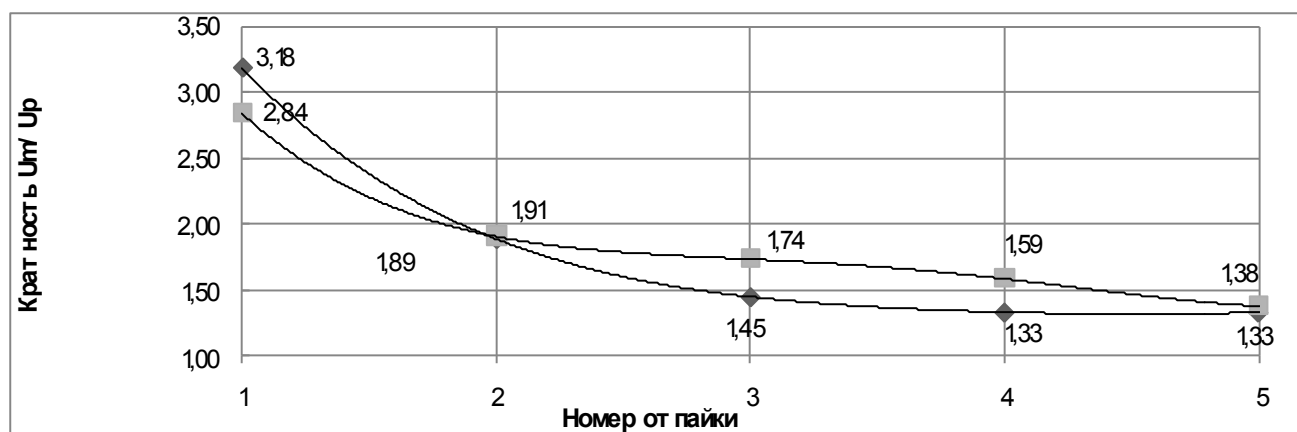


Рис.3. Распределение кратностей перенапряжений по секциям исследуемого трансформатора при работе без активной нагрузки: □ – с выходным трансформатором, ◊ – без выходного трансформатора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что силовой высоковольтный трансформатор повышенной частоты является значимым элементом гибких кабельных линий электропередач повышенной частоты (FADCES), обладающих преимуществами как в области эффективности, так и в массо-габаритных параметрах.

Работа силового высоковольтного трансформатора повышенной частоты на большую ёмкостную нагрузку нежелательна, поскольку она сопровождается импульсными колебаниями и вызывает перенапряжения в высоковольтной обмотке. Кратности таких высокочастотных перенапряжений негативно сказываются на продольной и поперечной изоляции трансформатора.

Следовательно, такое явление необходимо учитывать при проектировании и конструировании, как силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты, так и другого оборудования, работающего совместно с кабельной линией электропередачи или в составе ее.

Впрочем, для более глубокого анализа причин неравномерного распределения напряжения вдоль обмотки необходимо проводить дальнейшие исследования в этой области с помощью описательной математической модели и дальнейших экспериментов

Список литературы

- [1] Федосов С.В., Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Бочаров Ю.Н., Соколов А.М. Принципы организации современной электроэнергетики // Энергетик. – 2014. – № 3. – С. 46-49.
- [2] Федосов С.В., Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Бочаров Ю.Н., Соколов А.М. Принципы организации современной электроэнергетики, продолжение // Энергетик. – 2014. – № 4. – С. 15-18.
- [3] Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Шадриков Т.Е., Соколов А.М. Техно-экономические показатели силовых трансформаторов высокого напряжения локальных электроэнергетических систем переменного тока повышенной частоты // Энергетик. – 2015. – № 2. – С. 11-14.

References

- [1] Fedosov S.V., Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Bocharov Ju.N., Sokolov A.M. Principy organizacii sovremennoj jelektrojenergetiki // Jenergetik. – 2014. – № 3. – S. 46 49.
- [2] Fedosov S.V., Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Bocharov Ju.N., Sokolov A.M. Principy organizacii sovremennoj jelektrojenergetiki, prodolzhenie // Jenergetik. – 2014. – № 4. – S. 15 18.
- [3] Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Shadrikov T.E., Sokolov A.M. Tehniko-jekonomicheskie pokazateli silovyh transformatorov vysokogo naprjazhenija lokal'nyh jelektrojenergeticheskikh sistem peremennogo toka povyshennoj chastoty // Jenergetik. – 2015. – № 2. – S. 11 14.

Алгоритм управления универсального узла нагрузки гексагональной распределительной сети

Лоскутов А.Б., А.А. Лоскутов, Д.В. Зырин, И.А. Лукичева
Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексева
Нижний Новгород, Россия
e-mail: loskutov.nnov@gmail.com

Аннотация — Статья описывает новый подход к построению распределительных электрических сетей по гексагональному принципу, в котором функции управления осуществляются децентрализованно в универсальных узлах нагрузки. Предложен универсальный алгоритм принятия решения по воздействию на выключатели в зависимости от изменения нагрузки в сети.

Ключевые слова — гексагональная сеть; узел нагрузки; алгоритм, PMU, система управления, АЦП

The control algorithm of universal load node of hexagonal distribution network

Aleksey Loskutov, Anton Loskutov, Dmitriy Zyrin, Irina Lukicheva
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: loskutov.nnov@gmail.com

Abstract — the article describes a new hexagonal principle of constructing distributed electrical grids, in which the control functions are implemented in universal load nodes decentrally. The universal algorithm of circuit breaker state decision-making depending on load change in electrical grid have been proposed.

Keywords — hexagonal electrical grid, load node, algorithm, PMU, control system, ADC

А. Введение

Тенденции к интеллектуализации электрических сетей и унификации конструктивно-топологических решений говорят о необходимости смены парадигмы построения сетей и организации системы управления потоками мощности.

Авторами предложена политика построения и новый принцип организации распределительных сетей крупных городов с высокой плотностью нагрузки – гексагональные распределительные сети (ГРС) [1,2]. ГРС отвечают требованиям активно-адаптивных сетей благодаря возможности менять свою конфигурацию в зависимости от текущего режима, причем типовые алгоритмы управления функционированием позволяют создать полностью автоматическую сеть. Управление режимами работы сети, топологией и перераспределением нагрузки между источниками возможны за счет алгоритмизации узлов нагрузки ГРС (УН ГРС), которые в совокупности создают топологию в виде правильных шестиугольников (рис.1). Известные методы расчета установившихся режимов, основанные на матричных методах и SCADA-измерений, весьма трудоемки и расчет сети, даже малого размера, занимает значительное машинное время на ЭВМ. Это говорит о том, что они не работают в реальном времени и использование их в алгоритмах определения

комплексов токов и напряжений ГРС ставится под сомнение.

В. Гексагональные распределительные сети

ГРС представляют собой совокупность равномерно-распределенных узлов нагрузки, соединенных между собой линиями одинакового сечения, имеющих сотовую конфигурацию сети (в виде правильных шестиугольников) (рис.1). Основу сети составляют универсальные узлы нагрузки. Каждый из них имеет три луча: питающий нагрузку - питающий, осуществляющий транзит мощности - транзитный, находящийся в горячем резерве - резервный. При необходимости возможна переконфигурация узла и изменение потоков мощности в сети.

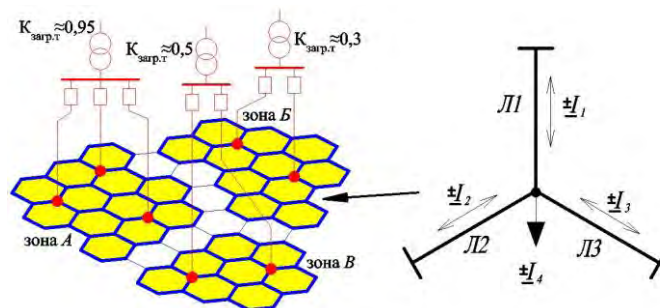


Рис. 1. Принципы формирования узлов нагрузки

С. Система управления гексагональной распределительной сетью

Гексагональная сеть предусматривает параллельную работу информационно-коммуникативной сети. Организация облачной системы связи выполняется путем размещения в каждом узле распределенной системы управления (ИМРСУ), который осуществляет защиту, управление, коммуникацию со смежными узлами и источниками (узлами более высокого уровня). В блок ИМРСУ поступают аналоговые сигналы от измерительных органов ($i_a, i_b, i_c, i_o, u_a, u_b, u_c, u_o$), характеризующие режим работы ГРС в данном УН, логические сигналы в виде "уставок" по току ($I_{min,max}$) и "уставок" по напряжению ($U_{min,max}$), дискретные сигналы от коммутационных аппаратов узла нагрузки ("нуль" (0) - выключен, "единица" (1) - включен) и сигналы от ИМРСУ смежных узлов. Структурная схема ИМРСУ изображена на рис.2.

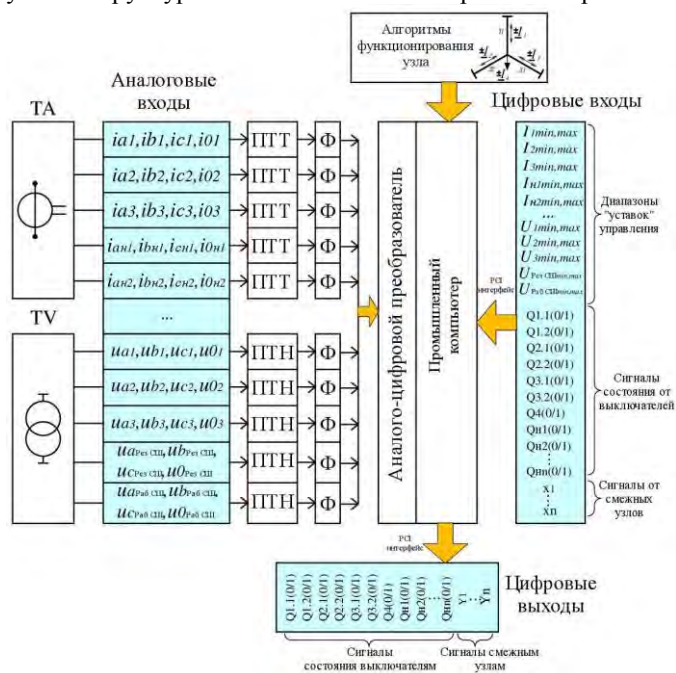


Рис. 2. Структурная схема ИМРСУ

Аналоговые сигналы от трансформаторов тока и напряжения преобразуются промежуточными трансформаторами тока и напряжения ПТТ, ПТН, фильтрами низких частот Φ и подводятся к АЦП. В результате выходные сигналы АЦП соответствуют в цифровом виде дискретным сигналам, модулированным по амплитуде синусоидальными функциями. Каждому аналоговому сигналу $u(t)$ на выходе фильтра Φ соответствует дискретный сигнал $u(nT)$ на входе АЦП и цифровой сигнал на выходе АЦП, вводимый в промышленный компьютер ПК, осуществляющий цифровую обработку сигналов. На основе текущей информации о входных сигналах напряжения и тока, входных логических сигналах от коммутационных аппаратов и сигналах от смежных узлов, промышленный компьютер вырабатывает необходимые решения, характеризующиеся выходными сигналами, воздействующими на коммутационные аппараты узла нагрузки.

Принципиальная схема УН ГРС (рис 3) простая, наглядная, имеет ограниченное количество вариантов состояния, поэтому легко алгоритмируется и позволяет унифицировать электротехнические и информационные решения. Автоматическое функционирование сети гексагонального типа основано на реализации различных алгоритмов. В данной статье рассматривается алгоритм принятия решения по откл./вкл. ветвей узла.

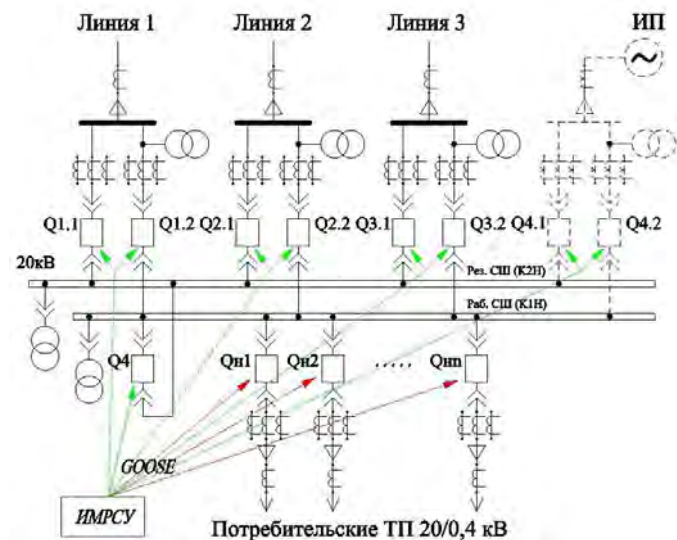


Рис. 3. Схема универсального узла нагрузки

Д. Оценка состояния гексагональных распределительных сетей

Несинхронизированные SCADA-измерения производятся с частотой раз в 2-4 с, а оценка состояния, во избежание вычислительных трудностей, раз в несколько минут. SCADA-измерения могут обеспечить достоверное состояния сети, при условии, что система статична. Однако, для ГС такое предположение неверно. Определить состояние гексагональной электрической сети с требуемой погрешностью в определенный момент времени позволяют PMU-измерения. PMU (Phazor Measurement Unit) – это устройство, измеряющее комплексные величины тока и напряжения. Одной из наиболее важных особенностей технологии PMU является то, что измерения синхронизированы с высокой точностью через GPS/ГЛОНАСС, так что скорость передачи данных больше не является критическим параметром в использовании этих данных. Все измерения PMU с одной и той же временной меткой используются для определения состояния энергосистемы в момент, определенной временной меткой [4]. PMU позволяет осуществлять измерения раз в 30 с и более.

Так как PMU-измерения – комплексные значение, то зависимость вектора измерений от вектора состояния сети (1) линейна, то отпадает необходимость итерационных расчетов и увеличивается быстрота оценивания состояния сети

$$z = Hx + \varepsilon \quad (1)$$

Е. Алгоритм принятия решения по откл./вкл. ветвей узла нагрузки

Алгоритм принятия решения по откл./вкл. ветвей узла нагрузки при изменении динамики нагрузки в общем виде

включает в себя два критерия: режим сохранения сети; режим сохранения потребления узла. Комплексные токи в каждой ветви, при поочередном отключении смежных ветвей, можно выразить по первому закону Кирхгофа:

$$\sum j_k^n = 0, \quad (2)$$

где k – номер ветви; n – номер отключенной смежной ветви.

При поочередном отключении ветвей резерв по пропускной способности каждой ветви в относительных величинах можно определить по выражению:

$$\Delta j_k^n = \frac{I_{\max k} - |j_k^n|}{I_{\max k}}, \quad (3)$$

где $I_{\max k}$ - предельный длительно допустимый ток для ветви.

Принятие решения по выбору отключаемой линии определяется индикатором, показывающим наименьшую разностью резервов в смежных линиях при отключении k -ой ветви:

$$\Delta j_{lk} = |\Delta j_{k2}^{n2} - \Delta j_{k1}^{n1}| = \min, \quad (4)$$

где Δj_{k2}^{n2} и Δj_{k1}^{n1} - возможные варианты резервов.

Наименьшее значение Δj_{lk} определяет равномерность загрузки оставшихся в работе линий УН ГРС.

Предложенный принцип алгоритмизации УН ГРС по изменению динамики нагрузки позволит осуществить превентивное управление режимами работы ГРС и станет основой построения и развития системы управления ГРС.

Список литературы

[1] Лоскутов, А.Б. Топология городских распределительных интеллектуальных электрических сетей 20 кВ [Текст] //

Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А. / Промышленная энергетика. – 2012. – № 5. – С. 11-17.

- [2] Лоскутов, А.Б. Интеллектуальные распределительные сети 10-20 кВ с гексагональной конфигурацией [Текст] // Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А., Зырин Д.В. / Промышленная энергетика. – 2013. – № 12. – С. 3-7.
- [3] Лоскутов, А.Б. Особенности автоматического функционирования узловых подстанций гексагональных электрических распределительных сетей 20 кВ [Текст] // Лоскутов А.Б., Лоскутов А. А., Зырин Д. В./ Фёдоровские чтения – 2014. Материалы XLIV Международной научно-практической конференции (Москва, 12-14 ноября 2014 г.) / под общей ред. Б. И. Кудрина и Ю. В. Матюниной. – М.: Издательство МЭИ, 2014. – С 19-24.
- [4] Phadke, A.G. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications / Phadke, A.G., Thorp J.S. – New York: Springer, 2008 – 247 с.

References

- [1] Loskutov, A.B. Topologiya gorodskih raspredelitelnyh intellektualnyh elektricheskikh setey 20 kV [Tekst] // Loskutov A.B., Sosnina E.N., Loskutov A.A. / Promyshlennaya energetika. – 2012. – № 5. – S. 11-17.
- [2] Loskutov, A.B. Intellektualnye raspredelitelnye seti 10-20 kV s geksagonalnoy konfiguracie [Tekst] // Loskutov A.B., Sosnina E.N., Loskutov A.A., Zyrin D.V. / Promyshlennaya energetika. – 2013. – № 12. – S. 3-7.
- [3] Loskutov, A.B. Osobennosti avtomaticheskogo funkcionirovaniya uzlovyh podstanciy geksagonalnyh elektricheskikh raspredelitelnyh setey 20 kV [Tekst] // Loskutov A.B., Loskutov A. A., Zyrin D. V./ Fyodorovskie chteniya – 2014. Materialy XLIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Moskva, 12-14 noyabrya 2014 g.) / pod obshhey red. B. I. Kudrina i Yu. V. Matyuninoy. – M.: Izdatelstvo MEI, 2014. – S 19-24.
- [4] Phadke, A.G. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications / Phadke, A.G., Thorp J.S. – New York: Springer, 2008 – 247 с.

Разработка концепции повышения надежности воздушных линий электропередачи в сложных метеорологических

А.О.Редькин, Н.Ю.Шевченко
КТИ (филиал ВолгГТУ)
г. Камышин, Россия
e-mail: schewchenkonata1960@mail.ru

Аннотация — в статье рассмотрен отечественный подход к проектированию и строительству воздушных линий электропередачи, работающих в сложных метеорологических условиях. Для Российских энергосистем сформулирована концепция развития воздушных линий электропередачи, предполагающая компромисс между затратами на сооружение линии и издержками на ее эксплуатацию. Составлено девять вариантов модернизации воздушных линий электропередачи и определен оптимальный вариант по условию надежности.

Ключевые слова — воздушные линии электропередачи, концепции развития, надежность, экономичность, мониторинг.

The development of the concept of improving the reliability of overhead power lines in difficult weather conditions

Alexander Redkin, Natalia Shevchenko
Kamyshin Technological Institute (branch) of the Volgograd State University of Technology
Kamyshin, Russia
e-mail: schewchenkonata1960@mail.ru

Abstract — the article examines the domestic approach to the design and construction of overhead power lines, working in adverse weather conditions. For Russian power grids formulated the concept of the development of overhead power lines with a compromise between the cost of erection and cost for its operation. The authors amounted to nine variants of modernization of overhead power lines and determined the best option in condition of safe operation.

Keywords — overhead power lines, concepts of development, reliability, profitability, monitoring

I. ВВЕДЕНИЕ

Главными причинами, вызывающими резкое увеличение повреждаемости высоковольтных воздушных линий (ВЛ) электропередачи, являются старение оборудования ВЛ и климатические воздействия. Поэтому разработка концепций повышения надежности воздушных линий электропередачи напряжением 110-220 кВ, работающих в сложных метеоусловиях, является актуальной задачей для электроэнергетики России [1].

II. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ

Основными способами повышения надежности в гололедно-ветровых условиях являются: увеличение расчетной нагрузки за счет сокращения пролетов, использования высокотехнологичных проводов и опор, увеличения повторяемости гололедных нагрузок в зависимости от категории потребителя, автоматизированная плавка гололеда и мониторинг линии в режиме реального времени [4].

Так как безопасная работа ВЛ в сильногололедных условиях лимитируется либо габаритом линии, либо обрывом провода, то в качестве показателей надежности можно принять эксплуатационный коэффициент запаса

прочности и допустимую стрелу провеса. Стрелу провеса провода можно выразить из уравнения изменения состояния провода при постоянной нагрузке [2].

$$f_x = \frac{G_n l^2}{8T_x} = \frac{3T_x}{G_n} \left[\frac{G_n f_m}{3T_m} + \alpha(t_x - t_m) + \frac{T_x - T_m}{F_n E_n} \right] \quad (1)$$

Согласно уравнения (1) в качестве альтернативных можно рассмотреть следующие варианты модернизации (на примере ВЛ 220 кВ) [3]:

1. замена металлических решетчатых опор МРО (ПС-220-3) на многогранные опоры ММО (типа П1С-220-П1);
2. увеличение высоты опоры МРО (замена ПС-220-3 на П-220-3);
3. уменьшение пролета между опорами МРО в два раза;
4. уменьшение пролета между опорами ММО в два раза;
5. увеличение стальной части провода АС (замена АС 300/39 на АС 300/66);
6. увеличение сечения провода (замена АС 300/39 на АС400/51);
7. применение проводов с гладкой поверхностью типа Aero-Z;

8. применение высокотемпературных проводов с зазором GTACSR;

9. применение высокотемпературных проводов типа TACSR/ACS.

Предложенные девять альтернативных вариантов модернизации рассмотрены для двух периодов повторяемости $T=25$ лет и $T=50$ лет.

Для проверки эффективности вариантов модернизации предложены следующие критерии:

– полное тяжение в проводе должно быть меньше допустимого значения $T_x < T_{доп}$ при низшей температуре $t = -40^\circ\text{C}$; максимальной скорости ветра v_{max} ; нормативной толщине стенки отложений $b_{г.н.}$;

– стрела провеса при изменяющихся климатических воздействиях меньше стрелы провеса провода при высшей температуре $f_x < f_{max}$;

– напряжение в проводе при максимальной (гололедной – σ_6 ; или гололедно-ветровой – σ_7) нагрузке не превышает допустимого значения: $\sigma_{доп} \geq \sigma_{6х}$ или $\sigma_{доп} \geq \sigma_{7х}$ [2].

В табл. 1 представлены результаты расчетов. Во всех предложенных вариантах модернизации выполняется условие эффективности работы в гололедно-ветровых условиях $\sigma_7 < \sigma_{доп}$.

Самым эффективным мероприятием повышения надежности воздушных линий электропередачи, работающих в сложных метеорологических условиях по техническим критериям среди рассматриваемых вариантов модернизации, является сокращение пролета в два раза при использовании многогранных металлических опор (четвертый вариант). Но данное мероприятие можно рекомендовать для районов, в которых температура воздуха не ниже «минус» 40°C . Для районов с более низкой температурой воздуха наиболее надежным становится вариант с заменой эксплуатируемых опор на унифицированные многогранные (первый вариант реконструкции).

Предложен комплексный показатель надежности: $K_{комп.н} = f(k_n; k_o; k_{тв}; k_d)$ отражающий такие свойства, как безотказность ($f_1 = k_n$; $f_2 = k_o$), долговечность ($f_4 = k_d$) и ремонтпригодность ($f_3 = k_{тв}$) воздушных линий электропередачи [5].

Таблица 1. ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАРИАНТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ В ПРОВОДЕ ПРИ НАИБОЛЬШЕЙ НАГРУЗКЕ

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип провода	АС 300/39	АС 300/39	АС 300/39	АС 300/39	АС 300/66	АС 400/51	Аеро-з	GTACSR	TACSR
Период повторяемости $T = 25$ лет									
$\sigma_{доп}$, МПА	120	120	120	120	153	120	143	144	139
σ_7 , МПА	89	115,3	116,2	45	68	62	120	77	93
Период повторяемости $T = 50$ лет									
$\sigma_{доп}$, МПА	120	120	120	120	153	120	143	144	139
σ_7 , МПА	59	118	117	113	122	118	139	141	138



Рис. 1. Сравнение вариантов модернизации по комплексному показателю надежности для двух периодов повторяемости $T = 25$ лет и $T = 50$ лет

Сравнение вариантов по комплексному показателю надежности для двух периодов повторяемости климатических нагрузок $T=25$ лет и $T=50$ лет показало, что наиболее эффективными будут первый и четвертый варианты с многогранными опорами (рис.1).

Для окончательного вывода об эффективности вариантов модернизации необходимо произвести технико-экономический расчет.

Список литературы

- [1] Лебедева, Ю.В., Шевченко, Н.Ю. Угаров, Г.Г. Концепции развития воздушных линий электропередачи, подверженных экстремальным метеовоздействиям, и их экономическая // Вестник СГТУ. - 2011. - № 1, вып. 3. - С. 91-95.
- [2] Панасенко, М. В., Шевченко, Н. Ю., Хромов, Н. П., Сошинов А. Г. Мероприятия по снижению гололедно-ветровых аварий в электрических сетях // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. - 2014.-№ 8. - С. 30-37.
- [3] Повышение эффективности воздушных линий электропередачи напряжением 110-220 кВ в гололедных районах. Монография./ Г.Г.Угаров, Н.Ю. Шевченко, Ю.В. Лебедева, А.Г.Сошинов. М.: Перо, 2013. 187 с.
- [4] Шевченко, Н.Ю., Лебедева, Ю.В., Хромов, Н.П., Сошинов, А.Г. Внедрение автоматизированной системы наблюдения за гололедом в Камышинских электрических сетях // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 5 – С. 127-132.
- [5] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет климатических нагрузок воздушных линий электропередачи напряжением 220 кВ с проводом АЕРО-З» №2015610433 от 12 января 2015года / Н.Ю. Шевченко, А.Г.Сошинов, Ю.В. Лебедева, Э.А. Панфилов, Т.В. Корбакова.

References

- [1] Lebedeva, Ju.V., Shevchenko, N.Ju. Ugarov, G.G. Konceptii razvitiya vozdušnyh linij jelektroperedachi, podverzhennyh jekstremal'nyh meteovozdejstvijam, i ih jekonomicheskaja // Vestnik SGTU. - 2011. - № 1, vyp. 3. - pp. 91-95.
- [2] Panasenko, M. V., Shevchenko, N. Ju., Hromov, N. P., Soshinov A. G. Meroprijatija po snizheniju gololjodno-vetrovyyh avarij v jelekticheskih setjah// Jelektrooborudovanie: jekspluatacija i remont. - 2014.-№ 8. - pp. 30-37.
- [3] Povyshenie jeffektivnosti vozdušnyh linij jelektroperedachi naprjazheniem 110-220 kV v gololjednyh rajonah. Monografija./ G.G.Ugarov, N.Ju. Shevchenko, Ju.V. Lebedeva, A.G.Soshinov. M.: Pero, 2013. 187 pp.
- [4] Shevchenko, N.Ju., Lebedeva, Ju.V., Hromov, N.P., Soshinov, A.G. Vnedrenie avtomatizirovannoj sistemy nabljudenija za gololedom v Kamyshinskih jelekticheskih setjah // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. – 2009. – № 5 – pp.127-132
- [5] Shevchenko, N. Yu., Sozinov, A. G , Lebedeva, Yu. V. . Panfilov, E. A , Korbakova, T.V// Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlja EVM "Calculation of climatic loads of overhead power lines with a voltage of 220 kV wire AERO-Z" №2015610433 ot 12 January 2015 goda» .

Оптимизация мостовой схемы регистрации частичных разрядов

С.А. Словесный, Н.А. Фоменко, Н.В. Сиялов

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина

г. Иваново, РФ

natascha94@inbox.ru, ilp111@outlook.com, slovs@eef.ispu.ru

Аннотация — В работе рассматривается методика настройки мостовой схемы регистрации частичных разрядов (ЧР) в высоковольтных изоляционных конструкциях. Оптимизация схемы регистрации достигается путем использования результатов предварительного расчета переходного процесса, сопровождающего ЧР в изоляции. По результатам расчета в программном комплексе Mathcad создается математическая модель перераспределения токов при ЧР в изоляции и осуществляется выбор параметров мостовой схемы, ускоряющий и упрощающий процедуру настройки мостовой схемы перед производством измерений. Оценка эффективности и достоверности предварительного расчета параметров мостовой схемы выполнена на примере настройки схемы измерений характеристик частичных разрядов в опорно-изоляционной конструкции.

Ключевые слова — оценка состояния изоляции; мостовая схема регистрации частичных разрядов; математическая модель; повышение помехоустойчивости.

Optimization of the bridge circuit partial discharge registration

Natal'ja Fomenko, Nikita Siyalov, Sergey Slovesniy

Ivanovo State Power Engineering University

Ivanovo, RF

E-mail: natascha94@inbox.ru, ilp111@outlook.com, slovs@eef.ispu.ru

Abstract — In this paper we conduct the sample calculation of the transitory phenomenon in the partial discharge measuring bridge joint using the state space method in order to accelerate and simplify the calculations and simulate the transitory phenomenon in the measurement design and the adjustment procedure in the “MathCAD” software package. We verify all the calculation results by the experiment and also use them for the actual bridge joint adjustment before measuring partial discharge characteristic curve for IOR-10 support insulator.

Keywords — Insulation assessment, bridge joint, partial discharge registration, simulation model, noise immunity boost.

При нынешнем состоянии российской энергетики, когда большая часть силового оборудования эксплуатируется сверх своего нормативного срока, особенно актуальной становится проблема разработки и внедрения эффективных методов оценки состояния высоковольтного оборудования и кабелей. Грамотное техническое обслуживание позволяет обеспечить нормальное «физическое» состояние оборудования в течение всего срока эксплуатации, предотвращая его внезапное повреждение.

Эксплуатационная надежность силового оборудования зависит от состояния изоляции, подвижных и неподвижных контактных соединений, режима эксплуатации и от уровня внешних электромагнитных возмущений, таких как грозовые и коммутационные перенапряжения и короткие замыкания. Оценка состояния изоляции, в первую очередь стареющего оборудования,

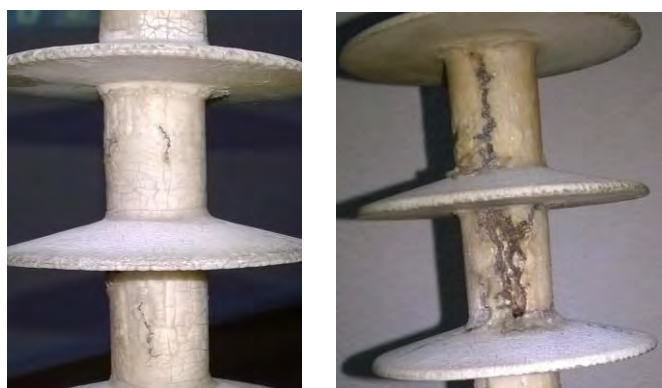
следует уделять особое внимание, так как вышеуказанные электромагнитные возмущения и температурные воздействия при перегрузках высоковольтного оборудования вызывают в ней необратимые изменения.

Существует множество методов испытания высоковольтных изоляционных конструкций, например, испытание повышенным напряжением, измерение сопротивления изоляции, измерение тангенса угла диэлектрических потерь и ёмкости изоляции. Однако одним из наиболее информативных является метод, базирующийся на регистрации частичных разрядов в изоляции.

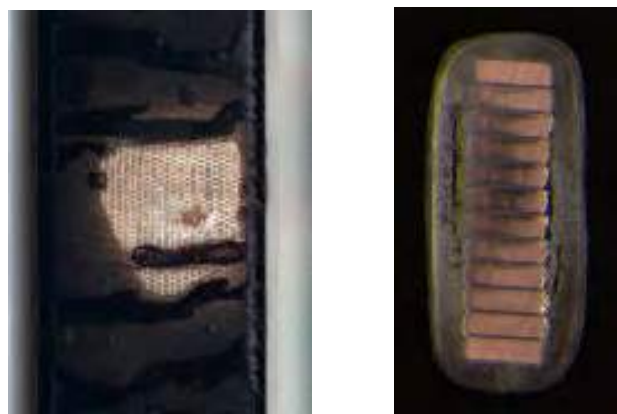
Частичный разряд (ЧР) – это искровой разряд малой мощности, возникающий внутри или на поверхности изоляции высоковольтного оборудования. ЧР могут возникать в местах с пониженной электрической прочностью, например, в газовых включениях в толще

диэлектрика или в прослойках пропитывающей жидкости Рис. 1. Периодически повторяясь, они постепенно приводят к старению, а затем и пробою изоляции. Разрушение изоляции под действием разрядов может длиться месяцами или даже годами. Своевременное выявление частичных разрядов, измерение их мощности и повторяемости, определение места их возникновения позволяют оценивать состояние изоляции и предупреждать внезапные отказы оборудования, вызываемые пробоем изоляционных конструкций.

Частичным разрядам сопутствуют такие явления, как электромагнитные излучения, в том числе в видимой части спектра, местное кратковременное повышение температуры изоляции, акустические волны, протекание токов перезаряда ёмкостей (импульсные токи во внешних цепях) и т.д. Разнообразие вышеперечисленных эффектов обуславливает существование множества методов регистрации разрядов в изоляции высоковольтного оборудования, основными из которых являются электромагнитный, акустический и электрический методы.



а)



б)

Рис. 1. Внешнее проявление ЧР
а) ЧР в подвесном полимерном изоляторе;
б) ЧР в обмотке статора электродвигателя

При реализации электромагнитного СВЧ метода используются электронные устройства, регистрирующие электромагнитные сигналы ЧР с помощью антенн. К достоинствам электромагнитной регистрации ЧР относятся обеспечение дистанционного контроля оборудования без непосредственного к нему подключения, оперативность и простота. Недостатками СВЧ метода являются недостаточная информативность, влияние внешних электромагнитных помех и невозможность регистрации ЧР во внутренней изоляции электрических машин и аппаратов.

При регистрации ЧР в изоляции электроустановок с использованием акустического метода применяются сверхчувствительные микрофоны, монтируемые на наружной поверхности экранов и корпусах оборудования, которые улавливают акустические волны в диапазоне ультразвуковых частот. Этот метод основан на сравнении интенсивности и временных параметров сигналов в разных точках контролируемого объекта. К достоинствам акустической регистрации ЧР относятся практически полное отсутствие влияния внешних электромагнитных помех и возможность непрерывного мониторинга состояния оборудования. Недостатком метода является невосприимчивость к ЧР малой интенсивности, а также трудности с интерпретацией результатов измерений и определением места возникновения разрядов.

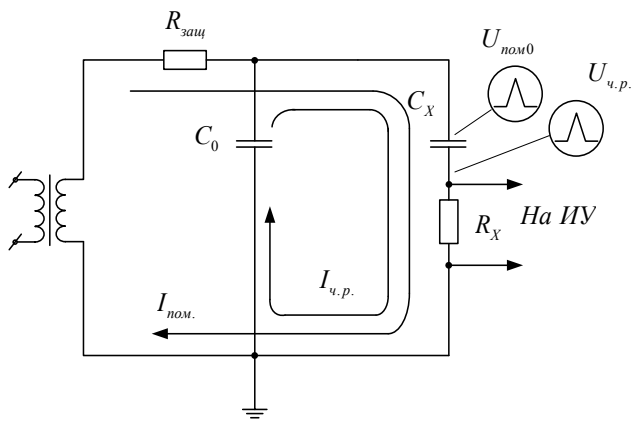
В схемах, реализующих электрический метод регистрации ЧР, используются датчики (измерительные элементы), по которым в схеме измерения проходят токи перезаряда ёмкостей, вызываемые частичными разрядами.

Частичный разряд в исследуемом объекте (C_x) сопровождается уменьшением напряжения на электродах объекта контроля, при этом заряды в схеме начинают перераспределяться, уменьшаясь на выходе источника испытательного напряжения и высоковольтной шине и увеличиваясь на выводах объекта, компенсируя уменьшение напряжения на нем. В это время в измерительном контуре, образованном объектом контроля, включаемым последовательно с ним измерительным элементом и ёмкостью высоковольтной шины на землю, проходит импульсный ток, пропорциональный кажущемуся заряду ЧР Рис. 2.

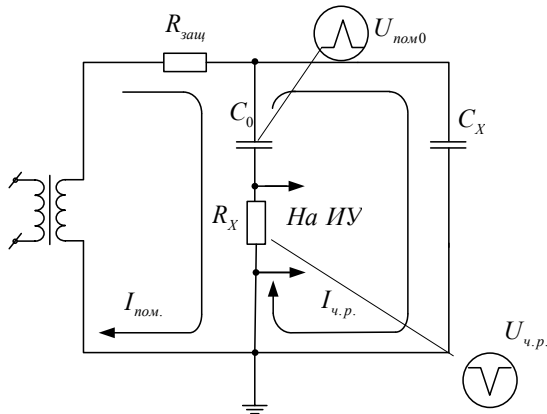
Под кажущимся зарядом ЧР понимается такой заряд, который при введении на электроды объекта контроля вызывает такое же изменение напряжения на нем, как и реальный ЧР.

Характеристики импульса тока (размах и длительность), сопровождающего ЧР, и формируемого им импульса напряжения на измерительном элементе определяются характером полного сопротивления измерительного контура. Для повышения чувствительности установки и увеличения величины импульсного тока перезаряда ёмкостей в схему вводят дополнительный соединительный конденсатор C_0 , включаемый между высоковольтной шиной и землей Рис. 2.

При этом измерительный элемент R_x может включаться в цепь или последовательно с объектом контроля, если оба электрода объекта могут быть отделены от земли Рис. 2 а), или последовательно с



а)



б)

Рис. 2. Лабораторная схема регистрации ЧР

- а) оба электрода объекта могут быть отделены от земли;
 б) один из электродов объекта не может быть изолирован от земли.

соединительным конденсатором, если один из электродов контролируемого объекта не может быть отделен от земли (рис. 2 б).

Рассмотренные схемы регистрации ЧР используются при приемосдаточных испытаниях оборудования, а применению их в условиях действующего энергообъекта препятствуют их низкие помехоустойчивость и помехозащищенность. Токи помех из внешней сети проникают в схему регистрации ЧР и формируют на измерительном элементе импульсы напряжения, характеристики которых аналогичны характеристикам импульсов напряжения, формируемых на том же измерительном элементе токами ЧР. Устранение указанного недостатка возможно путем преобразования рассмотренной схемы в мостовую, при этом в схему регистрации вводится второй измерительный элемент R_0 , (рис. 3).

В мостовой схеме регистрации ЧР токи помех уходят в землю через измерительные элементы, включаемые последовательно с объектом контроля и соединительным конденсатором, формируя на них синфазные импульсы напряжения. При этом токи ЧР создают на измерительных элементах противофазные импульсные сигналы, что позволяет, при расшифровке осциллограмм, визуально

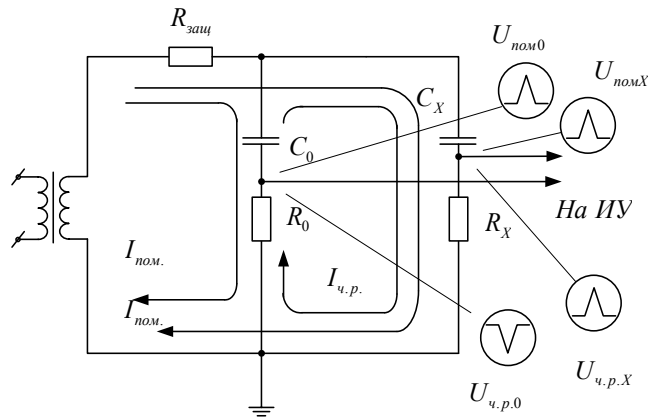


Рис. 3. Повышение помехоустойчивости схемы регистрации ЧР

выделять импульсы напряжений от токов ЧР на фоне импульсных помех.

Для повышения эффективности регистрации импульсов ЧР необходимо уравнивать пиковые значения импульсов напряжений, создаваемых токами помех на входах измерительного устройства, тогда при использовании дифференциальных регистрирующих устройств влияние помех будет сведено к минимуму.

Уравнивание импульсных напряжений помех достигается изменением величины сопротивлений измерительных элементов R_X и R_0 .

В том случае, если емкость соединительного конденсатора существенно отличается от емкости объекта контроля, сопротивления измерительных элементов также будут существенно различаться. Измерительное устройство подключается к схеме регистрации ЧР коаксиальными измерительными кабелями, обладающими достаточно большой собственной емкостью (рис. 4). В этом случае происходит частичное шунтирование измерительных элементов емкостями измерительных кабелей $C_{ХК}$ и $C_{0К}$ (рис. 4), что вызывает рассогласование даже в полностью настроенной мостовой схеме. Степень шунтирования зависит от соотношения емкости (емкостных сопротивлений) измерительных кабелей и сопротивлений измерительных элементов R_X и R_0 . Для уменьшения эффекта шунтирования измерительными кабелями их следует подключать к измерительным элементам не непосредственно, а через дополнительные согласующие резисторы R_{XC} и R_{0C} (рис. 4).

Настройка мостовой схемы регистрации ЧР осуществляется каждый раз при изменении параметров объекта контроля (емкости и сопротивления). При этом подбираются как значения сопротивлений измерительных элементов R_0 и R_X , так и значения сопротивлений согласующих резисторов R_{XC} и R_{0C} .

Подбор соответствующих значений указанных элементов путем их последовательной замены занимает много времени и не всегда позволяет получить оптимальный результат. Ускорение и облегчение процедуры настройки мостовой схемы достигается

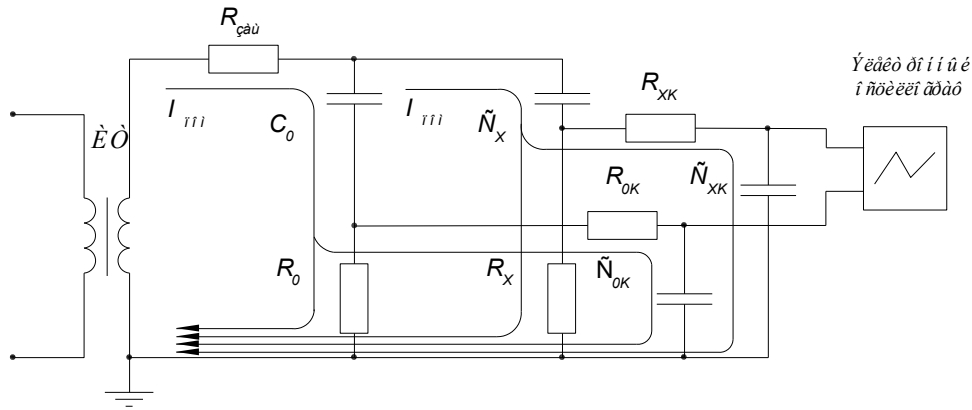


Рис. 4. Схема измерения характеристик и регистрации ЧР.

выполнением предварительного расчета значений регулируемых элементов для заданной емкости объекта контроля. Это особенно актуально на действующих энергообъектах в условиях воздействия электромагнитных помех. В этом случае предварительный расчет измерительных и согласующих элементов дает дополнительно экономию времени на подготовку схемы к измерениям.

Расчет переходного процесса, моделирующего ЧР в мостовой схеме, классическим и операторным методами затруднен, но может быть достаточно легко выполнен с использованием метода переменных состояния.

Этот метод основан на составлении, а затем решении системы дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенных относительно производных. Под переменными состояния обычно понимают токи в индуктивностях и напряжения на емкостях, через которые можно определить любые другие напряжения и токи в цепи. Зная закон изменения этих переменных во времени, их всегда можно заменить источниками ЭДС и тока. Оставшиеся элементы цепи, как правило, резистивные и поэтому легко рассчитываются при известных параметрах источников.

Расчетные значения токов, проходящих через емкости измерительных кабелей на землю, определяющие напряжения на входах измерительного устройства Рис. 4, характеризуются выражениями:

-ток, проходящий через собственную емкость измерительного кабеля в цепи соединительного конденсатора C_{0K} :

$$i_{0K} = \frac{e \cdot R_2 \cdot R_0}{(R_3 + R_{12}) \cdot (R_1 + R_2) \cdot (R_0 + R_{0C})} + \frac{U_{CX} \cdot R_3 \cdot R_0}{(R_2 + R_{13}) \cdot (R_3 + R_1) \cdot (R_0 + R_{0C})} + \frac{U_{XK} \cdot R_{X3} \cdot R_0}{(R_{XC} + R_{обц2}) \cdot (R_{X3} + R_1) \cdot (R_0 + R_{0C})} - \frac{U_{C0} \cdot R_0}{(R_{23} + R_1) \cdot (R_0 + R_{0C})} - \frac{U_{0K}}{(R_{обц1} + R_{0C})}; \quad (1)$$

-ток, проходящий через собственную емкость измерительного кабеля в цепи объекта контроля C_{XK} :

$$i_{XK} = \frac{e \cdot R_1 \cdot R_X}{(R_3 + R_{12}) \cdot (R_1 + R_2) \cdot (R_{XC} + R_X)} - \frac{U_{CX} \cdot R_X}{(R_2 + R_{13}) \cdot (R_X + R_{XC})} - \frac{U_{XK}}{(R_{XC} + R_{обц2})} + \frac{U_{C0} \cdot R_3 \cdot R_X}{(R_{23} + R_1) \cdot (R_2 + R_3) \cdot (R_X + R_{XC})} + \frac{U_{0K} \cdot R_{30} \cdot R_X}{(R_{обц1} + R_{0C}) \cdot (R_{30} + R_2) \cdot (R_X + R_{XC})}, \quad (2)$$

где e - амплитуда импульсной помехи;

U_{CX} и U_{C0} - напряжения на выводах объекта контроля и соединительного конденсатора C_X и C_0 соответственно;

U_{XK} и U_{0K} - напряжения на емкостных элементах C_{XK} и C_{0K} Рис.4;

$R_1, R_2, R_{20}, R_{30}, R_{X3}, R_{23}, R_{12}, R_{13}, R_{обц1}, R_{обц2}$ - значения промежуточных расчетных элементов

$$R_1 = \frac{R_0 \cdot R_{0c}}{R_0 + R_{0c}}, R_2 = \frac{R_x \cdot R_{xc}}{R_x + R_{xc}}, R_{20} = \frac{R_2 \cdot R_0}{R_2 + R_0}, R_{30} = \frac{R_0 \cdot R_3}{R_0 + R_3}, R_{X3} = \frac{R_x \cdot R_3}{R_x + R_3}, R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}, R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}, R_{обц1} = \frac{R_{20} \cdot R_3}{R_{20} + R_3}, R_{обц2} = \frac{R_{X1} \cdot R_3}{R_{X1} + R_3}, R_{X1} = \frac{R_x \cdot R_1}{R_x + R_1}.$$

При этом импульсная помеха представлена кусочной функцией:

$$e = \begin{cases} 0 & \text{при } t > b, \\ A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) & \text{при } 0 < t < b, \end{cases} \quad (3)$$

где b – длительность импульса напряжения, f – частота основной гармоники импульса,

A – максимальное значение импульсного напряжения.

Одной из основных задач настройки схемы является уравнивание импульсных напряжений, формируемых токами помех, на входах измерительного устройства. Для измерительных кабелей одинаковой длины при равенстве емкостей равенство напряжений помех достигается при полном совпадении временных характеристик токов i_{XK} и i_{OK} .

Определение оптимальной величины сопротивлений измерительных элементов и соответствующих им согласующих резисторов схемы регистрации осуществляется путем подбора с одновременным контролем формы кривых токов и напряжений, заданных полученными в процессе предварительного расчета функциями. Последовательный перебор варьируемых параметров схемы завершается при достижении полного совпадения кривых напряжений (токов) на входах измерительного устройства Рис. 6.

В качестве исследуемого объекта выбран опорный изолятор ИОР-10 емкостью $C = 9 \cdot 10^{-12} \Phi$, при этом емкость соединительного конденсатора составила $C = 1,15 \cdot 10^{-9} \Phi$, а электромагнитная помеха моделировалась импульсом Рис. 5:

$$e = \begin{cases} 0 & \text{при } t > 0,077 \cdot 10^{-6}, \\ 10 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 10^6 \cdot t) & \text{при } 0 \leq t \leq 0,077 \cdot 10^{-6} \end{cases} \quad (4)$$

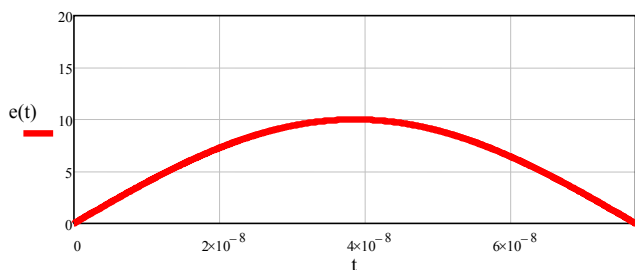


Рис. 5. Параметры импульса расчетной электромагнитной помехи.

Результаты подбора сопротивлений для объектов с различными значениями емкостей представлены в Табл. 1, на Рис. 6 представлен графический результат расчета.

Ввиду сложности конструктивного исполнения низкоомных измерительных элементов значение измерительного сопротивления, включаемого последовательно с соединительным конденсатором, принимается равным 1 Ом. Величины R_{0C}, R_{XC}, R_X определяются при расчете.

Для оценки достоверности предлагаемого метода настройки мостовой схемы и определения его точности выполнен натурный эксперимент для схемы, используемой при регистрации ЧР в опорном

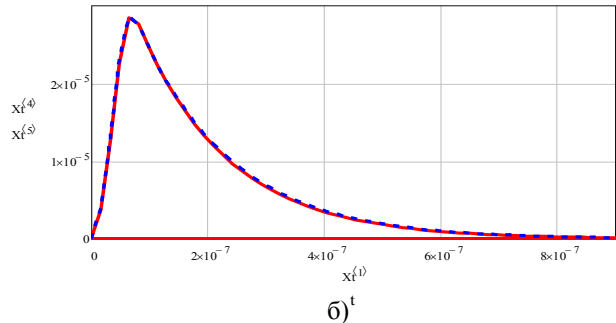
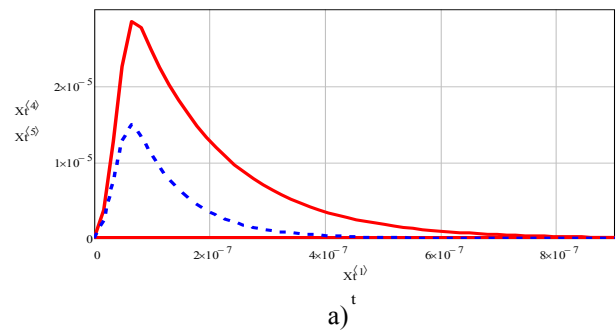


Рис. 6. Временные функции напряжений $U_{OK}(t)$ и $U_{XK}(t)$ на выходе мостовой схемы
а) до подбора параметров схемы регистрации;
б) точная настройка схемы регистрации.

Таблица 1. Значения варьируемых параметров схемы измерения при различных значениях ёмкости исследуемого объекта

C_X	1	2,5	5	9	10	25	50	75	100
$C_0 = 1,15 \cdot 10^{-9}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$R_0, \text{ Ом}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$R_X, \text{ Ом}$	1200	475	230	150	115	45	23	15	11,5
$R_{0C}, \text{ Ом}$	1200	500	300	220	200	140	130	120	115
$R_{XC}, \text{ Ом}$	75	75	75	75	75	75	75	75	75

изоляторе ИОР-10.

В ходе эксперимента получены кривые напряжений на входах измерительного устройства, представленные на Рис. 7. Как видно из рисунка, их расхождение не превышает 10%, что может быть обусловлено погрешностью измерительного прибора и различием реальных и расчетных значений сопротивлений. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что



Рис. 7. Экспериментально полученные кривые напряжения.

предварительный расчет проведен достаточно точно, кривые напряжения, построенные в ходе расчета, соответствуют экспериментально полученным кривым.

Для проверки эффективности предлагаемой методики были проведены измерения характеристик ЧР в опорном изоляторе ИОР-10. Результаты измерений представлены на рисунке Рис. 8. На осциллограмме легко можно различить, как импульсы внешних помех, являющиеся синфазными, так и импульсы частичных разрядов, находящихся в противофазе.

Для организации непрерывного мониторинга состояния изоляции в режиме онлайн в измерительную диагональ мостовой схемы регистрации ЧР может быть включен высокочастотный (ВЧ) трансформатор Рис. 9, Рис. 10, минимизирующий влияние внешних помех. Для надежной и корректной работы ВЧ трансформатора необходимо, чтобы токи внешних помех, проходящие через измерительные элементы в схеме измерения ЧР, создавали на них импульсы напряжения, равные как по абсолютному значению, так и по фазе. В этом случае, разность потенциалов на выводах первичной обмотки ВЧ трансформатора, при прохождении по измерительным элементам токов внешних помех, отсутствует или оказывается меньше разности потенциалов, формируемых на той же обмотке токами ЧР Рис. 11. При возникновении ЧР в изоляции на входе измерительного устройства наблюдается импульс, соответствующий кающемуся заряду частичного разряда, который существенно больше импульса, создаваемого токами внешних помех.



Рис. 10. Высокочастотный трансформатор.

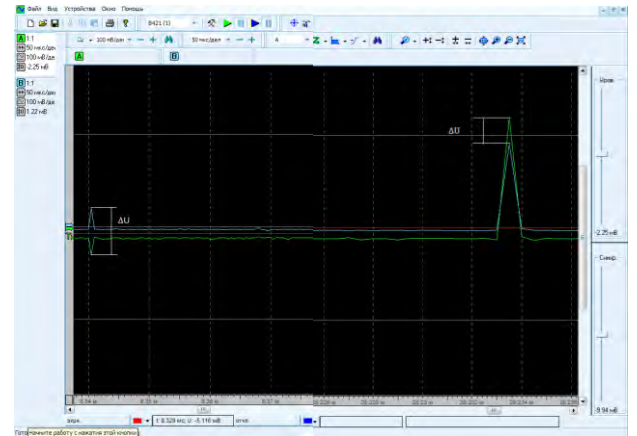


Рис. 11. Разность потенциалов на первичной обмотке ВЧ трансформатора в случаях протекания тока ЧР и тока внешних помех.

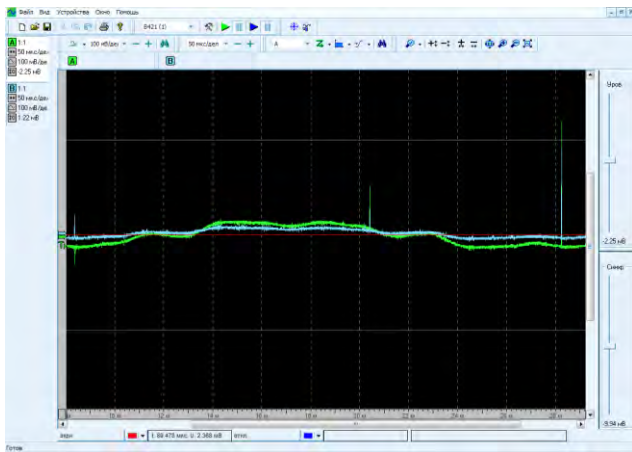


Рис. 8. Измерение кажущегося заряда в изоляторе ИОР-10.

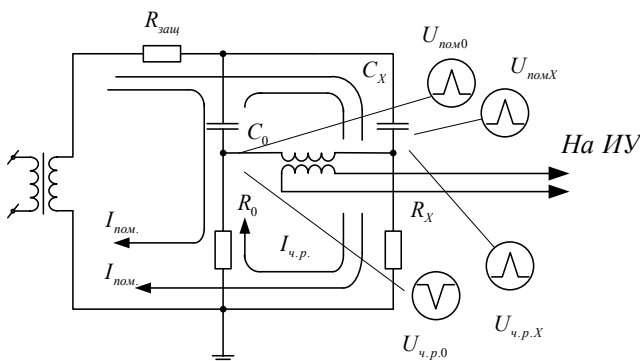


Рис. 9. Включение ВЧ трансформатора в измерительную диагональ моста.

Применение мостовой схемы значительно повышает помехоустойчивость и помехозащищенность средств регистрации и измерения ЧР в условиях эксплуатации, но при этом эффективность регистрации ЧР на фоне внешних электромагнитных помех существенно зависит от точности настройки схемы. Подбор варьируемых параметров путем их последовательной замены занимает много времени и не всегда позволяет определить точное значение величин измерительных элементов, поэтому для упрощения процедуры настройки рекомендуется проводить предварительный расчет переходного процесса в схеме регистрации ЧР. Для организации непрерывного контроля состояния изоляции высоковольтного оборудования в измерительную диагональ моста может быть включен ВЧ трансформатор, с помощью которого при соответствующей настройке схемы измерения ЧР можно значительно уменьшить влияние внешних помех на результаты измерения. Все вышеуказанные мероприятия по оптимизации мостовой схемы регистрации и измерения ЧР позволяют повысить эффективность измерения ЧР в изоляции в условиях эксплуатации, а также сократить их продолжительность.

ПОДАВЛЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА КАБЕЛИ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

С.А. Занкович

Новосибирский Государственный Технический Университет
г. Новосибирск, Российская Федерация
zankovichsergey@mail.ru

Аннотация — Рассматриваются аппаратные меры по подавлению высокочастотных перенапряжений, воздействующих на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. В качестве аппаратных мер могут быть применены силовой реактор и конденсатор связи, используемые в каналах высокочастотной связи, а также специально разработанное в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) частотозависимое устройство.

Ключевые слова — кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена; высокочастотные перенапряжения; частотозависимое устройство, силовой реактор, конденсатор связи.

Suppression of high frequency overvoltages, affecting the cables with XLPE insulation

Sergej Zankovich

Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation
zankovichsergey@mail.ru

Abstract — High-frequency surges suppression measures affecting the XLPE insulated power cable are considered. As suppression measures can be applied high power reactor and coupling capacitor used in high-frequency carrier channels, as well as the frequency-dependent device designed in Novosibirsk State Technical University (NSTU).

Keywords — XLPE insulated power cable; high-frequency overvoltage; frequency-dependent device, a power reactor, a coupling capacitor.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в отечественном электросетевом комплексе все большее применение находят кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (КСПЭ) высокого напряжения (ВН). Наряду с очевидными преимуществами по отношению к маслонаполненным кабелям кабели нового поколения в силу специфики диэлектрической среды (в виде твердого диэлектрика) весьма чувствительны к высокочастотным (ВЧ) перенапряжениям. При неоднократном воздействии, например грозовых перенапряжений, внутри СПЭ могут образовываться электрические триинги, которые способствуют более интенсивной деградации изоляционной системы кабеля. Наличие в схемах с кабельными вставками защитных аппаратов – нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) позволяет ограничить уровень грозовых перенапряжений, но не позволяют уменьшить крутизны импульсных перенапряжений.

II. ИЗОЛЯЦИОННАЯ СИСТЕМА КСПЭ ВН

В процессе эксплуатации, передачи и распределения электроэнергии, на кабели с изоляцией из твёрдых диэлектриков воздействуют перенапряжения, а также тепловые и механические воздействия. При работе энергосистемы возникает большое количество коммутационных перенапряжений [1].

Надёжность эксплуатации (электрическая прочность) КСПЭ и срок их службы зависит от интенсивности старения изоляции – сшитого полиэтилена. Экспериментальные исследования показали, что старение СПЭ при воздействии электрического поля определяется наличием неоднородностей в изоляции, свойственных самому полиэтилену в исходном состоянии и возникающих в процессе изготовления КСПЭ. При наличии в СПЭ таких неоднородностей в полимерной изоляции начинают развиваться в процессе эксплуатации проводящие каналы - триинги, которые в силу природы их образования можно разделить на два типа: триинги

электрического происхождения (ЭТ) и водные триинги (ВТ) электрохимического происхождения.

ЭТ (рис. 1.) возникают и развиваются при воздействии переменного тока и импульсов высокого напряжения. Они образуются в местах повышенной напряженности электрического поля, при которой не происходит немедленного пробоя изоляции, но происходит ионизация газовой оболочки. При относительно низких напряженностях электрического поля ЭТ образуются при длительной эксплуатации и приводят к заметному возрастанию уровня частичных разрядов (ЧР) в изоляции кабеля, поэтому при отсутствии полости определенного размера ЭТ развиваются достаточно медленно и могут не оказывать влияния на работоспособность КСПЭ.

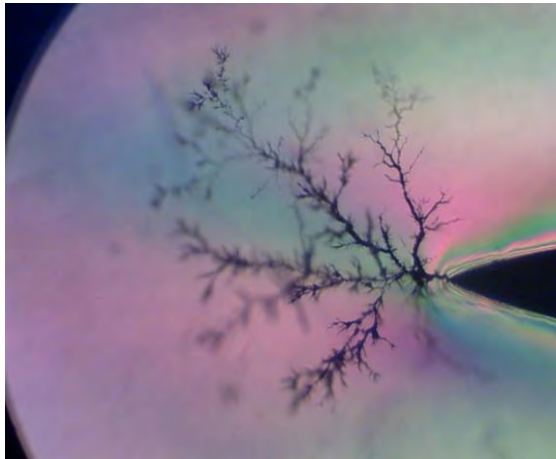
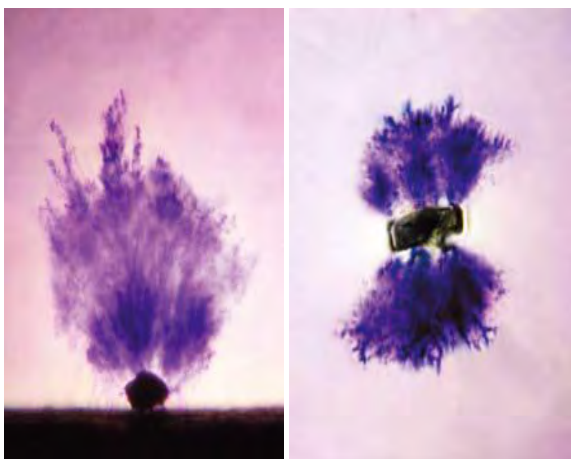


Рис. 1. Пример развития ЭТ (Исследования д.т.н., проф. Лебедева С.М. лаборатория «Полимер», НИИ ВН ТПУ)

Снижение электрической прочности КСПЭ за счет образования в изоляции ВТ связано с проникновением в изоляцию кабеля влаги, которая проникает в изоляцию как в результате процесса диффузии через полиэтиленовую защитную оболочку, так и через дефекты в оболочке изоляции под действием электрического поля. Исследования показали, что в целом проникновение воды в полимер зависит от температуры, напряженности электрического поля, типа и количества ионов, содержащихся в воде. В отличие от ЭТ каналы ВТ значительно меньше, и сами триинги имеют характерные формы – типа "бант" (рис. 2., а) или "веер" (рис. 2., б) [1-2].



а) б)
Рис. 2. Примеры развития ВТ

Общее для триингов переменного тока это быстрый темп развития триинга с момента их образования и до пробоя изоляции [3].

Главной особенностью СПЭ-изоляции является её чувствительность к воздействию высокочастотных перенапряжений, что обусловлено при резком вводе энергии в твердый диэлектрик разрывом связей на молекулярном уровне между молекулами углерода и водорода в местах повышенной напряженности электрического поля, например, на кончике триинга, где напряженность электрического поля (E_T) на один два порядка может превышать среднюю напряженность (E_{cp}) в СПЭ-изоляции (рис. 3.). Это приводит к изменению структуры и физико-механических свойств СПЭ и возникновению внутри его новых микрополостей, которые способствуют дальнейшему развитию ЭТ в толще твердого диэлектрика в виде дендрита – древовидного образования, имеющего повышенную проводимость и приводящего к прогрессирующему разрушению диэлектрика [4].

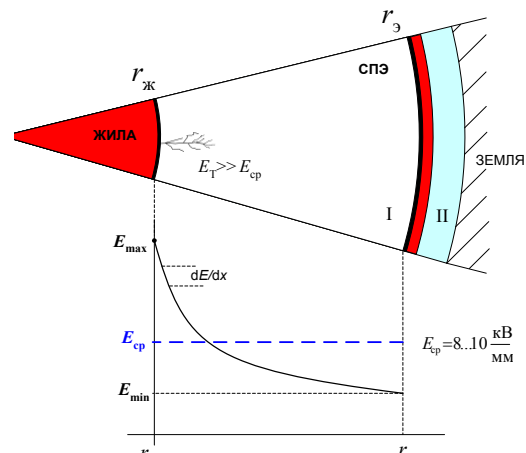


Рис.3. К анализу электрической прочности изоляционной системы КСПЭ

Следует отметить, что с ограничением уровня грозовых перенапряжений успешно справляются современные защитные аппараты типа ОПН и при правильном выборе на стадии проектирования их параметров и взаимного расположения с защищаемым оборудованием проблем по обеспечению надежной эксплуатации электротехнического оборудования ВН, как правило, не возникает. Вместе с тем, ОПН не могут повлиять на крутизну фронта воздействующих грозовых перенапряжений, они ограничивают лишь амплитуду перенапряжений. Из всего вышесказанного вытекает, что для обеспечения надежной эксплуатации КСПЭ, а также для повышения ресурса их эксплуатации необходимо, в том числе, снизить крутизну нарастания воздействующих импульсных грозовых перенапряжений.

III. АППАРАТНЫЕ МЕРЫ ЗАЩИТЫ КСПЭ И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Уменьшение крутизны импульсных перенапряжений, воздействующих на КСПЭ, можно осуществить с помощью различных аппаратных мер. Например, при подключении в месте сопряжения ВЛ и КСПЭ таких аппаратов как:

- разработанного в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) частотозависимого

устройства (ЧЗУ) с использованием явления скин-эффекта. ЧЗУ выполнен в виде триода с высотой 1,5 м и диаметров в 1 м рис. 4;

- силовой реактор (СР) - высокочастотного заградителя, применяемого в каналах высокочастотной связи;
- конденсаторов связи (КС);
- комбинированное применение СР и КС;
- установка на ближайших опорах ВЛ от кабельной ставки линейных защитных аппаратов.

Первые четыре меры за счет реактивности аппаратов позволяют затянуть фронт импульсных перенапряжений, а установка на опорах линейных (подвесных) защитных аппаратов исключает появления срезанных грозовых волн и волн обратных перекрытий в непосредственной близости от кабельной вставки.



Рис. 4. Примеры установки ЧЗУ на подстанции с напряжением 110 кВ Ноябрьских электрических сетей ОАО «Тюменьэнерго»

На основе компьютерного моделирования был проведен численный анализ эффективности аппаратов по увеличению длины фронта импульсных перенапряжений, воздействующих на изоляционную систему КСПЭ, в простейшей схеме рис.5.

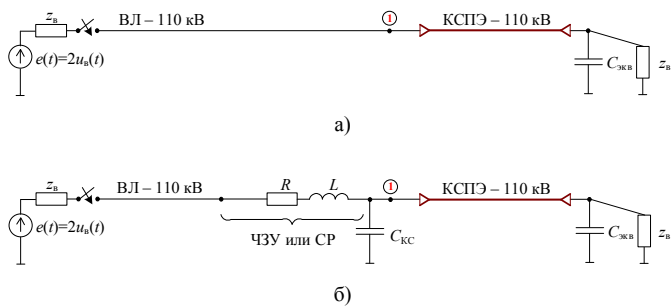


Рис. 5. Исследуемые схемы

а - неограниченные грозовые перенапряжения, б - при наличии защитных аппаратов способных сгладить фронт нарастающего импульса

При воздействии стандартного грозового импульса $\tau_{\phi}/\tau_{н}=1,2/50$ мкс с амплитудой 700 кВ и длиной кабельной ставки 600 м были получены осциллограммы

перенапряжений, приведённые на рис. 6. Остальные параметры схемы:

- Ёмкость одного модуля КС: $C = 6,4$ нФ;
- Индуктивность и активное сопротивление одного модуля СР: $R = 0,57$ Ом, $L = 1,0$ мГн;
- Индуктивность и активное сопротивление ЧЗУ: $R = 96,4$ Ом, $L = 2,5$ мГн;
- Эквивалентная ёмкость оборудования подстанции: $C_{\text{эв}} = 4740$ пФ;
- Волновое сопротивление отходящей линии: $Z_B = 517$ Ом

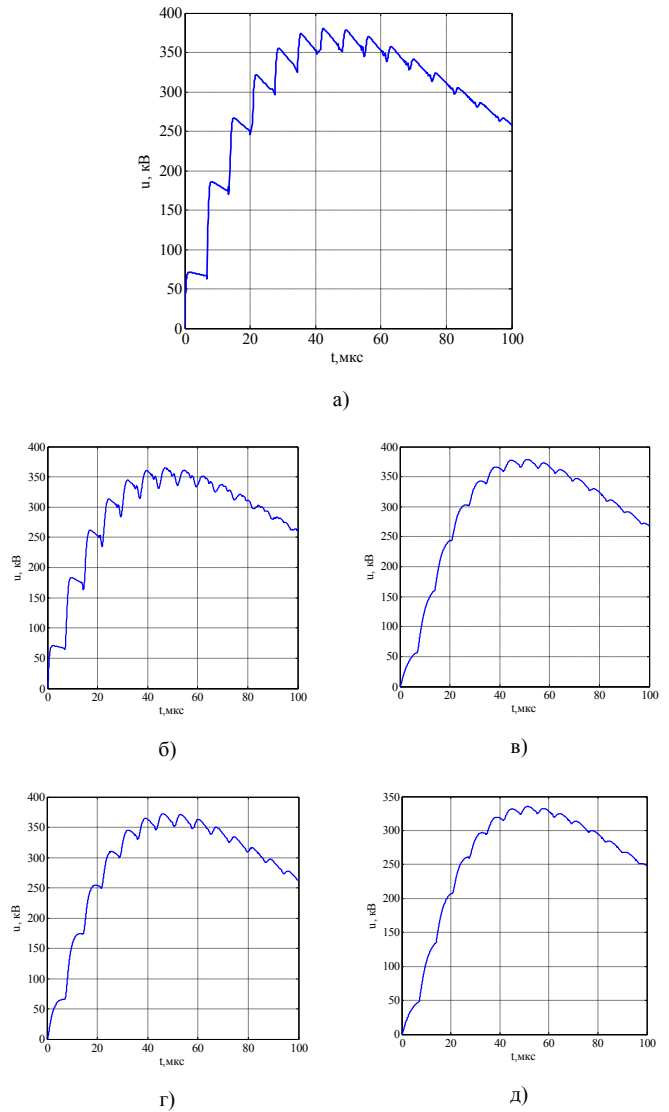


Рис. 6. Осциллограммы перенапряжений в начале кабельной вставки а - неограниченные грозовые перенапряжений, б - при наличии двух модулей КС, в - при наличии двух модулей СР, г - при совместной эксплуатации КС и СР, д - при наличии ЧЗУ

При воздействии срезанного импульса с $\tau_{\phi}=2$ мкс и амплитудой 1050 кВ, при длине кабельной ставки 600 м также были получены осциллограммы перенапряжений, приведённые на рис. 7. Стоит отметить, что для класса напряжения 110 кВ характерны именно срезанные волны.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ВЧ перенапряжения, воздействующие на изоляционную систему КСПЭ, снижают срок эксплуатации кабеля.

Для повышения срока службы КСПЭ необходимо подавлять ВЧ перенапряжения с помощью различных аппаратных мер.

Результаты численных исследований показали, что наиболее эффективной мерой по подавлению ВЧ перенапряжений является ЧЗУ, которое позволяет уменьшить скорость нарастания напряжения примерно в 5-6 раз.

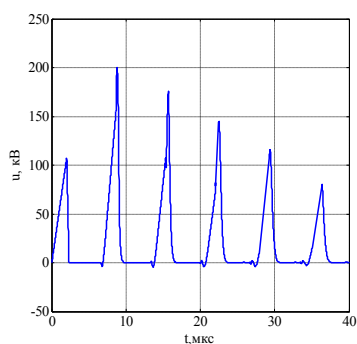
Наряду с ЧЗУ можно также рекомендовать для подавления ВЧ перенапряжений применение двух модулей СР, имеющих суммарную индуктивность 2 мГн.

Список литературы

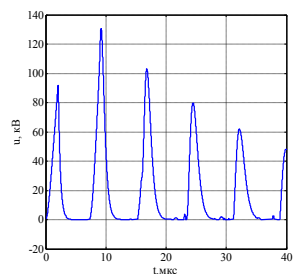
- [1] М.Ю. Шувалов, Ю.В. Образцов, В.Л. Овсиенко, П.Ю. Удовичкий, А.С. Мнека. Развитие водных триингов в экструдированной кабельной изоляции как электрический эффект ребиндера / журнал наука и техника, №4 (299) 2006.
- [2] Кадомская К.П., перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник/ К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, А.А. Рейхердт. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 368 с.
- [3] F. Mauseth, E. Ildstad, M. Ytterstad, R. Hegerberg, B. Sanden, M. Jeroense and J. E. Skog. Quality control of hvdc extruded cables: electrical treeing in XLPE under different voltage stresses/ Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering Copyright, 2009 SAIEE, Innes House, Johannesburg.
- [4] Кадомская К.П. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы: монография/ К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, О.И. Лаптев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 343 с. (Серия “Монографии НГТУ”).

References

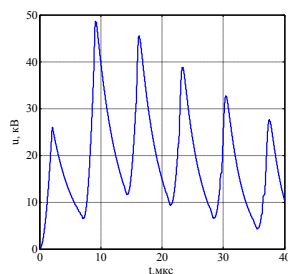
- [1] M.Ju. Shuvalov, Ju.V. Obratcov, V.L. Ovsienko, P.Ju. Udovickij, A.S. Mneka. Razvitie vodnye triingi v jekstrudirovannoj kabel'noj izoljicii kak jelektricheskij jeffekt rebintera [water treeing development in extruded cable insulation as Rebinder electric effect], zhurnal nauka i tehnika, issue 4 (299) 2006.
- [2] Kadomskaja K.P., perenaprzazhenija v jelektricheskix setjah razlichnogo naznachenija i zashhita ot nih: Uchebnik [overvoltages in an electrical power system of different purposes and overvoltage protection], K.P. Kadomskaja, Ju.A. Lavrov, A.A. Rejherdt. - Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2006, pp. 368.
- [3] F. Mauseth, E. Ildstad, M. Ytterstad, R. Hegerberg, B. Sanden, M. Jeroense and J. E. Skog. Quality control of hvdc extruded cables: electrical treeing in XLPE under different voltage stresses. Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering Copyright, 2009 SAIEE, Innes House, Johannesburg.
- [4] Kadomskaja K.P. Jelektrooborudovanie vysokogo naprjazhenija novogo pokolenija. Osnovnye harakteristiki i jelektromagnitnye procesy [High Voltage Electric Equipment of a New Generation. Basic Characteristics and Electromagnetic Processes], monografija: K.P. Kadomskaja, Ju.A. Lavrov, O.I. Laptev. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2008, pp. 343 (Serija “Monografii NGTU”).



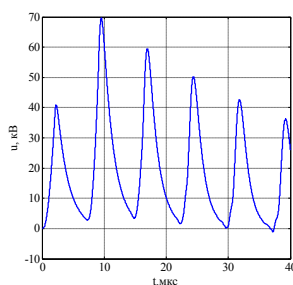
а)



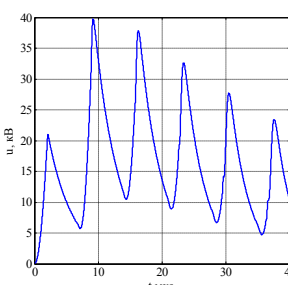
б)



в)



г)



д)

Рис. 7. Осциллограммы перенапряжений в начале кабельной вставки

а – неограниченные грозовые перенапряжений, б – при наличии двух модулей КС, в – при наличии двух модулей СР, г – при совместной эксплуатации КС и СР, д – при наличии ЧЗУ

Результаты численных исследований были сведены в табл. 1.

Таблица 1

Полученные результаты

При воздействии стандартного грозового импульса					
	Без защиты	2 КС	2 СР	КС и СР	ЧЗУ
U_{max} , кВ	380	365	380	375	335
v_{max} , кВ/мкс	85	60	16	16	14
$\frac{V_{max без защиты}}{V_{max}}$, о.е.	1	1,42	5,31	5,31	6,07
При воздействии стандартного грозового импульса					
	Без защиты	2 КС	2 СР	КС и СР	ЧЗУ
U_{max} , кВ	200	130	49	70	40
v_{max} , кВ/мкс	100	65	21	35	18
$\frac{V_{max без защиты}}{V_{max}}$, о.е.	1	1,54	4,76	2,86	5,56

Примечание: U_{max} – максимальная амплитуда ВЧ перенапряжения; v_{max} – максимальная скорость нарастания напряжения, при ВЧ перенапряжении.

Превентивное управление на ГЭС с позиции применения системы поддержки принятия решений

Ю.А. Секретарев, Я.В. Панова
Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия
pjv92@yandex.ru

Статья посвящена принципам формирования интеллектуальной системы поддержки принятия решений на ГЭС. Ключевой задачей при принятии решений является точное объективное предоставление информации о текущей ситуации. Показано, как можно представлять информацию об объектах в виде функций принадлежности, а также, пользуясь некоторыми положениями теории нечетких множеств, определять приоритет параметров оборудования Новосибирской ГЭС.

Ключевые слова — ГЭС, оперативное управление, интеллектуальные системы, нечеткий интервал, генератор.

The Preventive Control of Hydro Power Plant on Based Decision-making Applied

Yuriy Secretarev, Yana Panova
Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia
pjv92@yandex.ru

Abstract — This article is devoted of the principles of constructing the decision support information system at the hydroelectric power plants. It's assumed that the fuzzy sets theory will be used for the representation of the information about the aggregates operating condition parameters. The paper reflects of this approach advantages. The calculations were made for the equipment (Novosibirskaya HPP, Hydro Power Plant). This method is suggested for preventive control of hydro power plant. The results obtained are intended for solving the HPPs operational control problems.

Keywords — HPP, fuzzy sets, the hydrounit, dispatching control.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в энергетике все большее внимание уделяется возобновляемым источникам энергии, одним из которых являются водные ресурсы. ГЭС обладают рядом преимуществ по сравнению с другими электростанциями. Среди них – экологичность выработки электроэнергии, а также высокая маневренность. Именно эта особенность ГЭС обеспечивает покрытие пиков нагрузки энергосистемы, что делает эти станции незаменимыми при выполнении графика нагрузки. Однако постоянная смена вырабатываемой мощности в широких пределах осложняет работу гидроэлектростанции, так как требует быстроты принятия решений от дежурного персонала. Ответственность в данной ситуации берет на себя лицо, принимающее решения (ЛПР), например, начальник смены на ГЭС. Отсюда вытекает актуальность данного вопроса – а именно, необходимость разработки системы отслеживания эксплуатационных характеристик гидроблока и их наглядное представление для обеспечения быстроты и правильности принятия решений.

II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЭС НА БАЗЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Под поддержкой принятия решений в широком смысле понимают всевозможную помощь пользователю в процессе его работы. В узкоспециальном смысле этот термин предполагает подход к решению задачи пользователя как к управленческой и в конечном итоге означает выбор вариантов решения задач пользователя.

Системы поддержки принятия решений (СППР) - это компьютерные системы, почти всегда интерактивные, разработанные, чтобы помочь ЛПР в принятии решений. СППР включают и данные, и модели, чтобы помочь принимающему решения решить проблемы, особенно те, которые плохо формализованы.

Автоматизированная поддержка принятия решений в широком смысле означает выполнение хотя бы одной из следующих функций:

1. Предоставление справочной информации без автоматического формирования запросов к базам данных.

2. Предоставление справочной информации с автоматическим формированием запросов к базам данных и привязкой к условиям решаемой задачи.
3. Графическая визуализация получаемой справочной информации и информации о способах принятия решений.
4. Предоставление рекомендаций по формированию решений.
5. Сужение пространства поиска решения пользователем.
6. Выбор и рекомендации наиболее приемлемых решений с учетом рангов.
7. Моделирование последствий принятия решений.

Таким образом, система поддержки принятия решений может служить для помощи дежурному персоналу в режиме «советчика». Построение режима «советчика» возможно только при помощи автоматики с предупредительной сигнализацией. Действие такой автоматики основывается на том, что срабатывание происходит при одном значении уставки, а отключение – при дальнейшем ухудшении показателя до другого значения уставки. В соответствии с этим, математическим аппаратом для описания эксплуатационных параметров оборудования вполне может служить теория нечетких множеств.

Основные функции СППР заключаются в мониторинге текущего состояния оборудования и предоставлении информации о нем. В соответствии с теорией нечетких множеств, все параметры работающего оборудования станции можно представить в виде нечеткого интервала (рис. 1) [1].

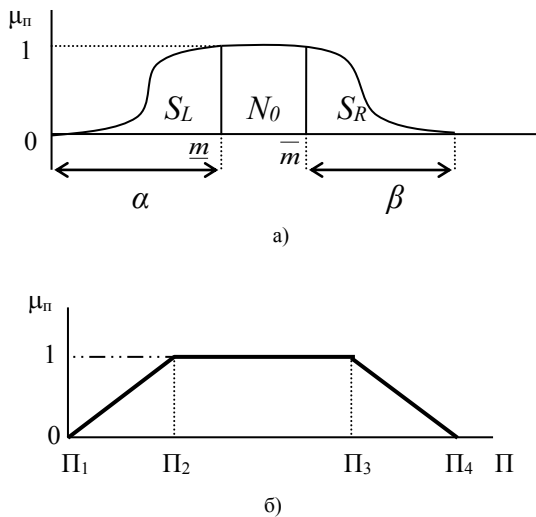


Рис. 1. Нечеткий интервал:
а) – общий вид; б) – линейризованный вид

Параметрическое описание такого интервала можно представить в виде следующих параметров: $N = (\underline{m}, \bar{m}, \alpha, \beta)$, где: \underline{m} – нижнее модальное значение нечеткого интервала N ; \bar{m} – верхнее модальное значение нечеткого интервала N ; α – левый коэффициент нечеткости; β – правый коэффициент нечеткости. Функция $\mu(\Pi)$, описывающая нечеткий интервал, называется функцией принадлежности.

На рисунке 1, б значения $\underline{m} = \Pi_2$ и $\bar{m} = \Pi_3$ ограничивают область нормальных значений какого-либо эксплуатационного параметра оборудования станции, а

значения $\Pi_1 = \Pi_2 - \alpha$ и $\Pi_4 = \Pi_3 + \beta$ расширяют эту область до области допустимых значений. По известным формулам эти значения переводятся в относительные (безразмерные), что позволяет сравнивать различные нечеткие интервалы [2]. Также вполне допустимо отсутствие одного из коэффициентов нечеткости. Тогда, все возможные виды нечеткого интервала представим на рисунке 2.

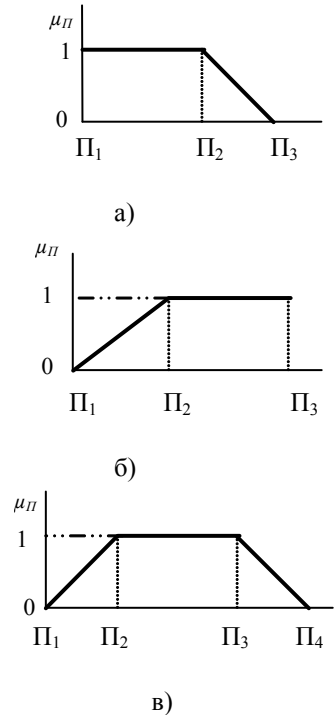


Рис. 2. Виды нечетких интервалов, описывающие изменение контролируемого параметра Π гидроагрегата: а) невозрастающий интервал, б) неубывающий интервал, в) трапециевидный интервал

После получения нечеткого интервала можно переходить к относительным единицам. Для этого используются следующие формулы [2]:

– для интервалов первого типа (рис. 2,а) параметры его описания могут быть представлены следующим образом:

$$\underline{m}^* = \frac{\Pi_1}{\Pi_1} * 100\% \quad \bar{m}^* = \frac{\Pi_2}{\Pi_1} * 100\% \quad \beta^* = \frac{\Pi_3}{\Pi_1} * 100\% - \bar{m}^* \quad (1)$$

– для нечетких интервалов второго типа (рис. 2,б) параметры пересчитываются так:

$$\underline{m}^* = \frac{\Pi_2}{\Pi_3} * 100\% \quad \bar{m}^* = \frac{\Pi_3}{\Pi_3} * 100\% \quad \alpha^* = \underline{m}^* - \frac{\Pi_1}{\Pi_3} * 100\% \quad (2)$$

– нечеткий интервал третьего типа (рис. 2,в) представляется как совокупность интервалов первого и второго типа. Формулы унифицированного пересчета для интервала второго типа (рис. 2,б) остаются теми же самыми, а для нечеткого интервала первого типа в выражение (1) вводятся следующие коррективы:

$$\Pi_1 = \Pi_2; \quad \Pi_2 = \Pi_3; \quad \Pi_3 = \Pi_4. \quad (3)$$

Представим некоторые примеры получения нечетких интервалов и их функций принадлежности оборудования Новосибирской ГЭС.

1. Показатель температуры охлаждающего воздуха статора генератора:

- нормальное состояние: 15-35 °С;
- предельное значение: 40 °С.

Вид интервала – невозрастающий, следовательно, применим формулы (1):

$$\underline{m}^* = \frac{P_1}{P_1} * 100\% = \frac{15}{15} * 100 = 100;$$

$$\beta^* = \frac{P_3}{P_1} * 100\% - \underline{m}^* = \frac{40}{15} * 100 - 233,33 = 33,34$$

$$\overline{m}^* = \frac{P_2}{P_1} * 100\% = \frac{35}{15} * 100 = 233,33$$

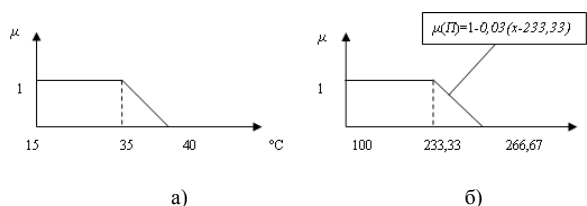


Рис. 3. Получение функции принадлежности для увеличения температуры охлаждающего воздуха статора генератора: а) – в номинальных единицах (С°), б) – в относительных единицах

Где функция принадлежности имеет общий вид $\mu(\Pi) = kx + b$, тогда:

$$k = \frac{1}{266,67 - 233,33} = 0,03$$

Подставим в выражение точку (233,33;1) и получим:

$$1 = 0,03 \cdot 233,33 + b;$$

$$b = 1 - 0,03 \cdot 233,33 = -6.$$

Тогда функция принадлежности имеет вид:

$$\mu(\Pi) = 0,03x - 6 \text{ или } \mu(\Pi) = 1 - 0,03(x - 233,33).$$

2. Обрыв цепи управления выключателем трансформатора:

- нормальное состояние: 140-220 В;
- предельное значение: 40 В;
- вид интервала – неубывающий, применим формулы (2).

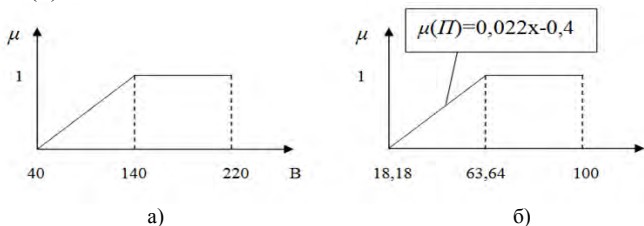


Рис. 4. Получение функции принадлежности для обрыва цепи управления выключателем трансформатора: а) – в номинальных единицах (В), б) – в относительных единицах

3. Давление в гидроаккумуляторе МНУ:

- нормальное состояние: 22,5-25 кгс/см²;
- предельное значение: не ниже 16,5 и не выше 25,6 кгс/см²;
- вид интервала – трапецевидный, применим формулы (1) - (3).

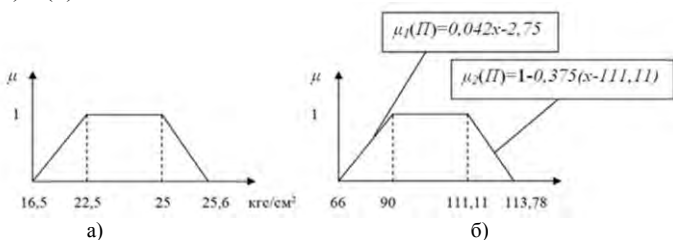


Рис. 5. Получение функции принадлежности для давления в маслонаполненной установке гидроаккумулятора: а) – в номинальных единицах (кгс/см²), б) – в относительных единицах

III. ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Для реализации превентивного управления на ГЭС при построении СППР на станции необходимо реализовать процесс отслеживания и контроля текущего эксплуатационного состояния установленного на ней оборудования с позиции ситуационного подхода. Процесс оценивания контролируемых параметров оборудования должен проходить в несколько этапов:

1. Получение «базовых» оценок оборудования $V(\Pi_i)$ – своего рода «важности» или «веса» контролируемого параметра, который не зависит от текущей ситуации, а зависит только от степени ответственности контроля этого параметра.
2. Получение «текущих» оценок оборудования $T(\Pi_i)$ – оценка состояния контролируемого параметра оборудования в режиме реального времени.
3. Определение «результатирующих» оценок $J(\Pi_i)$ путем наложения «базовых» оценок на «текущие».

Получение текущей оценки сводится, по сути, к отысканию функции принадлежности исследуемого параметра в данный момент времени и подробно описан выше.

Получение текущей оценки сводится, по сути, к отысканию функции принадлежности исследуемого параметра в данный момент времени и подробно описан выше.

Принцип получения базовой оценки основывается на методе парных сравнений и состоит в следующем: для упорядочения множества, состоящего из n нечетких интервалов $\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ можно использовать способ нечетких отношений, полученных попарным сравнением интервалов N_i . Следуя ему, можно утверждать, что интервал N_i превосходит наибольший из оставшихся интервалов N_j ($j=1 \dots n, j \neq i$), если построить четыре показателя превосходства (рис. 3) [2]:

$\text{Pos}(\overline{Y}_1 \geq \overline{Y}_2)$ – возможность того, что наибольшие значения параметра Y_1 будут по меньшей мере равны наименьшим значениям параметра Y_2 ;

$\text{Pos}(\overline{Y}_1 > \overline{Y}_2)$ – возможность того, что наибольшие значения параметра Y_1 будут больше наименьших значений параметра Y_2 ;

$\text{Nec}(Y_1 \geq Y_2)$ – необходимость того, что наименьшие значения параметра Y_1 будут по меньшей мере равны наименьшим значениям параметра Y_2 ;

$\text{Nec}(Y_1 > Y_2)$ – необходимость того, что наименьшие значения параметра Y_1 будут больше наибольших значений параметра Y_2 .

Тогда множество $\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ можно упорядочить по значениям каждого из этих показателей.

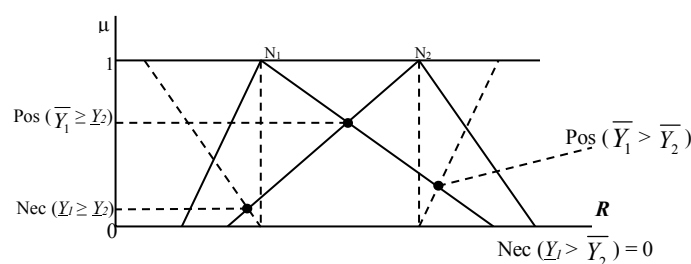


Рис. 6. Сравнение нечетких интервалов

Исследования показали, что процедуру расчета можно упростить [4] и перейти к выражениям вида:

1. Для невозрастающих нечетких интервалов:

$$Pos(\bar{Y}_1 > \bar{Y}_2) = Pos_{1-2} = (\bar{m}_1 - \bar{m}_2 + \beta_1) / (\beta_1 + \beta_2)$$

Исходя из требований принадлежности меры возможности в пределах $[0; 1]$, получим:

$$Pos_{1-2} = \max(0, \min(1, (\bar{m}_1 - \bar{m}_2 + \beta_1) / (\beta_1 + \beta_2))) \quad (4)$$

2. Для неубывающих нечетких интервалов:

$$Pos(\underline{Y}_1 \geq \underline{Y}_2) = 1 - Nec(\underline{Y}_1 \geq \underline{Y}_2), \quad (5)$$

где $Nec(\underline{Y}_1 \geq \underline{Y}_2) = \max(0, \min(1, (\underline{m}_1 - \underline{m}_2 + \alpha_2) / (\alpha_1 + \alpha_2)))$.

3. Трапецевидные интервалы разбиваются на неубывающий и невозрастающий и рассчитываются по формулам (4) и (5).

В качестве примера представим ряд базовых оценок для гидрогенератора, установленного на Новосибирской ГЭС. Сравнительный анализ был произведен для десяти параметров генератора.

ТАБЛИЦА I. БАЗОВЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОГЕНЕРАТОРА НОВОСИБИРСКОЙ ГЭС

№ п/п	Параметр	Мера/ранг
1	Симметричные перегрузки	0,011/7
2	Несимметричные перегрузки	0,091/6
3	Температура железа выше нормы	0,432/2
4	Температура меди выше нормы	0,432/2
5	Температура горячего воздуха	0,243/4
6	Перегрузка ротора	0,257/5
7	Температура масла в ванне ПП выше нормы	0,5/3
8	Отклонился (увеличился) уровень масла в ванне ПП	0,006/8
9	Температура масла в ванне ПШ выше нормы	0,5/3
10	Увеличение вибрации боя вала	0,526/1

Результирующая оценка эксплуатационного состояния оборудования формируется путем наложения текущей оценки на базовую.

IV. ПРЕВЕНТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НА ГЭС С ПОЗИЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Представление эксплуатационных параметров в виде нечеткого интервала позволяет рассматривать СППР с позиции превентивного управления станцией. Рассмотрим этот процесс схематично (рис. 7).

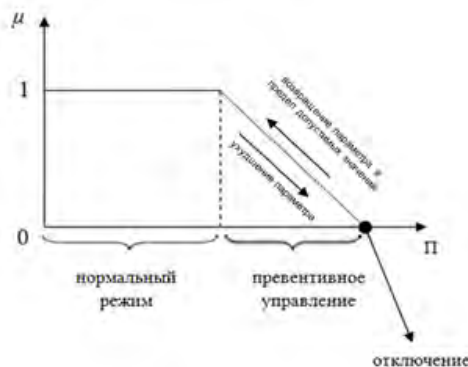


Рис. 7. Процесс превентивного управления на ГЭС

Таким образом, превентивное управление позволяет обнаружить отклонение на ранней стадии (при соответствующем информационном обеспечении), сформировать управляющее воздействие и своевременно его реализовать, предотвратив отключение элемента [2].

Из всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что превентивное управление невозможно в случае применения защит с мгновенным срабатыванием. Значит, разрабатываемая система актуальна для реализации процесса превентивного управления, так как использует защиты с предупредительной сигнализацией.

V. ВЫВОДЫ

Рассмотрен процесс принятия решения на гидроэлектростанции. Обозначены проблемы, с которыми сталкивается ЛПР при принятии решений, на основании чего было предложено решение – а именно, создание интеллектуальной системы поддержки принятия решений СППР, которая в режиме «советчика» информирует ЛПР о текущем состоянии эксплуатационных характеристик работающего на станции оборудования.

Доказана необходимость использования СППР в контуре оперативного управления ГЭС. Предложен метод формирования информационной базы на основе теории нечетких множеств, и, в частности, такого инструмента, как функция принадлежности. Это позволяет представить параметры оборудования станции в безразмерном пространстве и произвести их ранжировку с целью определения наиболее приоритетных. Важно, что полученные результаты основаны на объективных данных карт уставок РЗиА гидроэлектростанций.

Список литературы

- [1] Дюбуа, Д. Теория возможностей. Приложение к представлению знаний в информатике / Д. Дюбуа, А. Прад. – М.: Радио и связь, 1990. – 322 с.
- [2] Секретарев, Ю.А. Ситуационное управление составом гидроагрегатов на гидроэлектростанциях: монография / Ю.А. Секретарев, А.А. Жданович, К.Ю. Мосин. – Саяногорск; Черемушки: Сибирский федеральный ун-т; Саяно-Шушенский филиал, 2013. – 152 с.
- [3] Панова Я. В. Исследование возможности интеллектуального анализа данных о состоянии гидроагрегата / Я. В. Панова, А. А. Жданович // Гидроэлектростанции в XXI веке : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф., Саяногорск, 2014 г. - Саяногорск, 2014. - с. 249-254.
- [4] Секретарев, Ю.А. Исследование параметров эксплуатационной надежности гидроагрегата с помощью теории нечетких множеств / Ю.А. Секретарев, А.А. Жданович // Научный вестник НГТУ. – 2010. - № 1.

References

- [1] D. Dubois. Theory of opportunities. Application to representation knowledge at computer science / D. Dubois, A. Prades. - M. : Radio and Communications, 1990. -322 p.
- [2] Y. Sekretarev. The situated management staff units at hydroelectric power stations: monograph / Y. Secretary, A. Zhdanovich, K. Mosin. - Sayanogorsk; Cheremushki: Siberian Federal University Press; Sayano-Shushenskaya branch, 2013. - 152 p.
- [3] Y. Panova. The investigation of opportunity intellegient data of hydraulic unit state/ Y. Panova, A. Zhdanovich // Hydroelectric power in the twenty-first century: Conf., Sayanogorsk, 2014 - p. 249-254.
- [4] Y. Sekretarev. Investigation of the operational reliability parameters of the hydraulic unit, using the theory of fuzzy sets / Y. Secretary, A. Zhdanovich // Scientific Bulletin of the NSTU. - 2010. - № 1.

Гибридный источник электроэнергии на твердооксидных топливных элементах

Е.Н. Соснина, Е.В. Крюков, А.П. Шашкин, Л.Е. Веселов
НГТУ им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Аннотация — в статье описывается экспериментальный образец гибридного источника электроэнергии на основе твердооксидных топливных элементов, состоящий из системы генерирования электроэнергии, системы накопления, преобразователя распределения токов и активно-адаптивной системы управления. Разработка данного источника позволит решить проблему надежного бесперебойного электроснабжения, как автономных потребителей, так и потребителей, подключенных к централизованной электрической сети.

Ключевые слова — гибридный источник электроэнергии; ТОТЭ; аккумуляторная батарея; преобразователь

The hybrid electric power source based on solid oxide fuel cells

Elena Sosnina, Evgeniy Kryukov, Anton Shashkin, Leonid Veselov
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract — the article describes prototype of hybrid electric power source based on SOFC, which consists of a generation system, storage system, converter and the active-adaptive control system. The development of this source will solve the problem of reliable uninterrupted power supplying, as autonomous consumers and consumers that are connected to a centralized power supply.

Keywords — hybrid electric power source; SOFC; electricity; battery; converter

Основными требованиями, предъявляемыми к системам электроснабжения ответственных потребителей, являются высокая надежность, бесперебойность, высокое качество электроэнергии, безопасность, экономичность и экологичность. Источником электроэнергии, максимально удовлетворяющим данным требованиям, может стать энергоустановка (ЭУ) на основе топливных элементов (ТЭ) [1].

Важной особенностью ЭУ на основе ТЭ является использование принципа прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую энергию, минуя традиционные стадии преобразования (химическая – тепловая – механическая – электрическая) [2]. Топливо для электрохимической реакции подается в ТЭ извне [3]. Экономичность таких энергоустановок почти вдвое выше, чем у традиционных ЭУ, КПД может достигать 85% с учетом утилизации тепла. Из-за отсутствия непосредственного химического контакта топлива с окислителем количество вредных выбросов ЭУ на ТЭ почти в 100 раз ниже традиционных ЭУ.

Анализ характеристик существующих типов ТЭ показывает, что для широкомасштабного применения в энергетике наиболее перспективны ЭУ на базе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) [2,4].

В Нижегородском государственном техническом университете разрабатывается экспериментальный образец гибридного источника электроэнергии на основе твердооксидных топливных элементов, предназначенный для надежного бесперебойного электроснабжения, как автономных потребителей, так и потребителей, подключенных к централизованной электрической сети. В его состав входят:

- 1) система генерирования – электрохимический генератор на основе твердооксидных топливных элементов (ЭХГ на ТОТЭ);
- 2) система накопления на основе аккумуляторной батареи (АБ) и емкостного накопителя;
- 3) преобразователь распределения токов между элементами систем генерации, накопления и нагрузки;
- 4) активно-адаптивная система управления.

Основу электрохимического генератора составляют твердооксидные топливные элементы. Разрабатываемые технологические принципы изготовления модульного ЭХГ объединяют положительные свойства плоских и трубчатых элементов и позволяют получать новые потребительские свойства электрохимических устройств. Предлагаемая технология изготовления основы ТОТЭ позволяет снизить себестоимость на один-два порядка по сравнению с традиционной.

Система накопления электрической энергии, обеспечивающая повышенную мощность по сравнению с аккумуляторными батареями за счёт параллельного присоединения конденсаторов высокой ёмкости, включает преобразователь контроля, регулирования и перераспределения токов заряда/разряда аккумуляторов и конденсаторов. Преобразователь обеспечивает перераспределение токов элементов гибридного накопителя в зависимости от величины мгновенной мощности нагрузки. Аккумуляторные батареи реализованы на основе высокочастотных щелочных никель-кадмиевых аккумуляторов с безламельными электродами, которые в настоящее время являются наиболее перспективными для использования в составе систем автономного энергообеспечения и источниках бесперебойного питания. В батарее аккумуляторов происходит накопление электроэнергии из сети в период снижения нагрузки сети ниже номинального уровня и отдачи ее в сеть. В период возрастания нагрузки выше номинального уровня АБ отдает запасенную электроэнергию в сеть. Емкостный накопитель предназначен для компенсации кратковременных колебаний напряжения сети.

Активно-адаптивная система управления (ААСУ) преобразователем распределения токов между элементами гибридного накопителя включает программное и аппаратное обеспечение. Наличие ААСУ позволяет отнести разрабатываемое устройство к классу интеллектуальных гибридных источников энергии.

Список литературы

- [1] Сомов, С.И. Состояние исследований, разработок и практического применения твердооксидных топливных элементов / С.И. Сомов // Сборник статей «Твердооксидные топливные элементы и энергоустановки на их основе». – Черногоровка, 2010.

- [2] Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. / Н.В. Коровин. – М.: Издательство МЭИ, 2005. 280 с.
- [3] Хорошев В.Г. Разработка, изготовление и поставка опытного образца электрохимического генератора на основе высокотемпературных твердооксидных топливных элементов / В.Г. Хорошев // Сборник статей «Твердооксидные топливные элементы и энергоустановки на их основе». – Черногоровка, 2010.
- [4] Киселев И.В. Повышение энергетической эффективности твердооксидных топливных элементов и обоснование их применения для энергоснабжения потребителей малой мощности: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.14.01 / И.В. Киселев – ФГУП «Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», 2013.

References

- [1] Somov, S.I. Sostojanje issledovanij, razrabotok i praktičeskogo primenija tverdooksidnyh toplivnyh jelementov [The state of research, development and practical application of solid oxide fuel cells] / S.I. Somov // Sbornik statej «Tverdooksidnye toplivnye jelementy i jenergoustanovki na ih osnove». – Chernogolovka, 2010.
- [2] Korovin N.V. Toplivnye jelementy i jelektrohimičeskie jenergoustanovki [Fuel cells and electrochemical power plant] / N.V. Korovin. – M.: Izdatel'stvo MJEI, 2005. 280 s.
- [3] Horoshev V.G. Razrabotka, izgotovlenie i postavka opytnogo obrazca jelektrohimičeskogo generatora na osnove vysokotemperaturnyh tverdooksidnyh toplivnyh jelementov [The development, manufacture and delivery of a prototype electrochemical generator based on high-temperature solid oxide fuel cells] / V.G. Horoshev // Sbornik statej «Tverdooksidnye toplivnye jelementy i jenergoustanovki na ih osnove». – Chernogolovka, 2010.
- [4] Kiselev I.V. Povyshenie jenergetičeskoj jeffektivnosti tverdooksidnyh toplivnyh jelementov i obosnovanie ih primenija dlja jenergosnabženija potrebitelej maloj moshhnosti [Energy efficiency solid oxide fuel cells and justification of their application for power supply low power]: avtoreferat dis. ... kandidata tehničeskih nauk: 05.14.01 / I.V. Kiselev – FGUP «Rossijskij federal'nyj jadernyj centr Vserossijskij nauchno issledovatel'skij institut jeksperimental'noj fiziki», 2013.

Перспективы использования высоковольтных кабельных электропередач повышенной частоты в специальных электрических сетях

Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов

Ивановский государственный энергетический университет (ИГЭУ)

Иваново, Россия

sam@vetf.ispu.ru

Аннотация — Проведено исследование основных технико-экономических параметров высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты. Показано, что важнейшие элементы такой электропередачи, работающие совместно – силовой высоковольтный трансформаторов повышенной частоты и силовой полупроводниковый преобразователь обладают коэффициентом полезного действия более 98% и обладают значительно лучшими массо-габаритными характеристиками, чем элементы электропередач промышленной частоты. Исследования в данной области будут способствовать развитию локальных сетей электроснабжения промышленных предприятий в различных областях производства.

Ключевые слова — силовой высоковольтный трансформатор, кабельная линия электропередачи, повышенная частота

Prospects of using of high-voltage increased frequency power cable transmissions in the special electrical networks

T.E. Shadrikov, A.M. Sokolov

Ivanovo state power engineering university

Ivanovo, Russia

sam@vetf.ispu.ru

Abstract — Research of the basic technical and economic parameters of increased frequency power high voltage cable transmission was performed. It is shown that the essential elements of such a power, working together - the high voltage increased frequency power transformer and power semiconductor converters have efficiencies of more than 98% and have a much better weight and size characteristics than the elements of the electric power frequency. Research in this area will contribute to the development of local networks of power supply of various fields' production industrial enterprises.

Keywords — high-voltage increased frequency power transformer, power cable transmission, increased frequency

I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных направлений развития современной энергетики является разработки в области создания и применения гибких линий электропередач с нетрадиционными параметрами токов и напряжений. Существующие исследования в данной области [1-3] отражают ощутимые преимущества использования токов и напряжений повышенной частоты. Применение повышенной частоты рабочего напряжения позволяет значительно улучшить эксплуатационные показатели электропередач. Одно из направления этой темы это применение локальных электрических высоковольтных кабельных сетей повышенной частоты. Такие электропередачи можно использовать для устройств электротепловой обработки (ЭТО) на предприятиях строительной отрасли. Отличительной чертой такого применения является необходимость подвода электроэнергии к значительному числу потребителей (постов), достигающих нескольких десятков. Однако стадии внедрения и использования должна предшествовать стадия тщательного технико-экономического исследования и оценка показателей эффективности такой электропередачи. Обязательным

является сравнение характеристик электропередач повышенной частоты и электропередач промышленной частоты.

II. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Современные электропередачи в распределительных сетях рассчитываются на передачу заданного объема мощности с установленным ГОСТом напряжением [4]. Варианты исполнения электропередач, в основном, сводятся к применению напряжения промышленной частоты. (рис.1.)

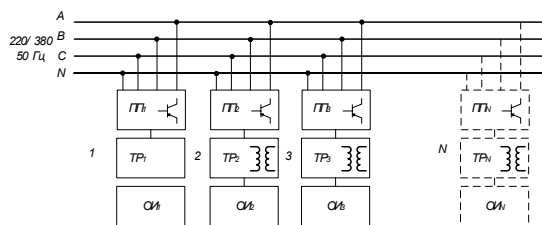


Рис. 1. Вариант исполнения сети промышленной частоты промышленного предприятия

Этот фактор приводит к значительным потерям электроэнергии в электрических сетях напряжения 0,4 кВ обладающих значительной протяжённостью в

электросетевом комплексе РФ. При этом вариант исполнения такой электрической сети, как правило, носит магистрально-радиальный характер (рис.1)

Устройства электротепловой обработки (ЭТО) и электротермической обработки, как правило, работают в режиме параллельного подключения. Для питания устройства электротепловой и электротермической обработки подключаются к трем фазам линии на напряжение 220/380 В и используют полупроводниковый преобразователь напряжения (см. рис.1). Силовой полупроводниковый преобразователь напряжения необходим для обеспечения требуемого технологического процесса и осуществляет преобразование напряжения промышленной частоты (50 Гц) в напряжение повышенной частоты (от 5 до 20 кГц). Так же для эффективности технологического процесса необходимо понижение/повышение напряжения на самом объекте в процессе его обработки. Преимущества и недостатки использования текущей магистрально-радиальной системы приведены в таблице 1:

Радиально-магистральная сеть электроснабжения промышленной частоты	
Недостатки	Преимущества
1. Применение большого числа пунктов электротепловой обработки приводит к увеличению числа полупроводниковым преобразователей	1. Для подключения дополнительных потребителей не требуется преобразователь частоты
2. Надежность работы устройств определяется производением коэффициентов надежности отдельно взятых устройств	
3. Распределение энергии происходит на напряжении 0,4 кВ и связанные с этим ограничения	
4. Затрудняется гибкое управление процессом передачи электроэнергии.	
5. Силовые трансформаторы промышленной частоты увеличивают стоимость системы электроснабжения	

Альтернативным методом создания распределительной сети электропередачи промышленного предприятия является применение локальных высоковольтных электропередач повышенной частоты. Применение таких электропередач в электрических сетях промышленных предприятий позволяет классифицировать их как «специальные электрические сети», т.к. они служат для электроснабжения оборудования специального назначения (прим. для различных отраслей промышленности и производства – строительная отрасль, металлообработка и пр.). Для специальных электрических сетей величина рабочего напряжения и плотности тока высоковольтной кабельной линии выбирается из условий передачи максимальной мощности. При использовании высокого напряжения уменьшается величина передаваемого тока, что благоприятно сказывается на потерях в электропередаче. Пример конструктивного выполнения такой электропередачи показан на рис. 2:

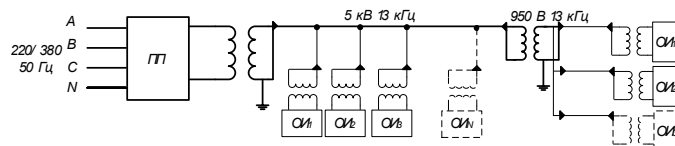


Рис. 2. Вариант исполнения сети промышленного предприятия с применением напряжения повышенной частоты

Распределительная сеть выполняется магистральной с единым управляемым преобразователем напряжения в начале линии. Это позволяет гибко управлять системой электроснабжения в целом. Сеть выполняется разветвленной с различными уровнями высокого напряжения (в зависимости от номинальной мощности). Конфигурации электропередачи предусматривает применение силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты, которые обладают значительно лучшими технико-экономическими показателями, чем трансформаторы промышленной частоты [3].

Радиально-магистральная сеть высоковольтная сеть электроснабжения повышенной частоты	
Недостатки	Преимущества
1. Дополнительные устройства подключаются через компактный преобразователь напряжения и трансформатор	1. Гибкое управление системой электроснабжения 2. Высокие значения КПД электропередачи в целом 3. Стоимостные показатели электропередачи значительно ниже

III. ВЫВОДЫ

Таким образом, существует целесообразность применения высоковольтных кабельных электропередач повышенной частоты в сетях электроснабжения промышленных предприятий. Необходимо выполнить дальнейшее технико-экономическое сравнение используя данные с реально эксплуатируемых электропередач повышенной частоты и электропередач промышленной частоты.

Список литературы

- [1] Федосов С.В., Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Бочаров Ю.Н., Соколов А.М. Принципы организации современной электроэнергетики/ Энергетик. 2014. №3. С. 46-49.
- [2] Федосов С.В., Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Бочаров Ю.Н., Соколов А.М. Принципы организации современной электроэнергетики/, продолжение. Энергетик. 2014. №4. С.15-18.
- [3] Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Шадриков Т.Е., Соколов А.М. Техничко-экономические показатели силовых трансформаторов высокого напряжения локальных электроэнергетических систем переменного тока повышенной частоты // Энергетик 2015. №2. С.11-14
- [4] ГОСТ 23366-78 Номинальные напряжения потребителей

References

- [1] Fedosov S.V., Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Bocharov Ju.N., Sokolov A.M. Principy organizacii sovremennoj jelektrojenergetiki/ Jenergetik. 2014. №3. С. 46-49.
- [2] Fedosov S.V., Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Bocharov Ju.N., Sokolov A.M. Principy organizacii sovremennoj jelektrojenergetiki/, prodolzhenie. Jenergetik. 2014. №4. С.15-18.
- [3] Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Shadrikov T.E., Sokolov A.M. Tehniko-jekonomicheskie pokazateli silovyh transformatorov vysokogo naprjazhenija lokal'nyh jelektrojenergeticheskikh sistem peremennogo toka povyshennoj chastoty // Jenergetik 2015. №2. S.11-14
- [4] GOST 23366-78 Nominal'nye naprjazhenija potrebitelej

Устройство индикации пробоя изоляторов

Д.Е. Титов, С.А. Петренко, И.С. Шандриков
КТИ (филиал) ВолгГТУ
Камышин, Россия
iliashandrikov@mail.ru

Аннотация- назначение устройства состоит в определении повреждений любых высоковольтных изоляторов, различных по конструкции, материалу и четкая визуальная фиксация повреждений.

Ключевые слова — устройство индикации, пробой изолятора, воздушная линия электропередачи

A display device breakdown of insulators

D. E. Titov, S. A. Petrenko, I. S. Shadrikov
Kamyshin technological Institute (branch) of Volgograd state technical University
Kamyshin, Russia
iliashandrikov@mail.ru

Abstract- the purpose of this device is to determine any damage of high-voltage insulators, different in design, material and clear visual fixation of damages.

Keywords — a display device, breakdown of the insulator, overhead transmission line.

I. ВВЕДЕНИЕ

Цель данного устройства состоит в определении повреждений любых высоковольтных изоляторов, различных по конструкции, материалу и четкая визуальная фиксация повреждений. Устройство устанавливается под нижний изолятор гирлянды, имеет стандартный тип крепления, аналогичный креплению стеклянного изолятора. Общее удлинение гирлянды изоляторов после установки устройства составит 150мм. Цена устройства по предварительным расчетам будет сопоставима со стоимостью одного изолятора (до 600р.).

II. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Принцип действия прост – устройство по конструкции сходно со стандартным стеклянным подвесным изолятором и его корпус также имеет изолирующую вставку. Пробивное напряжение диэлектрической вставки составит порядка 2кВ. Однако самой чашки как таковой устройство не имеет, поскольку диэлектрическая вставка используется исключительно для обеспечения протекания тока пробоя гирлянды в строго определенном месте. Материал диэлектрика вставки работает на сжатие, поэтому его разрушения при пробое опасаться не стоит. В момент пробоя ток начинает протекать по проводнику, имеющему значительное омическое сопротивление и

рассчитанному на наличие токов утечки, которые выдерживает не разрушаясь. При протекании по проводнику тока пробоя он разрушается и приводит в действие спусковой механизм, который в свою очередь провоцирует срабатывание заряда. После выстрела из гильзы вылетает лента длиной 500мм, закрепленная на коротком стальном тросе, и повисает вблизи вышедшей из строя гирлянды изоляторов. Лента имеет раскраску сигнальными цветами. Сама гильза при изготовлении герметично заливается и устройство имеет степень защиты от воздействий окружающей среды IP67. После срабатывания устройство отправляется на переработку, в место него устанавливается новое. На переработке, в случае удовлетворительного состояния, в нем восстанавливается заряд, и оно возвращается в сети с учетом стоимости расходов на восстановления работоспособности.

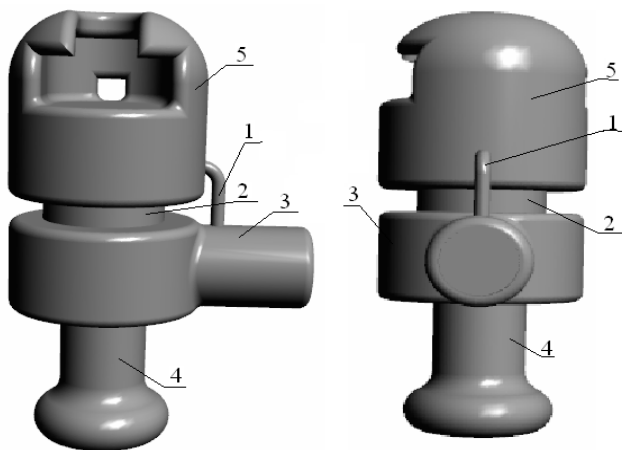


Рис.1. Конструкция устройства индикации пробоя гирлянды изолятора

1. Проводник, соединенный с плавкой вставкой.
2. Диэлектрическая вставка.
3. Камера с плавкой вставкой, металлическим и пластиковым пыжами, а также сигнальной лентой.
4. Крепление к зажиму.
5. Крепление к нижнему изолятору.
6. Плавкая вставка.
7. Металлический и пластиковый пыж.
8. Сигнальная лента.

Список литературы

- [1] Короткевич М.А. «Основы эксплуатации электрических сетей», Минск Высшая школа- 2005
- [2] Правила устройства электроустановок, седьмое издание.
- [3] Симановский И.В.: «Индикатор пробоя полимерного изолятора и полимерный изолятор с индикацией пробоя». Патент №2479057

References

- [1] Kороткевич, M. A., "Principles of operation of electric networks", Minsk Higher school -2005
- [2] Rules for electrical installation, seventh edition.
- [3] Simanovsky, I. V.: "breakthrough Indicator of polymer insulator and polymer insulator with ineficacia breakdown". Patent No. 2479057.

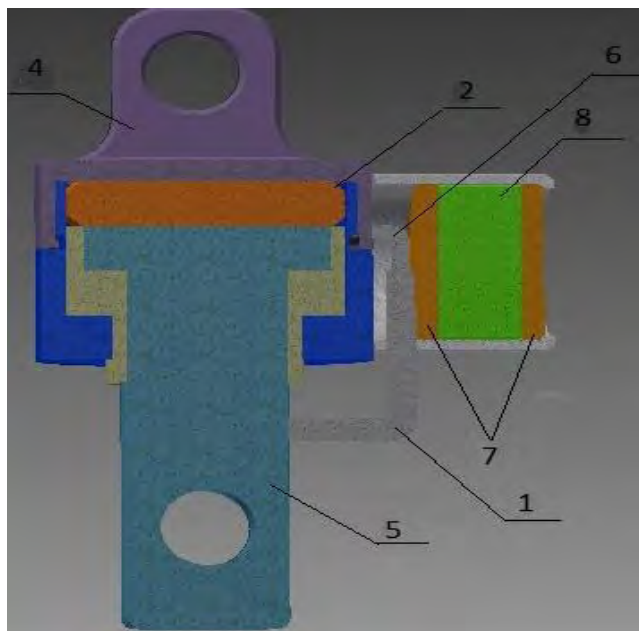


Рис.2. Устройство индикации пробоя полимерного изолятора в разрезе.

IV. ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Анализ и синтез систем электроприводов
- Электромеханика и магнитожидкостные устройства
- Микроэлектронные и микропроцессорные информационно-управляющие системы
- Технология машиностроения
- Динамика, прочность, вибродиагностика
- Математические методы в технике и технологиях

Повышение запаса динамической устойчивости распределенных источников энергии с малой постоянной времени

С.Н. Удалов, А.А. Ачитаев и М.С Юманов
Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия
achitaevaa@gmail.com

Аннотация — современное развитие распределенных источников электрической энергии в России невозможно без развития средств, позволяющих повысить запас динамической устойчивости системы при резких изменениях режима. В данной работе предлагается решение, которое состоит в использовании псевдо-прямого привода. Актуальность исследования связана с тем, что в настоящее время в России распределенные источники энергии в изолированных энергосистемах имеют небольшую мощность. К сожалению, в таких энергосистемах существуют недостатки в виде проблем с электроснабжением, связанных с потерей запаса динамической устойчивости при коротких замыканиях или значительных перегрузках.

Ключевые слова — ветровая турбина; электромагнитная трансмиссия; динамическая устойчивость; синхронная машина; математическая модель.

Increasing the Reserve Dynamic Stability of Distributed Energy Sources With a Small Time Constant

Sergey Udalov, Andrey Achitaev and Michael Yumanov
Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia
achitaevaa@gmail.com

Abstract — Modern development of distributed sources of electricity in Russia is impossible without the development of means to improve its dynamic stability during sudden changes of regime. In this paper, we propose a solution which is to use a pseudo-direct drive. Relevance of the study is related to the fact that Russia currently distributed energy sources in isolated power systems have little power. Unfortunately, there are drawbacks such power systems in the form of problems with the electricity associated with the loss of dynamic stability during short circuits.

Keywords — wind turbine; electromagnetic transmission; dynamic stability; synchronous machine; mathematical model.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие распределенной энергетики в России невозможно без развития средств, позволяющих повысить регулировочные качества. Это связано с тем, что в настоящее время в России распределенная энергетика актуальна в изолированных энергосистемах небольшой мощности. К сожалению, в таких энергосистемах существуют недостатки в виде проблем с электроснабжением, связанных с потерей запаса динамической устойчивости, которые возникают при коротких замыканиях или резких изменениях режима. Исследования в области повышения запаса динамической устойчивости было проведено рядом авторов [1, 2]. Абрамович Б.Н. представил метод поддержания динамической устойчивости используя оценку допустимого уменьшения напряжения [1]. Беляев А.Н. рассматривает применение электромагнитного тормоза для увеличения запаса динамической устойчивости энергосистемы [2]. Данная работа будет посвящена новому подходу в вопросах стабилизации угла нагрузки при резких изменениях режима и, как следствие, повышению запаса динамической устойчивости.

II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В изолированной автономной электроэнергетической системе, состоящей из нескольких источников электрической энергии, однофазное замыкание наблюдается при 70 % случаев от общего числа возмущений, которые являются аварийными. Дальнейшие действия связаны с последующим отключением поврежденного генератора или части нагрузки. При этом нарушается баланс выработки и потребления энергии, при котором остальные генераторы не позволяют обеспечить необходимую мощность и частота энергосистемы падает. Также, при отключении части нагрузки наблюдается переизбыток активной мощности, что способствует ускорению генераторов. В условиях автономной энергосистемы данный вид нарушений может привести к асинхронному режиму, оставшихся в работе синхронных генераторов, которые связаны между собой линиями с разными сопротивлениями. Это приводит к появлению рассогласованности угла нагрузки между ЭДС энергосистемы и ЭДС генераторов.

Примем для исследования ветроэнергетическую установку. Ветроэнергетика сама по себе является альтернативной технологией, которая обеспечивает

экологически чистой энергией и уникальные исследовательские задачи. Каждый год в мире устанавливаются большие ветровые турбины и подключаются к энергосистемам. Ветровые турбины не только становятся все более распространенными, но также становятся больших масштабов. Эффект масштаба, который связан с энергией ветра подталкивает производителей с каждым годом выпускать большие турбины. Улучшения в технологии производства ветровых турбин позволили генераторам масштабироваться до величин, превышающей 10 МВт. Несмотря на эти усовершенствования, все еще существуют значительные проблемы, стоящие перед ветроэнергетикой, которые должны быть преодолены. Одной из таких проблем является динамическая устойчивость системы электроснабжения при коротких замыканиях на генераторах, подключении в автономную сеть, состоящую из нескольких источников электрической энергии.

Современная ветроэнергетическая установка состоит из трех основных компонентов (Рис. 1, 2) ветровой турбины, синхронного генератора и трехступенчатого статического редуктора. Данная компоновка имеет преимущества такие как: низкая себестоимость, простота в обслуживании, минимальные массогабаритные показатели.

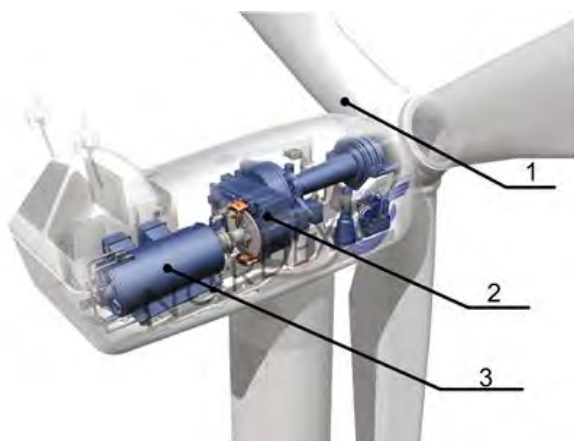


Рис. 1. Компоновка современной ветроэнергетической установки NORDEX: 1 – турбина; 2 – трансмиссия; 3 – генератор

Вместе с тем выделяют следующие недостатки: ограниченный регулировочный диапазон изменения частоты вращения генератора, статическая трансмиссия с постоянным передаточным отношением, не позволяет управлять электромагнитным моментом и скоростью генератора.

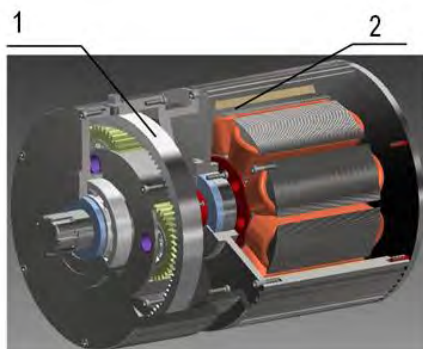


Рис. 2. Электромеханическая компоновка: 1 – планетарная трансмиссия; 2 – генератор

III. ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Данная работа предлагает решение, которое состоит в технологии псевдо-прямого привода. Суть разработки заключается в применении электромагнитной трансмиссии, где передача механической энергии от тихоходного вала к быстроходному валу осуществляется благодаря электромагнитному преобразованию, возникающему между быстроходным и тихоходным звеном с разным числом пар полюсов из постоянных магнитов. Переменное передаточное отношение осуществляется путем добавления обмотки управления (рис. 3, 4), которая обеспечивает изменение скольжения тихоходного вала по отношению к быстроходному [3, 4]. Обращаем внимание, что в схеме отсутствует инвертор в силовой части цепи (см. Рис. 4). Для реализации управления применяются два инвертора. Они обеспечивают преобразование частоты для заряда аккумуляторных батарей и обмотки управления. Исследования, представленные в этой статье, являются предварительными для использования магнитных бесступенчатых редукторов в ветровых турбинах.

Исследования сосредоточены на моделировании ветровой турбины на базе трансмиссии с переменным передаточным отношением.

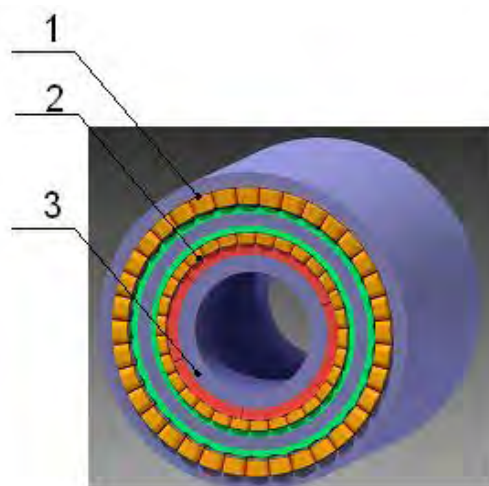


Рис. 3. Эскиз электромагнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением: 1 – обмотка управления; 2 – тихоходное звено; 3 – быстроходное звено

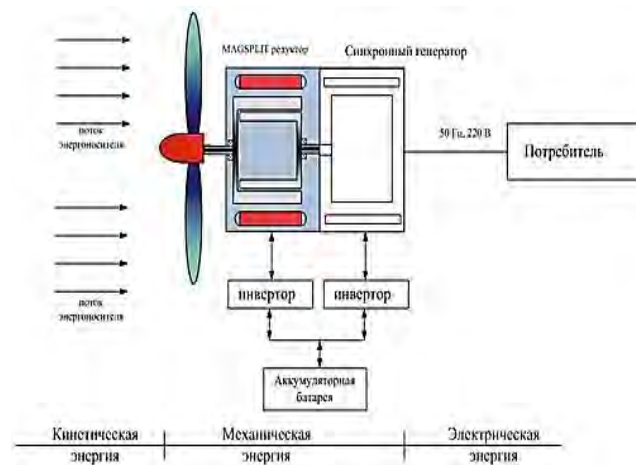


Рис. 4. Компоновка ветроэнергетической установки на базе электромагнитной трансмиссии и синхронного генератора

IV. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТРАНСМИССИИ

Для анализа электромагнитной трансмиссии примем, что данная машина состоит из двух компонентов: синхронной машины с постоянными магнитами, как звено изменения передаточного отношения и звена электромеханической трансформации или асинхронной машины с вращающимся магнитным полем, созданным постоянными магнитами (Рис. 3).

Построение математической модели звена электромеханической трансформации основано на принятии в качестве переменных состояния магнитных потоков вместо токов. Таким образом, считая что $\Psi = [\Psi_{Sd} \Psi_{Sq} \Psi_{Rd} \Psi_{Rq}]^T = [\Psi_{Sq} \Psi_{Rd}]^T$ вектором состояния и определяя вектор входных переменных напряжения U , получаем уравнение динамики потоков [5]:

$$\dot{\Psi}_R = \begin{bmatrix} \alpha \frac{R_L L_m^2}{\sigma L_S L_R^2} - \frac{R_R}{\sigma L_R} & \left(\alpha \frac{R_R L_m}{R_S L_R} + 1 \right) \omega_s - p \Omega_h \\ - \left(\alpha \frac{R_L L_m^2}{\sigma L_S L_R^2} + 1 \right) \omega_s - p \Omega_h & \alpha \frac{R_R L_m^2}{\sigma L_S L_R^2} - \frac{R_R}{\sigma L_R} \end{bmatrix} \cdot \Psi_R + \begin{bmatrix} \alpha \frac{R_R}{R_S L_R} & \alpha \frac{\sigma R_R L_S}{L_R R_S^2} & 1 & 0 \\ -\alpha \frac{\sigma R_R L_S}{L_R R_S^2} & \alpha \frac{R_R}{R_S L_R} & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot u, \quad (1)$$

где $\alpha = 1 / (1 + (\sigma \cdot \omega_s \cdot L_S / R_S)^2)$, $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_S L_R)$, $\omega = p \cdot \Omega_h$ – (рад/с) скорость ротора в электрических радианах в секунду (где Ω_h – скорость вращения ротора генератора); $\omega_s = d\theta / dt$ (рад/с) – частота вращающегося поля статора; R_S, R_R – сопротивления статора и ротора, L_S, L_R – индуктивности ротора и статора; $V_{Sd}, V_{Rd}, V_{Rq} = 0$ – d - q составляющие напряжений статора и ротора соответственно; $\Phi_{Rd} = L_R \cdot i_{Rd}$, $\Phi_{Rq} = L_R \cdot i_{Rq}$ – d - q составляющие магнитного потока ротора.

Тогда магнитные потоки статора получаются из чисто алгебраических уравнений [5]:

$$\Psi_S = \begin{bmatrix} \alpha \frac{L_m}{L_R} & \alpha \frac{R_S L_m \omega_s}{\sigma L_S} \\ -\alpha \frac{R_S L_m \omega_s}{\sigma L_S} & \alpha \frac{L_m}{L_R} \end{bmatrix} \Psi_R + \begin{bmatrix} \alpha \frac{R_S}{\sigma L_S} & \alpha \frac{R_S^2}{\sigma^2 L_S^2} \omega_s \\ -\alpha \frac{R_S^2}{\sigma^2 L_S^2} \omega_s & \alpha \frac{R_S}{\sigma L_S} \end{bmatrix} \quad (2)$$

На Рис. 5 представлены результаты расчета электромагнитного момента при изменении числа полюсов как тихоходного звена (Рис. 5 а), так и быстроходного (рис. 5 б). На Рис. 5 а, наблюдается срыв момента на валу тихоходного звена, т.к. геометрия электромеханической трансформации связана с шириной полюсов тихоходного звена.

В конечном итоге, токи также рассчитываются на основе алгебраической зависимости [4]:

$$\begin{bmatrix} i_{Sd} \\ i_{Sq} \\ i_{Rd} \\ i_{Rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_S & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_S & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_S \end{bmatrix}^{-1} \cdot \Psi. \quad (3)$$

Для анализа процессов в машине необходимо разработать математическую модель. Синхронная машина с постоянными магнитами (СПГМ) моделируется исходя из следующих упрощающих допущений: синусоидальное расположение обмоток статора, электрическая и магнитная симметрия, пренебрежимо малые потери в стали, ненасыщенная магнитная цепь [4, 6].

Модель может быть получена в d - q координатах ротора; переход от фазных координат (a, b, c) к координатам (d - q) может быть осуществлён при помощи преобразований Парка – Горева [5]. Затем, пренебрегая напряжением смещения нулевой точки – U_0 , благодаря свойству симметрии, модель СПГМ в координатах d - q приобретает вид:

$$\begin{cases} u_d = R i_d + L_d \dot{i}_d - \Phi_q \omega_s \\ u_q = R i_q + L_q \dot{i}_q + \Phi_d \omega_s \end{cases}, \quad (4)$$

где R – сопротивление статора; u_d, u_q – соответственно d и q составляющие напряжений статора; L_d и L_q – индуктивности по осям d и q ; ω_s – скорость вращения электромагнитного поля статора.

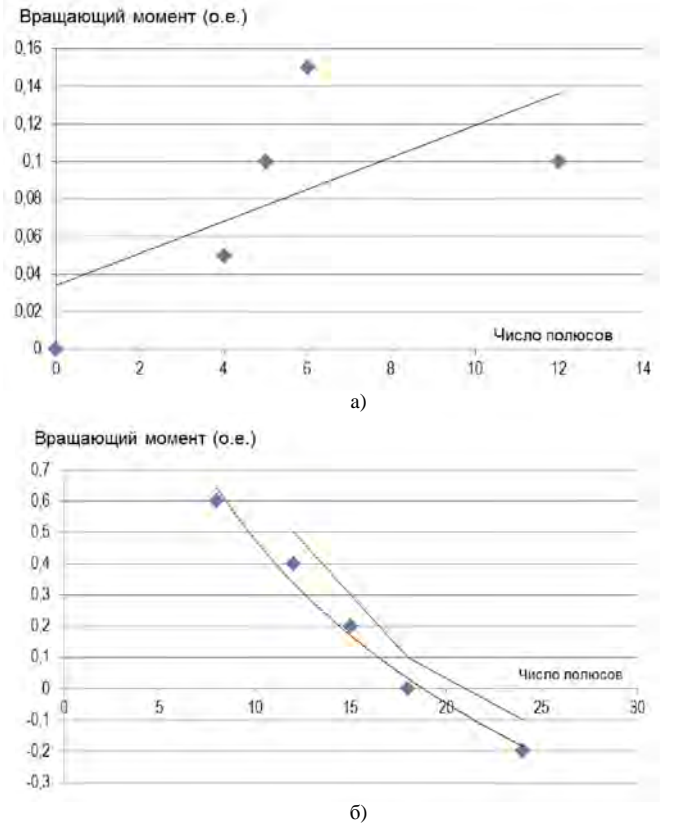


Рис. 5. Результаты расчета электромагнитного момента быстроходного вала при изменении числа пар полюсов: а) тихоходного вала, б) быстроходного вала

$$\Phi_d = L_d i_d + \Phi_m; \quad (5)$$

$$\Phi_q = L_q i_q, \quad (6)$$

где Φ_d и Φ_q – магнитные потоки по осям d и q ; Φ_m – поток, имеющий постоянную величину, из-за наличия постоянных магнитов.

Электромагнитный момент определяется по формуле:

$$\Gamma_G = p(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) = p[\Phi_m i_q + (L_d + L_q) i_d i_q], \quad (7)$$

где p – количество пар полюсов. Если постоянные магниты установлены на поверхности ротора звена изменения передаточного отношения, то $L_d = L_q$ и электромагнитный момент равен:

$$\Gamma_G = p\Phi_m i_q. \quad (8)$$

Для анализа магнитного поля для звена управления электромагнитной трансмиссии использовался метод конечных элементов.

На Рис. 6 представлена картина распределения силовых линий магнитного поля для звена электрохимической трансформации при соотношений чисел полюсов на быстроходном/тихоходном звеньях 6:9.

На Рис. 7 представлен анализ расчетов магнитных полей в двух режимах звена управления передаточным отношением. В качестве материала применяются постоянные магниты с высокой коэрцитивной силой [4]. Из анализа магнитной цепи управления передаточным отношением машины следует, что при двух режимах индукция магнитного поля в якоре машины в обоих случаях не выходят в область насыщения.

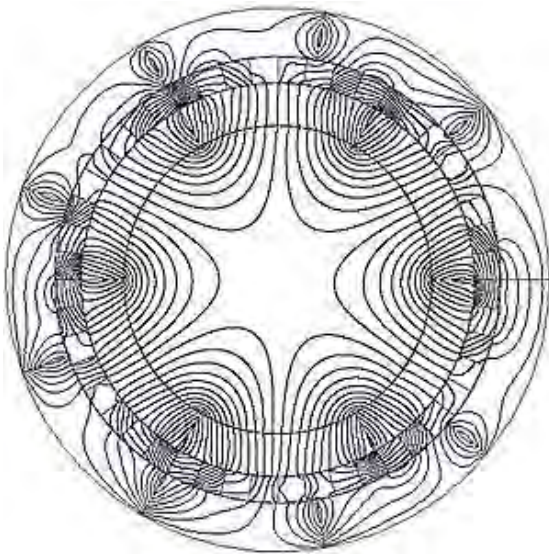
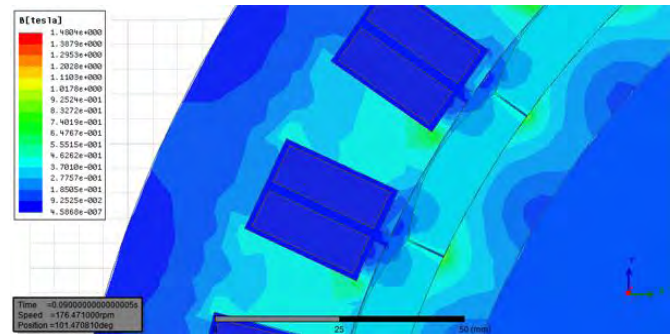


Рис. 6. Распределение силовых линий магнитного поля электромагнитной трансмиссии

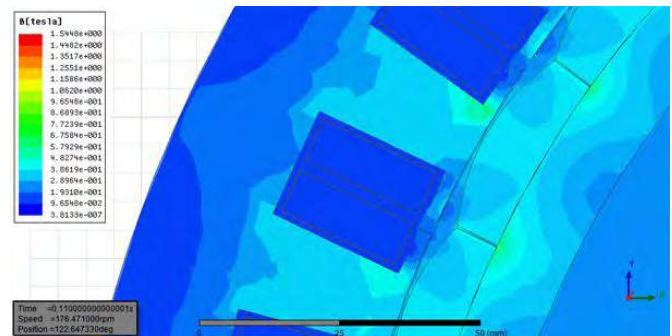
С помощью программного комплекса ANSYS Maxwell были рассчитаны параметры схемы замещения электрической машины трансмиссии мощностью 3 кВт. В таблице 1 отображены исследовательские данные звена управления передаточным отношением. Геометрия полюсов постоянных магнитов звена управления передаточным отношением спроектирована так, что обеспечить коэффициент формы, необходимый для синусоидального распределения индукции магнитного поля вдоль воздушного зазора.

Таблица 1. ПАРАМЕТРЫ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЗВЕНА УПРАВЛЕНИЯ

Наименование	Значение
$X_l + X_{ad}$ (Ом):	9.72
$X_l + X_{aq}$ (Ом):	9.72
Сопротивление рассеяния статора X_l (Ом):	7.295
Сопротивление нулевой последовательности X_0 (Ом):	6.66
Сопротивление фазы статора R_l (Ом):	0.70



а)



б)

Рис. 7. Картина магнитного поля, созданной обмоткой управления: а) нормальный режим; б) перегрузка

V. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

Модель была получена путем аппроксимации крупномасштабных горизонтально осевых ветровых турбин с вращающейся инерционностью, пружинами, амортизаторами и силами лобового сопротивления [4].

Эта модель упрощает многие особенности реальной ветровой турбины более высокого порядка [5]. Модель предлагает единую равномерную скорость ветра по всей плоскости ротора турбины. Лопастей смоделированы как единая масса в виде пружины, демпфера и сил сопротивления. Предполагают, что все лопасти деформируются на одну и ту же величину. Лопастей также находятся под одним и тем же углом поворота по отношению к набегающему потоку ветра. Даная модель представлена на Рис. 8.

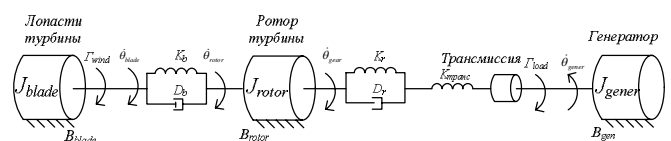


Рис. 8. Модель ветроэнергетической установки с электромагнитной трансмиссией

Уравнение ускорения генератора при фиксированном передаточном отношении определяется по уравнению 9:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\theta_{gen}}{dt^2} = N \frac{D_{rotor}}{J_{gen}} \left(\frac{d}{dt} \theta_{rotor} - \frac{d}{dt} \theta_{gear} \right) + N \frac{K_{rotor}}{J_{gear}} (\theta_{rotor} - \theta_{gear}) - \\ - \frac{B_{gear}}{J_{gear}} \frac{d}{dt} \theta_{gen} - \frac{\Gamma_L}{J_{gear}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где Γ_L – постоянный противоположно вращающийся момент, приложенный к валу генератора; J_{gear} , J_{gen} – моменты инерции трансмиссии и генератора соответственно; N – передаточное соотношение; K_{rotor} – коэффициент жесткости вала ротора турбины; D_{rotor} – диаметр ротора; θ_{gear} , θ_{gen} – угол поворота вала трансмиссии и генератора соответственно.

Отметим, что передаточное соотношение определяется из уравнений:

$$N = \omega_{gear} / \omega_{gen}, \quad N = \Gamma_{HSS} / \Gamma_{LSS}, \quad (10)$$

Как видно из уравнения 10, уравнение 9 можно записать со стороны тихоходного вала трансмиссии:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\theta_{gear}}{dt^2} = N^2 \frac{D_{rotor}}{J_{gear}} \left(\frac{d}{dt} \theta_{rotor} - \frac{d}{dt} \theta_{gear} \right) + \\ + N^2 \frac{K_{rotor}}{J_{gear}} (\theta_{rotor} - \theta_{gear}) - N \frac{B_{gear}}{J_{gear}} \frac{d}{dt} \theta_{gen} + N \frac{\Gamma_L}{J_{gear}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где ω_{gear} – угловая скорость входного вала трансмиссии; ω_{gen} – угловая скорость вала генератора, Γ_{HSS} , Γ_{LSS} – момент на быстроходном валу (генераторе) и тихоходном валу (турбине) соответственно.

Уравнение ускорения для лопасти при фиксированном передаточном отношении трансмиссии:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\theta_{blade}}{dt^2} = \frac{\Gamma_{wind}}{J_{blade}} - \frac{B_{blade}}{J_{blade}} \frac{d}{dt} \theta_{blade} - \frac{D_{blade}}{J_{blade}} \left(\frac{d}{dt} \theta_{blade} - \frac{d}{dt} \theta_{rotor} \right) - \\ - \frac{K_{blade}}{J_{blade}} (\theta_{blade} - \theta_{rotor}), \end{aligned} \quad (12)$$

где J_{blade} , J_{rotor} – моменты инерции лопасти и ротора турбины соответственно; Γ_{wind} – момент, создаваемый ветровым потоком; K_{blade} – коэффициент жесткости лопастей; D_{blade} – диаметр лопастей; θ_{blade} , θ_{rotor} – угол поворота лопасти и ротора турбины соответственно.

Ускорение ротора турбины ветроэнергетической установки при фиксированном передаточном отношении:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\theta_{rotor}}{dt^2} = \frac{D_{blade}}{J_{rotor}} \left(\frac{d}{dt} \theta_{blade} - \frac{d}{dt} \theta_{rotor} \right) + \frac{K_{blade}}{J_{rotor}} (\theta_{blade} - \theta_{rotor}) - \frac{B_{rotor}}{J_{rotor}} \frac{d}{dt} \theta_{rotor} - \\ - \frac{D_{rotor}}{J_{rotor}} \left(\frac{d}{dt} \theta_{rotor} - \frac{d}{dt} \theta_{gear} \right) - \frac{K_{rotor}}{J_{rotor}} (\theta_{rotor} - \theta_{gear}). \end{aligned} \quad (13)$$

Рассмотрим уравнение ускорения вала трансмиссии, в условии переменного передаточного отношения, используя соотношение:

$$\frac{d^2\theta_{gear}}{dt^2} = \frac{d}{dt} (\dot{\theta}_{gear}) = \frac{d}{dt} (N \dot{\theta}_{gen}) = N \ddot{\theta}_{gen} + \dot{N} \dot{\theta}_{gen}. \quad (14)$$

Преобразуем уравнение (11) с учетом (14):

$$\begin{aligned} \frac{d^2\theta_{gear}}{dt^2} = N^2 \frac{D_{rotor}}{J_{gear}} \left(\frac{d}{dt} \theta_{rotor} - \frac{d}{dt} \theta_{gear} \right) + \\ + N^2 \frac{K_{rotor}}{J_{gear}} (\theta_{rotor} - \theta_{gear}) - N \frac{B_{gear}}{J_{gear}} \frac{d}{dt} \theta_{gen} + N \frac{\Gamma_L}{J_{gear}} + \frac{d\theta_{gen}}{dt} \cdot \frac{dN}{dt}. \end{aligned} \quad (15)$$

Эквивалентный коэффициент жесткости данной модели с учетом последовательного соединения ротора турбины и трансмиссии:

$$\frac{K_{CVT}}{N^2} = K_{rotor}, \quad \frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{rotor}} + \frac{N^2}{K_{CVT}} = \frac{1}{K_{rotor}} + \frac{1}{K_{rotor}} = \frac{2}{K_{rotor}}. \quad (16)$$

Была разработана модель ветровой турбины состоящей из главных уравнений (1)-(16).

Цель разработки модели была проверка систем управления.

На Рис. 8 представлена модель магнитной трансмиссии в составе ветроэнергетической установки в программе MATLAB™ Simulink. Для реализации управления передаточным отношением была использована синхронная машина с постоянными магнитами с учетом полученных параметров схемы замещения, представленных в таблице 1. Регулирование скоростью вращения синхронной машины осуществляется с помощью звена векторного управления со вставкой постоянного тока. Регулирование скорости турбины реализуется с помощью ПИ регулятора по углу атаки лопастей, а также через звено управления передаточного отношения.

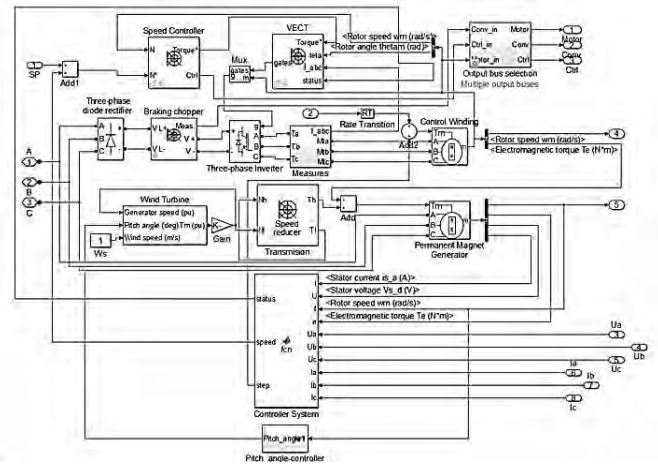
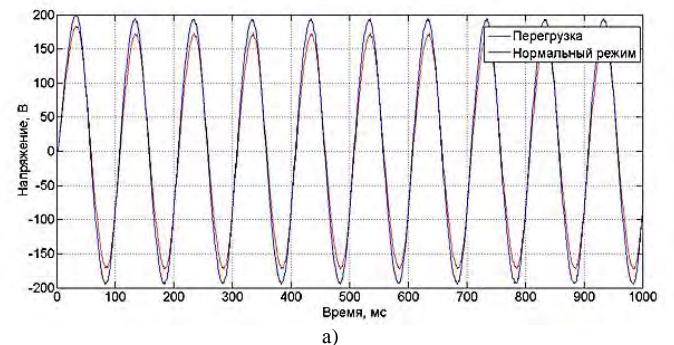


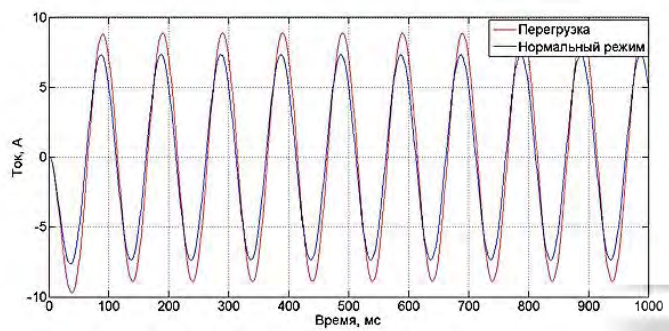
Рис. 8. Схема модели в MATLAB™ Simulink ветроэнергетической установки с электромагнитной трансмиссией с переменным передаточным отношением

На Рис. 9 представлены результаты расчета тока и напряжения при нормальном режиме и перегрузке.

На Рис. 10 представлены результаты исполнения алгоритма, поддерживающего запас устойчивости автономной энергетической системы. Представлены исследования механического момента во время возмущений при изменении механического момента трансмиссии. В рамках развития исследования электромеханической трансформации, предполагается использовать различные варианты векторного управления трансмиссией, которые позволят исключить значительные перерегулирования момента или скорости. Дальнейший этап исследований будет состоять в этом.



а)



б)

Рис. 9 Исследование тока (а) и напряжения (б) в нормальном и аварийном режимах

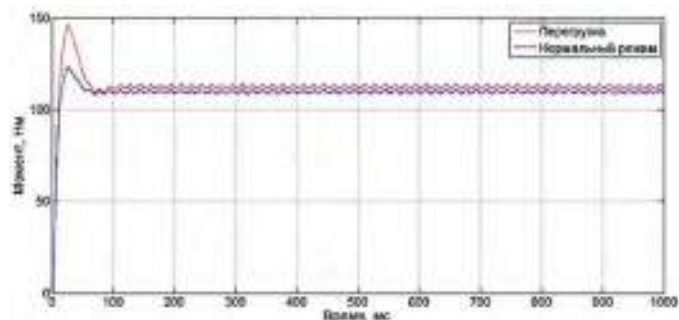


Рис. 10. – Анализ электромагнитного момента быстроходного вала электромагнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением

VI. ВЫВОДЫ

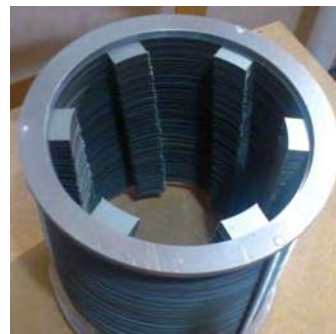
Анализ результатов полевых расчетов электромагнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением показал, что возможна передача механической энергии от тихоходного вала к быстроходному при минимальных энергетических потерях. Разработан алгоритм поддержания допустимого угла нагрузки при различных возмущениях между несколькими генераторами в автономной энергетической системе. Изменение передаточного отношения обеспечивается частотным управлением в обмотке трансмиссии. Это позволяет изменять скорость вращения ротора генератора и обеспечивает контроль уровня момента на валу генератора.

Управление моментом на валу машины позволяет поддерживать скорость вращения генератора, угол нагрузки, при заданной частоте сети и фазе. При этом выделяется, что диапазон допустимого передаточного отношения при выбранной мощности в 3 кВт трансмиссии составляет 1:12.

В настоящий момент проходит разработка и сборка отдельных компонентов трансмиссии для дальнейшей верификации. На Рис. 11 отображены отдельные сборочные элементы трансмиссии.



а)



б)

Рис. 11. Компоненты трансмиссии: а) тихоходное звено; б) статор с полюсами для обмотки управления

Список литературы

- [1] Абрамович Б. Н. и др. Динамическая устойчивость электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями на предприятиях нефтедобычи //Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – №. 3. – С. 17-25.
- [2] Беляев А. Н. Повышение динамической устойчивости автономных энергосистем нефтегазодобывающих комплексов на основе электрического торможения //Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2008. – №. 63. – С. 163-169.
- [3] Henk Polinder . Trends in Wind Turbine Generator Systems, IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics, Vol. 1, NO. 3, September 2013.
- [4] Aho J. P., Kraft L. G. Control of a Wind Turbine with a Magnetic Continuously Variable Transmission for Mitigation of Torque Variations //Proceedings of the 2011 AIAA/ASME Wind Symposium. – 2011.
- [5] Удалов С. Н. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики : монография / С. Н. Удалов, В. З. Манусов. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. - 200 с
- [6] Удалов С.Н. Возобновляемые источники энергии: Учебник / С.Н. Удалов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 458 с.

References

- [1] Abramovich B.N. et al. Dynamic stability of electromechanical systems with synchronous and asynchronous motors for oil companies // Electronic scientific journal "Oil and gas business. - 2011. - №. 3. - P. 17-25.
- [2] Belyaev A.N. Increased dynamic stability of autonomous energy systems based on oil and gas complex electrical braking // Scientific and technical sheets of St. Petersburg State Polytechnic University. - 2008. - №. 63. - P. 163-169.
- [3] Henk Polinder . Trends in Wind Turbine Generator Systems, IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics, Vol. 1, NO. 3, September 2013.
- [4] Aho J. P., Kraft L. G. Control of a Wind Turbine with a Magnetic Continuously Variable Transmission for Mitigation of Torque Variations //Proceedings of the 2011 AIAA/ASME Wind Symposium. – 2011.
- [5] Udalov Sergey. Modeling of wind turbines and management based on fuzzy logic: monograph / Udalov Sergey, V Manusov. - Novosibirsk: Publishing House of the NSTU, 2013. - 200
- [6] Udalov Sergey. Renewables Energy Sources. – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2013. – P. 458.

Исследование методов синтеза цифровых фильтров частотной коррекции электроприводов постоянного тока

Синтез режекторного фильтра

А.А. Муравьева
ИГЭУ
Иваново, Россия
anastasiyamy@mail.ru

Статья посвящена исследованию методов синтеза цифровых фильтров частотной коррекции электроприводов постоянного тока. В статье подробно описан способ настройки параметров режекторного фильтра, с помощью АЧХ объекта управления или заданной частоты.

Ключевые слова: автоматизация управления, система автоматического управления, режекторный фильтр, электропривод.

Research methods of synthesis of digital filters equalization DC drives

Synthesis of the notch filter

Muraveva Anastasiya
Первая строка - Ivanovo Power Engineering University
Ivanovo, Russia
anastasiyamy@mail.ru

The article investigates the methods of synthesis of digital filters equalization DC drives. The article describes a way to configure the notch filter, frequency response using a control object or a predetermined frequency.

Keywords — automation control system of whom-processed automatically, notch filter, Power.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из показателей, который в настоящее время указывается ведущими производителями приводов, является динамическая точность. Под динамической точностью понимается ошибка регулирования положения независимо от характера движения во всем скоростном диапазоне, сюда же, как правило, относят способность электропривода компенсировать механические ошибки кинематической передачи.

К числу ошибок слежения, вызванных кинематической передачей можно отнести:

1. Кинематический зазор в передаче, люфты и несоосности;
2. Погрешности, вызванные ограниченной жесткостью кинематической передачи;
3. Погрешности, вызванные изменением геометрических размеров элементов передачи вследствие температурных колебаний;

4. Колебания, вызванные собственными резонансными частотами передачи в целом и её элементов в частности.

Основными способами устранения ошибок слежения, связанных с законом движения применительно к приводу, является введение компаундирующих связей по скорости и ускорению задающего сигнала, а также в отдельных случаях введением интегральной составляющей по сигналу управления. Компенсация резонансных частот, как правило, производится установкой в канал управления специальных полосовых цифровых фильтров, способных подавлять нежелательные частоты. Погрешности, связанные с кинематическим зазором, компенсируются посредством его косвенной идентификации и выборки на максимально возможной скорости.

В настоящее время возник разрыв между возможностями современных электроприводов и требованиями существующих стандартов. Данный разрыв становится сдерживающим фактором в области проектирования и эксплуатации качественных современных

электроприводов. Поэтому имеет практический смысл дополнить существующий стандарт новыми техническими условиями, опирающимися на прямые показатели качества: динамическую и статическую точность, разрешающую способность, повторяемость, динамическую жесткость. Примерами тестовых воздействий, выявляющих указанные характеристики, являются обработка ступенчатого и гармонического сигнала, круговая интерполяция. Также современный станочный электропривод должен обладать механизмами компенсации погрешностей кинематической передачи и фильтрами для подавления собственных резонансных частот. [1]

II. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖЕКТОРНОГО ФИЛЬТРА

Наиболее идеальным видом фильтров для подавления резонансных частот является частотно-заграждающая цепь (ЧЗЦ), также называемая полосно-заграждающая цепь (ПЗ). Для компенсации резонансных частот, в канал управления достаточно вставить фильтр второго порядка. Передаточная функция полосно-заграждающего фильтра имеет вид:

$$H(s) = K \cdot \frac{(s^2 + 2\sigma_z \cdot s + \omega_z^2)}{(s^2 + 2\sigma_p \cdot s + \omega_p^2)}$$

где, $\sigma_z < \sigma_p$.

Синтез данного фильтра, начинается с определения значения и положения его полюсов и нулей. Их необходимо выбирать так, чтобы нули являлись доминирующими по отношению к полюсам (рис. 1).

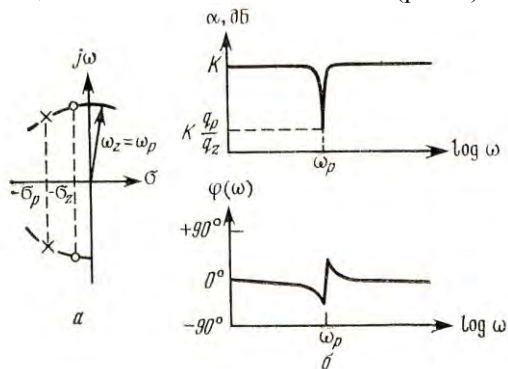


Рис 1. Характеристики ПЗ: а) расположение нулей и полюсов; б) АФЧХ фильтра второго порядка

Для проектирования ПЗ достаточно знать необходимую частоту, которую будет подавлять фильтр.

Рассмотрим случай, что частота среза, находится в промежутке от 20 до 200Гц (от 125,66 рад/с до 1256,64 рад/с)

Примем частоту среза за 100 Гц = 628,32 рад/с.

Здесь возникает сложность построения окружности и нахождения точного значения полюсов. Существуют соотношения:

$$\begin{aligned} \omega_z^2 &= \sigma_z^2 + \tilde{\omega}_z^2, & \omega_p^2 &= \sigma_p^2 + \tilde{\omega}_p^2, \\ q_z &= \omega_z / 2\sigma_z, & q_p &= \omega_p / 2\sigma_p. \end{aligned} \quad (1)$$

И на диаграмме полюсов и нулей они выглядят следующим образом (рис. 2):

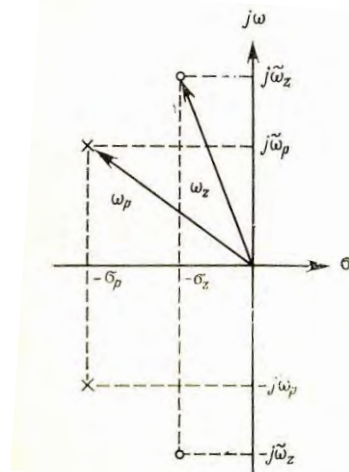


Рис. 2. Диаграмма полюсов и нулей передаточной функции второго порядка

Таким образом, радиус окружности на комплексной плоскости:

$$\omega_z = \omega_p = 628,32 \text{ рад/с.}$$

Примем, что $\tilde{\sigma}_p = 350$ рад/с. Так как она должна быть меньше $\omega_z = \omega_p = 628,32$ рад/с.

В результате расчетов в программном комплексе Matlab, получаем:

значения полюсов : $p = [-350 + 521.8103i \quad -350 - 521.8103i];$

значения нулей: $z = [628.32i \quad -628.32i];$

передаточная функция имеет вид:

$$H(s) = \frac{(5s^2 + 1973900)}{(s^2 + 700s + 394790)}$$

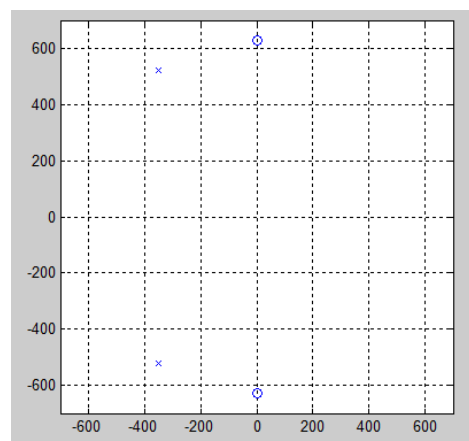


Рис. 3. Диаграмма полюсов и нулей, при частоте среза равной 100 Гц

Проверим значение частоты среза, построив АФЧХ этой характеристики (рис. 4)

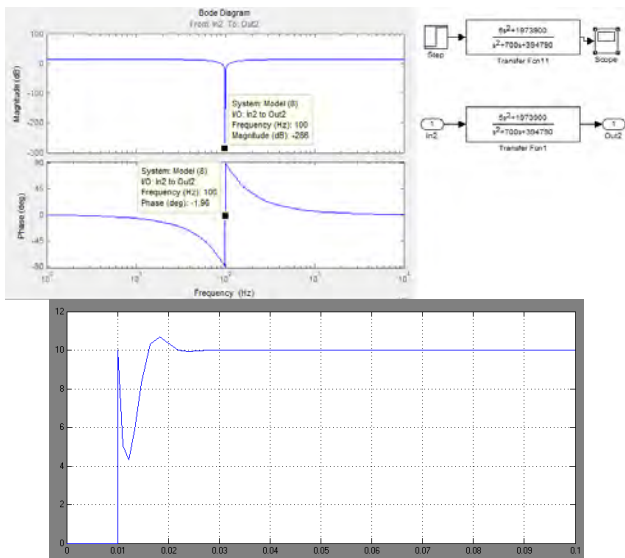


Рис. 4. АФЧХ и переходная характеристика при частоте среза, равной 100 Гц

Данный метод, позволяет определять расположения нулей и полюсов, таким образом, чтобы подавлять нежелательную частоту объекта управления и сглаживать итоговые характеристики АФЧХ.

Для большинства передаточных функций переход от аналогового вида к цифровому осуществляется с помощью подстановки методом Эйлера:

$$s(z) = \frac{z-1}{T_0 \cdot z}$$

Осуществляем данную подстановку, в передаточную функцию вида:

$$H(s) = \frac{(5s^2 + 1855.1s + 1973900)}{(s^2 + 700s + 394790)}$$

$$p = [-350 + 521.8103i \quad -350 - 521.8103i];$$

$$z = [-186.5101 + 600i \quad -186.5101 - 600i];$$

Частота среза равна 100 Гц.

Такт квантования выбираем равным 0,0001 с.

Получаем, что передаточная функция в цифровом фильтре выглядит следующим образом:

$$H(z) = \frac{(5 - 10.18z^1 + 5.205z^2)}{(1 - 2.07z^1 + 1.07395z^2)}$$

Сравним переходные характеристики аналогового и цифрового фильтра (рис. 6).

Как видно из рисунка 6, характеристики аналогового и цифрового фильтра практически идентичны. Из этого следует, что расчет и такт квантования выбраны верно.

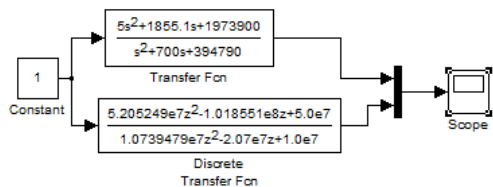


Рис. 5. Схема для определения характеристик аналогового и цифрового вида фильтра

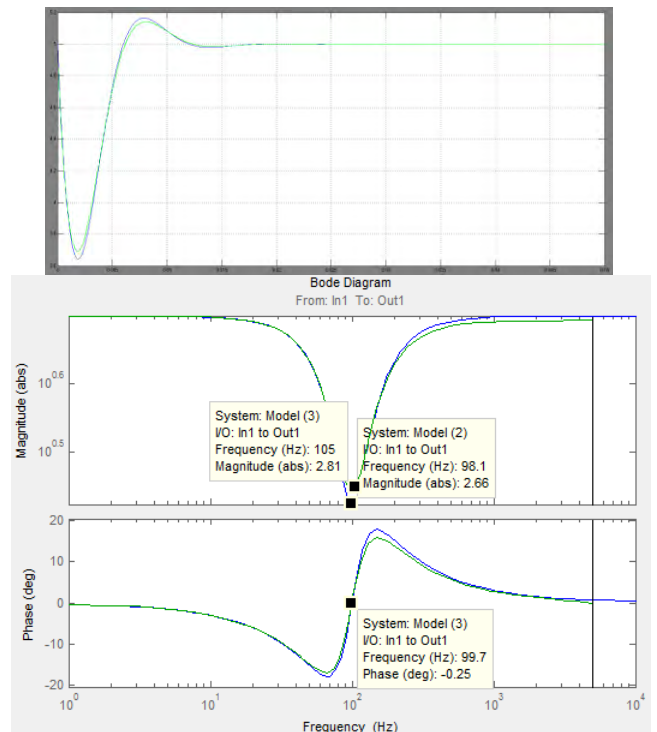


Рис. 6. АФЧХ и переходные характеристики аналогового и цифрового фильтра (аналогового – синяя линия, цифрового – зеленая)

Таким образом, синтез необходимого цифрового фильтра достаточно прост, но осложняется точностью определения его параметров. Если «провал» АФЧХ ПЗ будет находится на месте «всплеска» АФЧХ объекта управления, то итоговая АФЧХ будет иметь сглаженный вид, что позволит устранить нежелательные помехи в работе электропривода. Такой электропривод будет отвечать современным требованиям точности и будет востребован потребителями.

Данный шаблон облегчает процесс форматирования при подготовке электронных версий работ. Статьи на основе данного шаблона сохраняйте как "Документ Word 97-2003" для максимальной совместимости на разных компьютерах. Шаблон соответствует трем требованиям: (1) простота форматирования отдельных статей, (2) автоматическое соответствие требованиям, предъявляемым к форматированию статей и (3) единообразие всех статей, входящих в материалы конференции. Поля, ширина столбцов, междустрочные интервалы и стили уже настроены; используемые стили в данном шаблоне обозначены курсивом и находятся в скобках. Некоторые объекты, такие как многоуровневые формулы, графики и таблицы не регламентированы. Такие объекты должны соответствовать требованиям, описанным далее.

Список литературы

- [1] А.П. Бурков, Е.В. Красильникянц, кандидаты техн. наук, А.А. Смирнов, асп., Н.В. Салахутдинов, инж; ст. «Современные требования к электроприводам станков с ЧПУ» «Вестник ИГЭУ» Вып. 4, 2010 г.
- [2] Бобровников Л.З.; Электроника: Учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2004. - 560 с.

- [3] Г. Мошиц, П. Хорн; «Проектирование активных фильтров», 1984 г.
- [4] Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Методы исследования устойчивости нелинейных систем. 2003.
- [5] Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами/ Иван. гос. энерг. ун-т – Иваново, 2000.
- [6] Агапов В.А., Гришина Е.В., Егоров В.Н., Терехов А.И. Выпускная квалификационная работа. Иваново 2010.
- [7] Башарин А.В., Новиков В. А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Учебное пособие для вузов. – Л. 1982.
- [8] Курячий М.И. Цифровая обработка сигналов: Учебное пособие. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУР, 2012. – 172 с.
- [9] Белодедов М.В. Методы проектирования цифровых фильтров: Учебное пособие. – Волгоград: Издательство Волгоградского государственного университета, 2004. – 60 с.
- [10] Хемминг Р.В. Цифровые фильтры: Учебное пособие для вузов, 1987.
- [11] Бесекерский В. А., Попов Е. П. [Теория систем автоматического регулирования](#). Издание третье, исправленное. Москва, издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1975
- [12] Бесекерский В. А. [Цифровые автоматические системы](#). Москва, издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1976
- [13] Гостев В. И. [Системы управления с цифровыми регуляторами: Справочник](#). Киев, издательство Техника, 1990
- [14] Зайцев Г. Ф. [Теория автоматического управления и регулирования](#).— 2-е изд., перераб. и доп. Киев, Издательство Выща школа Головное издательство, 1989
- [15] А. С. Клюев, Б. В. Глазов, А. Х. Дубровский, А. А. Клюев. [Проектирование систем автоматизации технологических процессов: Справочное пособие](#). 2-е изд., переработанное и дополненное. Москва, издательство Энергоатомиздат, 1990
- [16] Куо Б. [Теория и проектирование цифровых систем управления](#). Перевод с английского. Москва, издательство Машиностроение, 1986

References

- [1] AP Burkov EV Krasilnikyants, the candidate tehn. Sciences, AA Smirnov, pg., NV Salakhutdinov, engineer; Art. "Modern requirements for electric drives CNC" "Ivanovo State Power University Bulletin" Vol. 4, 2010
- [2] Bobrovnikov LZ.; Electronics: Textbook for universities. 5th ed., Rev. And add. - SPb.: Peter, 2004. - 560 p.
- [3] G. Moshits, P. Horn; "Design of active filters," 1984
- [4] Tararykin SV Tyutikov VV Methods for studying stability of nonlinear systems. 2003.
- [5] Tararykin SV Tyutikov VV Coordinating management systems interconnected electric / Ivan. state. energy. Univ - Ivanovo, 2000.
- [6] Agapov VA, Grishin EV, Egorov VN, Terekhov AI Final qualifying work. Ivanovo 2010.
- [7] Basharin AV, Novikov VA, GG Sokolovsky Control of the drive. Textbook for high schools. - L. 1982.
- [8] Kuryachii MI Digital Signal Processing: A Tutorial. - Tomsk: Department of TU, TUSUR, 2012. - 172 p.
- [9] MV Belodedov Methods of designing digital filters: Textbook. - Volgograd: Publishing Volgograd State University with, 2004. - 60 s.
- [10] Hemming RV Digital filters: Textbook for high schools, 1987.
- [11] Besekersky VA, Popov EP Theory of automatic control systems. Third edition, revised. Moscow, publishing house "Science", Home Edition physico-mathematical literature 1975
- [12] Besekersky VA Digital automatic system. Moscow, publishing house "Science", Home Edition physical and mathematical literature, 1976
- [13] Gostev VI control systems with digital controllers: Directory. Kyiv, publishing TECHNIK, 1990
- [14] Zaitsev GF Automatic Control Theory and regulirovaniya.- 2nd ed., Rev. and add. Kiev, Publisher Vyshcha School Head Publishing, 1989
- [15] A. Klyuyev, BV Glazov, X. A. Dubrovsky AA Klyuev. [Proektirovanie process automation systems: A Reference Guide](#). 2nd ed., Revised and enlarged. Moscow, publishing Energoatomizdat, 1990
- [16] Kuo B. Theory and Design of digital control systems. Translated from English. Moscow, Publishing Engineering, 1986

Автоматическая настройка регуляторов состояния с использованием искусственной нейронной сети

А.А. Анисимов, В.И. Левин

ИГЭУ

Иваново, Россия

Аннотация — Статья посвящена разработке метода, позволяющего производить идентификацию объекта управления с обратной связью по вектору состояния, настройки (и последующей автоматической подстройки) регуляторов состояния. В основе метода лежит использование искусственной радиальной нейронной сети прямого распространения сигнала, что имеет определенное преимущество по сравнению с существующими поисковыми методами настройки.

Ключевые слова — искусственная нейронная сеть, регулятор состояния, идентификация, электромеханическая система, обучающая выборка, нейрон.

Automatic adjustment of state controllers using an artificial neural network

A.A. Anisimov, V.I. Levin

ISPU

Ivanovo, Russia

Abstract — The present article is devoted to development a method, allowing to perform identification of a control object with a negative feedback on a state vector, setting (and the subsequent automatic adjustment) of state controllers. The basis of the method is using a radial neural network of direct signal propagation. The method possesses a certain advantage over existing searching methods of adjustment.

Keywords — artificial neural network, state controller, identification, electromechanical system, training set, neuron.

Перспективным путем повышения качества управления сложными электромеханическими объектами в настоящее время считается применение регуляторов состояния (РС) различных типов [1]. Вместе с тем, для реализации потенциальных возможностей РС необходимо применение средств автоматической настройки. Это обусловлено погрешностями идентификации, применением упрощенных математических моделей объектов управления, а также большим количеством настраиваемых параметров подобных регуляторов. При этом большинство известных методов настройки основаны на рекуррентных алгоритмах численной оптимизации, что требует большого количества итерации [2].

Для снижения длительности настройки РС ранее было предложено применение искусственных нейронных сетей (ИНС), позволяющих проводить идентификацию объекта и коррекцию регулятора по результатам единственного эксперимента [2, 3, 4]. Однако подобные исследования проводились в основном для систем с регуляторами “входа-выхода”, синтезируемых по передаточной функции объекта. Значительно меньше внимания уделялось системам с обратной связью по вектору состояния, для синтеза которых необходима векторно-матричная модель объекта.

С целью повышения эффективности автоматической настройки систем управления с безынерционными РС в данной работе предлагается

использовать радиальную ИНС, на входы которой поступает вектор переменных состояния (рис. 1).

На вход объекта управления подается тестовый сигнал, затем по полученным переходным характеристикам ИНС выполняет идентификацию параметров векторно-матричной модели. На основе этих оценок блок “Синтез РС” выполняет расчет параметров регулятора методом модального управления.

В процессе настройки ИНС дает оценки матриц объекта A , B и C на основе анализа переходных характеристик для вектора состояния x и выходной координаты y , как показано на рис. 1, где s – переменная Лапласа; u_z – задающее воздействие; K – матрица РС. Такой подход позволяет наиболее точно оценить параметры объекта, в том числе слабо влияющие на выходную координату. При этом в процессе идентификации учитывается априорная информация об объекте управления в виде структуры и ряда известных параметров.

Расчет параметров РС проводится методом модального управления с использованием желаемого характеристического полинома $D(s)$, определяющего динамические свойства формируемой системы [1]. При этом полином $D(s) \setminus$

Для выполнения поставленной задачи возможно применение как ИНС с обратными связями, так и сетей прямого распространения (сигмоидальные, радиальные). Как показывает анализ, для решения задачи

идентификации параметров системы по переходным характеристикам целесообразно использовать радиальную ИНС, позволяющую наиболее эффективно классифицировать получаемые данные [3, 4]. Подобные ИНС состоят из двух слоев, причем нейроны первого слоя реализуют радиальные функции (в данном случае функции Гаусса), а нейроны второго слоя вычисляют взвешенную сумму входных сигналов.

Радиальная ИНС представлена на рисунке 2.

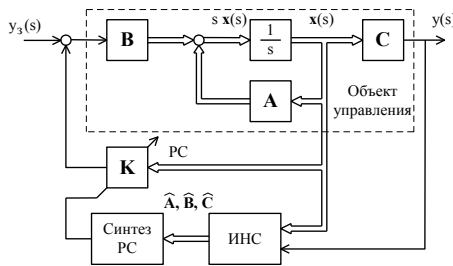


Рис. 1. Структурная схема системы автоматической настройки

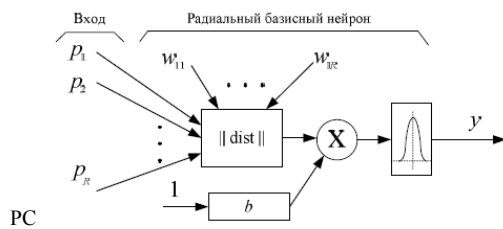


Рис. 2. Радиальный искусственный нейрон (p_1, p_2, \dots, p_R – компоненты входного вектора; b – смещение; w_{11}, \dots, w_{1R} – весовые коэффициенты; dist – функция определения Эвклидова расстояния; y – выход нейрона)

Для обучения радиальной ИНС используется алгоритм newrb(), входящий в состав программного комплекса MatLab 7.6, позволяющий оптимизировать количество нейронов 1-го слоя и координаты их центров. Обучающая выборка представляет собой массив переходных характеристик, полученных путем вариации параметров объекта управления методом Монте-Карло в диапазоне их возможных изменений.

Анализ массива переходных характеристик позволяет повысить точность идентификации, однако большой объем информации в данном случае приводит к резкому возрастанию количества переменных коэффициентов ИНС, что затрудняет процесс обучения [4]. Эффективным решением этой проблемы является использование на входе ИНС взвешенной суммы переменных состояния объекта.

Исследование предлагаемого метода автоматической настройки проводилось на примере типичной двухмассовой электромеханической системы (ЭМС) [5], структура которой приведена на рис. 3, где U_3 и U – задающее и выходное напряжения силового преобразователя (СП); M и M_y – моменты двигателя и упругой передачи; Ω_1, Ω_2 – угловые скорости 1-й и 2-й масс; $K_{СП}=7$ и $T_{СП}=0,01$ с – коэффициент передачи и постоянная времени СП; $C=2,17$ Вб – конструктивный параметр двигателя; $T_я=0,044$ с, $R_я=1,6$ Ом – постоянная времени и сопротивление якорной цепи; $J_1=0,06$ кг·м², $J_2=0,013$ кг·м² – моменты инерции 1-й и 2-й масс; $C_{12}=54,23$ Н·м/рад и $K_д=0,15$ Н·м – коэффициенты жесткости и трения механической передачи.

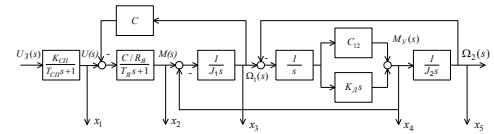


Рис. 3. Структурная схема линейной модели двухмассовой ЭМС

Для данного объекта методом модального управления был синтезирован РС на основе желаемого характеристического полинома Ньютона при среднегеометрическом корне $\Omega_0=225$ рад/с $D(s)=s^5+1125 \cdot s^4+506250 \cdot s^3+113,9 \cdot 10^8 s^2+1,28 \cdot 10^{10} s+5,76 \cdot 10^{11}$ в результате для номинальных параметров ЭМС были получены следующие значения:

$$K = [-1,4 \quad -21,3 \quad -278,75 \quad -448,98 \quad -102,28].$$

Учитывая особенности объекта, в качестве переменных параметров при формировании обучающей выборки ИНС были выбраны моменты инерции J_1 и J_2 , а также коэффициенты жесткости и трения – C_{12} и $K_д$. Диапазон варьирования указанных параметров составлял $\pm 30\%$ от номинальных значений, объем выборки 300 переходных характеристик. В результате обучения была сформирована радиальная ИНС, состоящая из 57 нейронов.

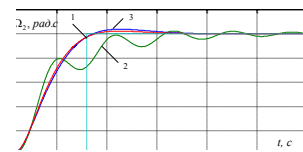


Рис. 4. Переходные процессы до и после автоматической настройки РС

Для тестирования сформированной таким образом ИНС использовалась выборка, аналогичная обучающей. Линейный характер регрессионной зависимости оценок, полученных при помощи ИНС, от действительных значений параметров объекта говорит об адекватности обучения. При этом погрешность идентификации параметров ЭМС не превышает 0,1%, что существенно ниже погрешности оценивания соответствующих параметров только по выходной координате объекта.

Предлагаемый нейросетевой метод автоматической настройки систем управления с РС был реализован в виде программы на языке комплекса MatLab 7.6. Результаты моделирования процессов идентификации и настройки системы управления двухмассовой ЭМС приведены на рис. 4, где кривая 1 соответствует номинальным параметрам объекта. Отклонение параметров объекта управления от расчетных ($J_1=0,105$ кг·м², $J_2=0,0151$ кг·м², $C_{12}=148,05$ Н·м/рад, $K_д=0,087$ Н·м) приводит к существенному ухудшению динамики системы (кривая 2). Однако после идентификации параметров при помощи радиальной ИНС и расчета скорректированного РС переходная характеристика (кривая 3) практически совпадает с эталонной.

Таким образом, предложенный подход, основанный на идентификации параметров объекта управления при помощи радиальной ИНС, позволяет сократить длительность настройки безынерционного РС. При этом ИНС анализирует переходные характеристики по всем координатам состояния, что дает возможность повысить точность оценивания параметров объекта управления.

Виртуальная лаборатория исследования колебаний

И.А. Кравале, Д.А. Сапига

Ивановский государственный энергетический университет
Иваново, Россия

Аннотация — это статья является описанием виртуальной лаборатории, выгодой использования которой является познание теории колебаний студентом с минимальной затратой времени.

Ключевые слова — дифференциальное уравнение; колебание; визуализация.

Virtual laboratory for study of vibrations

I.A. Kravale, D.A. Sapiga
Ivanovo state power University
Ivanovo, Russia

Abstract — The article is a described of a virtual laboratory, the benefit of which is knowledge of the theory of oscillations by a student with a minimum expenditure of time.

Keywords — differential equation; oscillation; visualization.

I. ВВЕДЕНИЕ

Переход на двухуровневую систему образования студентов привнес ряд некоторых проблем. Так, например для бакалавриата, это недостаток лекций и семинарских часов. Это не дает возможности студенту-инженеру вникнуть в глубину получаемых знаний. Разработанная виртуальная лаборатория решает проблему в одном из аспектов изучения физики и математики: дифференциальные уравнения (ДУ) II порядка для колебаний с одной степенью свободы, которые физически описывают изменение напряжения в колебательном контуре или движение грузика на пружине с течением времени. Аналитическое решение таких уравнений – задача не из простых, в особенности для студентов первого курса. А получив в ответе набор синусов и косинусов, становится невозможным представить, как ведет себя целевой параметр в той или иной колебательной системе, не прибегая к компьютерным технологиям. Виртуальная лаборатория позволяет решать ДУ II порядка и дает графическое представление их решений. Таким образом, студент знакомится с физикой такого явления, как колебание, не углубляясь в знание математики процесса, что и необходимо для студента технического ВУЗа.

II. ОПИСАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Для создания виртуальной лаборатории использовалась среда программирования MATLAB.

Созданный удобный интерфейс, не требует глубоких знаний ни математики, ни физики. Как видно по рис.1, в верхней половине располагается декартова система координат. Здесь и будет выводиться график зависимости положения грузика на пружине от времени. Ниже – закон движения грузика в дифференциальной форме. Характер колебательного движения зависит от массы грузика (m); сопротивления, оказанного на грузик при движении (b); жесткости пружины (c); внешнего воздействия (F) и его частоты (p); начальных условий: начальное положение грузика относительно точки равновесия (X_0) и начальной скорости (V_0). Пользователь вводит технические параметры колебательной системы, под постоянным контролем системы безопасности. Она охраняет от случайных ошибок – пример: масса равна нулю или меньше нуля.

При запуске внутренняя программа лаборатории численно решает ДУ второго порядка, путем разбиения его на систему двух ДУ первого. Так, ДУ для колебательной системы грузика на пружинке имеет вид:

$$mx''+bx'+cx = F_0 \sin(pt) ,$$

или

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_0}{m} \sin(pt) - \frac{b}{m} v - \frac{c}{m} x, \quad (1)$$

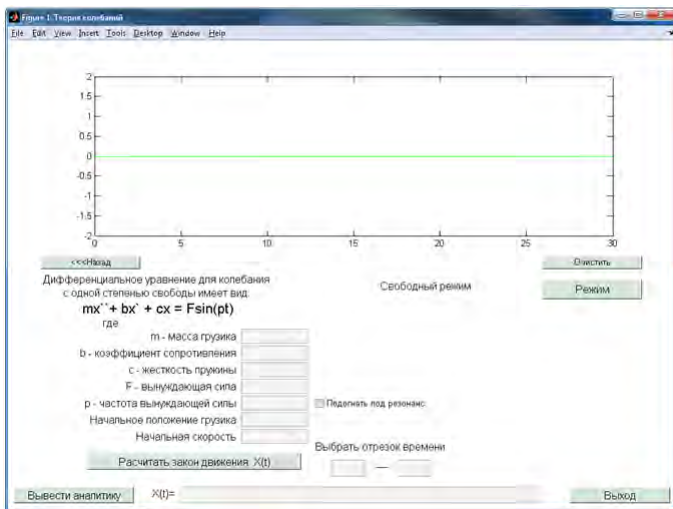


Рис.1. Интерфейс виртуальной лаборатории для груза на пружине.

$$\frac{dx}{dt} = v, \quad (2)$$

и сопровождаются начальными условиями:
 $v(0) = v_0; x(0) = x_0$.

Решение уравнений 1 и 2 реализуется методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Некоторые решения приведены ниже (Рис. 2)

В лабораторию интегрирована функция «Режим», где пользователь может выбрать один из восьми предложенных режимов. В зависимости от инертной и колебательной составляющих получит подсказки на ввод сопротивления среды, силы вынуждающего колебания и ее частоты под выбранный режим. Также пользователь имеет возможность самостоятельно выбрать промежуток времени (По умолчанию 0-30с), на котором хочет исследовать колебание выбранной им системы. Интеллектуальная система в «Свободном режиме» распознает характер колебания в зависимости от введенных пользователем технических параметров.

Таким образом, данная виртуальная лаборатория позволяет изучить колебания в двух колебательных системах. Это замкнутый контур и грузик на пружине. Также пользователь познакомится, с тем как изменится характер колебания при изменении какого-либо параметра системы, не углубляясь в их математическую природу этого физического процесса.

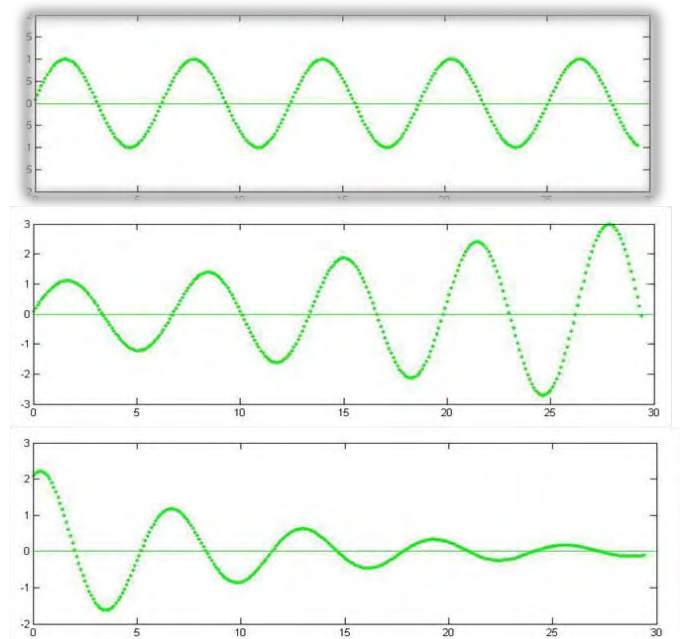


Рис.2. Графики при различных параметрах колебательной системы:

- а – свободное незатухающее колебание ($[m \ b \ c \ F \ p \ X_0 \ V_0] = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$);
- б – колебание без сопротивления, явление резонанса ($[m \ b \ c \ F \ p \ X_0 \ V_0] = [1 \ 0 \ 1 \ 0.2 \ 1 \ 0 \ 1]$);
- в – затухающее колебательное движение ($[m \ b \ c \ F \ p \ X_0 \ V_0] = [1 \ 0.2 \ 0 \ 0 \ 2 \ 1]$)

Список литературы

- [1] Методические указания по проведению лабораторных работ для студентов специальностей 180100 и 180400. / Сост.: Жуков В.П., Митрофанов А.В. Иваново, 2012.
- [2] Яблонский А. А. Курс теории колебаний / А. А. Яблонский. –М.; Краснодар: Лань, 2003.
- [3] Кривилев А. В. Основы компьютерной математики с использованием системы MATLAB / А. В. Кривилев. – М., 2005.

References

- [1] Methodical instructions for laboratory works for students of specialties and 180100 180400. / Comp.: Zhukov V. P., Mitrofanov A.V. Ivanovo, 2012.
- [2] A. A. Yablonskiy. The Rate of oscillation theory / A. A. Jablonski. M.; Krasnodar: DOE, 2003.
- [3] Krivilev A. V. Fundamentals of computer mathematics system using MATLAB / A. V. Krivilev. – M., 2005.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ ANSYS ДЛЯ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ГЕРМЕТИЗАТОРОВ

А.А. Голяс, А.М. Власов, В.А. Полетаев

ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина"

Иваново, Россия

E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

Аннотация

В процессе работы магнитножидкостного герметизатора в слое магнитной жидкости возникают силы внутреннего трения, которые приводят к потерям энергии на их преодоление. Величина сил трения зависит от площади контакта магнитной жидкости с деталями магнитножидкостного герметизатора, градиента скорости, а также от вязкости магнитной жидкости. Выделяемая при трении энергия идёт на нагрев узлов магнитножидкостного герметизатора. Целью работы является моделирование процесса нагрева узлов магнитножидкостного герметизатора.

Проведено исследование процесса нагрева поверхности полюсов в результате воздействия тепловой энергии, выделяемой в процессе внутреннего трения, возникающего в слое магнитной жидкости. Была получена общая картина распределения температур в поперечном сечении полюса, которая была сопоставлена с результатами эксперимента, проведённого с использованием установки для определения влияния температуры в рабочем зазоре на момент трения магнитножидкостных уплотнений. При сравнении результатов моделирования с результатами эксперимента была выявлена сходимость с погрешностью в пределах 10%.

Ключевые слова: температура, программа ANSYS, охлаждение, магнитножидкостное уплотнение.

THE USE OF THE ANSYS FOR THERMAL ANALYSIS OF THE MAGNETIC FLUID SEALS

A.A. Goljas, A.M. Vlasov, V.A. Poletaev

Ivanovo State Power Engineering University

Ivanovo, Russian Federation

E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

Abstract

In the process of magnetic fluid seal in a layer of magnetic fluid internal friction forces arise which lead to the loss of energy on overcoming them. The magnitude of the friction forces depends on the contact area of the magnetic fluid with the items magnetic fluid seal, velocity gradient, and the viscosity of the magnetic fluid. Released by friction energy goes to heating units magnetic fluid seal. The aim of the work is to simulate the process of heating nodes of the magnetic fluid seals

A study of the process of heating the surface of the pole as a result of exposure to thermal energy released in the process of internal friction arising in a layer of magnetic fluid. The overall picture of the temperature distribution was obtained in the cross section the pole, which was compared with the results of an experiment conducted by using an apparatus for determining the effect of temperature in the working gap at the moment of friction of magnetic fluid seals. When comparing the simulation results with experimental results was revealed convergence to within 10%.

Keywords: temperature, the program ANSYS, cooling, magnetic fluid seal.

Программный комплекс ANSYS относится к числу лидеров в области CAE-продуктов конечно-элементного анализа и имеет почти сорокалетний опыт в решении прикладных задач численными методами. Первая версия ANSYS, вышедшая в 1970 году позволяла проводить расчёты напряженно - деформированного состояния конструкций и тепловые расчеты в стационарной постановке, с тех пор возможности программы выросли многократно. Основным направлением развития программного кода ANSYS, определенным его основателем профессором Джоном Свонсоном (John

Swanson), стала реализация междисциплинарных инженерных расчетов. Это во многом определило политику развития компании ANSYS, Inc., и в настоящее время программный комплекс ANSYS охватывает практически все виды инженерного анализа: от механики деформируемого твердого тела и теплового анализа до гидрогазодинамики и анализа процессов горения, взрыва, теплообмена и фазовых переходов, электродинамики.

С помощью программы ANSYS можно выполнить тепловой анализ для следующих задач: стационарная

теплопроводность; неустановившийся температурный режим; расчет температурных напряжений и деформаций.

Для определения влияния вязкости используемой магнитной жидкости, напряженности магнитного поля, частоты вращения вала, величин шероховатости Ra и волнистости поверхностей сменных втулок и полюсов на величину температуры и тем самым на момент трения в рабочем зазоре магнитожидкостного устройства была спроектирована и изготовлена установка с радиальным магнитожидкостным уплотнением [1]. В процессе работы уплотнение нагревается до 60 °С. Для решения задачи распределения температуры приняты условия: начальная температура нагрева уплотнения 60 °С; температура окружающей среды 22 °С; время охлаждения 30 минут.

Порядок действий:

1. Запустить *ANSYS Workbench*.
2. Выбрать тип решателя. Добавить в рабочую область проекта блок *Transient Thermal*.
3. В *Engineering Data* из базы данных материалов добавить в расчет необходимые данные.
4. Загрузить геометрической моделью уплотнения, заранее созданную в CAD системе «КОМПАС 3D». (Рис.1).

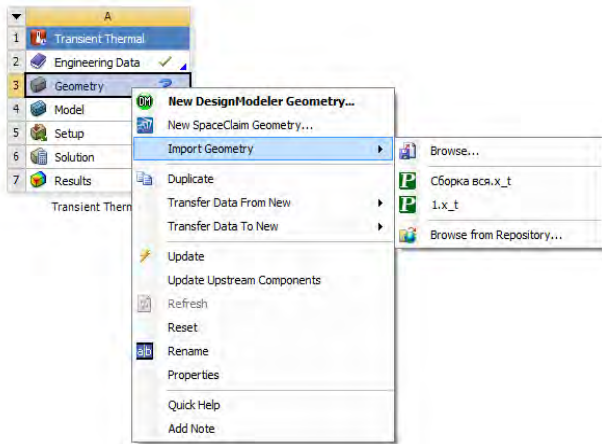


Рис.1 Добавление расчетной CAD модели

Загруженная геометрическая модель представлена на рис.2.

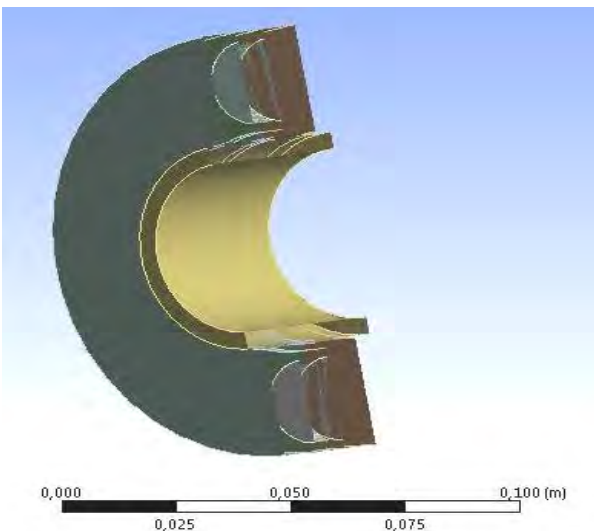


Рис. 2. Геометрическая модель уплотнения

5. Зайти в *Geometry* и выбрать для каждой детали сборки тип элемента *Fluid* (жидкий) или *Solid* (твердый) (Рис. 3).

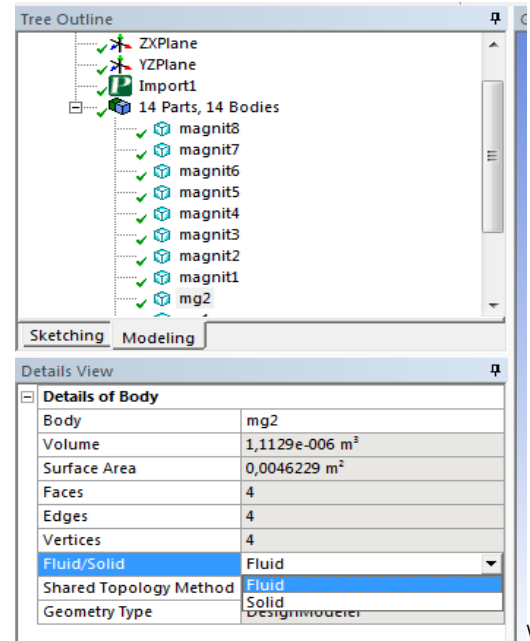


Рис. 3. Выбор типа элемента.

6. Приступить к созданию конечно-элементной модели. Зайти в ячейку *Model*. Откроется приложение *Mechanical*. Выбрать ветку *Geometry – Solid* и завести данные по материалам деталей. Далее через ветку *Mesh* задать параметры конечно-элементной модели. Затем вызвать контекстное меню ветки *Mesh* и пункт *Generate Mesh* (Создать сетку) (Рис. 4). При этом будет создана конечно-элементная модель уплотнения (Рис. 5)

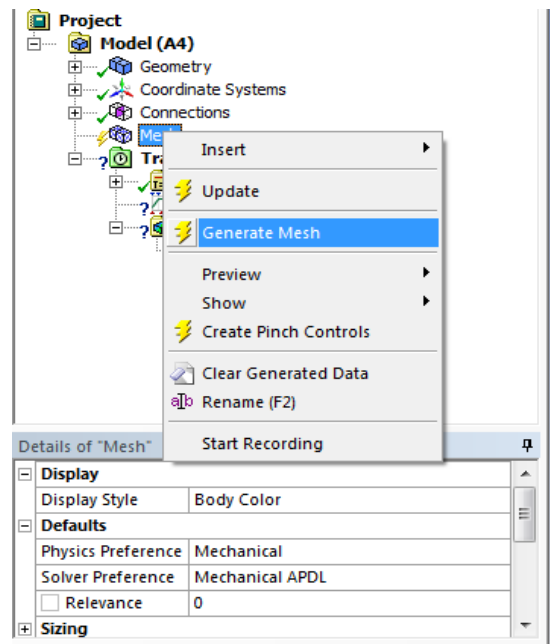


Рис. 4. Генерирование конечно-элементной сетки

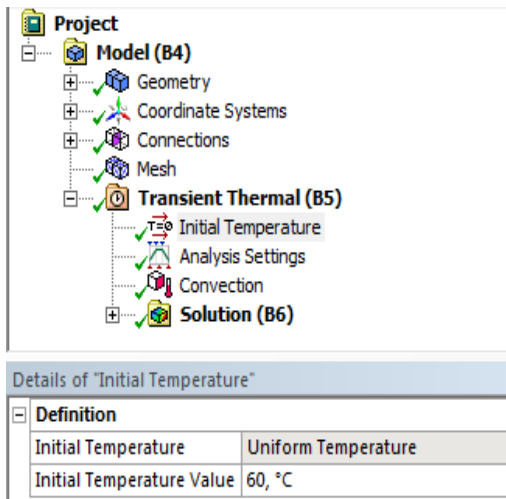


Рис. 5. Задание начальной температуры

7. Далее задать начальные условия для расчета. В *InitialTemperature* установить начальную температуру уплотнения равной 60°C (Рис. 6).

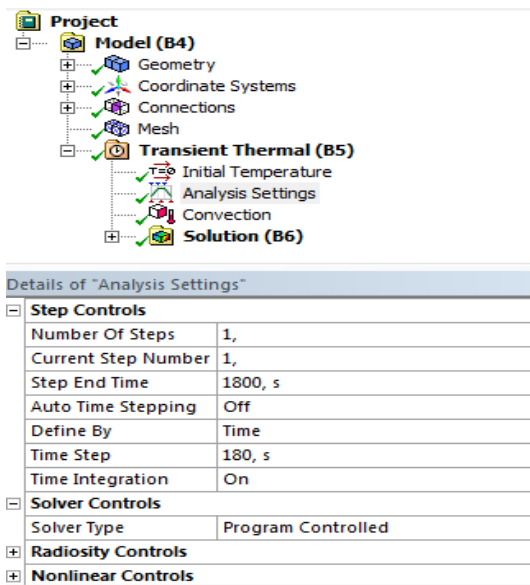


Рис. 6. Задание условий моделирования

8. Затем в *AnalysisSettings* определить последовательность расчета. В свойствах *AnalysisSettings* отключить автоматический выбор шага расчета (*AutoTimeStepping*), а время окончания расчета установить в 1800 с; шаг расчета 180 с (Рис. 7).

9. Далее задать параметры теплообмена уплотнения с окружающей средой. Добавить тепловое воздействие типа конвекция (*Convection*). В свойстве *Geometry* ветки *Convection* определить область уплотнения, на которое происходит тепловое воздействие. Также задать температуру окружающей среды 22 °C и коэффициент теплопередачи (*FilmCoefficient*).

10. В *Solution* добавить расчетный параметр *Temperature*(температура) и выбрать *Solve* с целью начала расчета задачи.

11. После вычисления получен результат (Рис.8.).

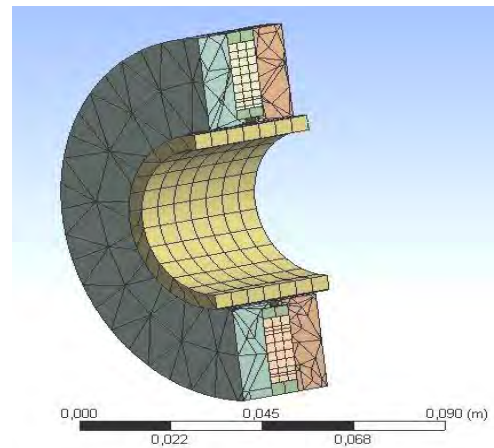


Рис. 7. Конечно-элементная модель уплотнения

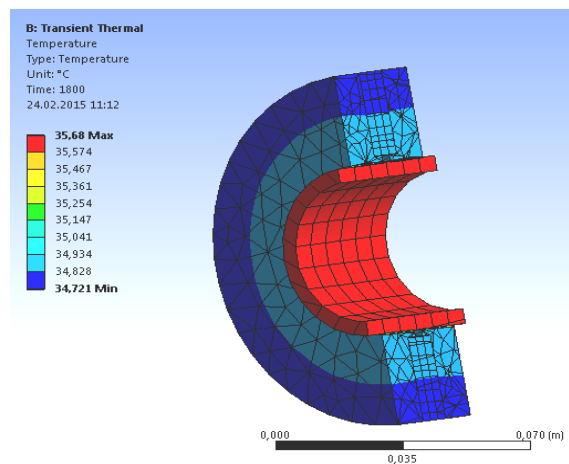


Рис.8 . Температурное поле

Выводы: Получение общей картины распределения температуры позволяет более подробно проанализировать процессы происходящие в магнитножидком герметизаторе при его эксплуатации, а также оптимизировать его конструкцию [2]

Список литературы

- [1] Полетаев В.А., Пахолкова Т.А., Власов А.М. Установка для исследования величины рабочего зазора на момент трения магнитожидкостных устройств.// Трение и смазка в машинах и механизмах. – Москва. – М.: «Машиностроение». – 2013. – № 9. – С. 29– 31.
- [2] Полетаев В.А., Перминов С.М., Пахолкова Т.А., Власов А.М., Исследование влияния качества поверхности магнитных полюсов на момент трения магнитожидкостных герметизаторов.// Трение и смазка в машинах и механизмах. – Москва. – М.: «Машиностроение». – 2014. – № 9. – С.38- 43

References

- [1] Poletaev V.A. Paholkova T.A, Vlasov A.M. Ustanovka dlja issledovaniya velichiny rabocheho zazora na moment treniya magnitozhidkostnyh ustrojstv. [The setup for studying the magnitude of the working gap of the friction torque magneto fluid devices.] *Trenie i smazka v mashinah i mehanizmah.* – Moskva. – M.: «Mashinostroenie», 2013, issue 9, pp.29-31
- [2] Poletaev V.A., Perminov S.M., Paholkova T.A., Vlasov A.M. Issledovanie vlijaniya kachestva poverhnosti magnitnyh poljusov na moment treniya magnitozhidkostnyh germetizatorov. [Study of the influence of surface quality of the magnetic poles at the time of friction of the magnetic liquid sealants.] *Trenie i smazka v mashinah i mehanizmah.* – Moskva. – M.: «Mashinostroenie», 2014, issue 9, pp.38-43

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

А.В. Федорова, А.М. Власов, В.А. Полетаев
ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина"
Иваново, Россия
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

Аннотация

Разработана и использована методика построения трехмерной модели шероховатой поверхности деталей, включающая значения R_a , R_z и R_{max} для участка поверхности, профилограмму и фотоснимок участка поверхности.

Ключевые слова: шероховатость, модель, масштаб, профилограмма.

VISUALIZATION OF THE SURFACE PARTS OF FRICTION UNITS

A.V. Fedorova, A.M. Vlasov, V.A. Poletaev
Ivanovo State Power Engineering University
Ivanovo, Russian Federation
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

Abstract

Developed and used method of constructing a three-dimensional model of the rough surface of the parts, including the values of R_a , R_z and R_{max} for the surface area, profilogram and a photo of the area of the surface.

Keywords: surface roughness, model, scale, profilogram.

В современных графических процессорах для визуализации особенностей трехмерных объектов применяется совокупность синтезирующих методов. Среди них выделяют класс методов для визуализации неровностей поверхности (микрорельефа) трехмерных объектов. Их использование позволяет воспроизводить структуру поверхности объекта более реалистично. Существуют два основных метода визуализации микрорельефа: на уровне геометрии и на уровне визуализации плоских поверхностей. Отображение микрорельефа на уровне геометрии достигается за счет использования триангуляции объекта и последующего смещения новых вершин в нужную позицию (displacement mapping). Другой метод визуализации микрорельефа основан на изменении освещенности неровностей и смещении текстурных координат для выборки из текстур материала. На данный момент наиболее популярны следующие разновидности такого метода: метод карт нормалей (normal mapping), метод текстурирования с перекрытием (parallax mapping) и рельефное текстурирование (reliefmapping). Также существует множество их модификаций, устраняющих те или иные их недостатки, например, метод рельефного текстурирования на основе сферических гармоник

(spherical harmonic relief mapping) и пр. Метод карт нормалей использует специальную текстуру, содержащую информацию о нормалях (вектор направления) в точках поверхности объекта. Такой метод позволяет приблизительно передать рельефность поверхности при помощи видимых различий в освещенности неровностей. В методе текстурирования с перекрытием используются метод карты нормалей и одноканальная карта высот, которая, как правило, хранится в виде четвертой компоненты карты нормалей. Для имитации рельефности в видимых точках вычисляется величина смещения текстурных координат. После этого новые координаты используются для выборки из текстуры. Величина смещения рассчитывается из данных карты высот и положения наблюдателя. Метод рельефного текстурирования представляет собой форму упрощенной локальной трассировки лучей. Трассировка используется для нахождения ближайшей точки, видимой по направлению из точки наблюдения. Эта точка определяет текстурные координаты, используемые, как и в случае текстурирования с перекрытием. Существуют различные способы нахождения видимой точки. Линейный поиск с последующим уточнением методом бинарного поиска

является одним из них. Суть линейного поиска заключается в равномерном разбиении текстурного пространства на ряд слоев и нахождение ближайшего слоя, точка пересечения с которым попадает внутрь предполагаемого рельефа. После этого на отрезке между найденным слоем и предыдущим производится бинарный поиск с целью уточнения точки пересечения. Как правило, число слоев и глубину бинарного поиска ограничивают сравнительно небольшими величинами, поэтому найденная точка будет лишь некоторым приближением. Такое ограничение связано с вычислительной сложностью точного поиска.

Известно, что после механической обработки на поверхностях деталей образуются микронеровности. Рельеф поверхности состоит из чередующихся выступов и впадин. Для наилучшего изучения шероховатости поверхности разработан и использован метод построения трехмерной модели шероховатой поверхности деталей. Для создания трехмерной модели поверхности использовались следующие данные: значения R_a , R_z и R_{max} для участка поверхности; профилограмму участка поверхности; фотоснимок участка поверхности [1].

Согласно методу на поверхности втулки был выбран моделируемый участок 0.8мм на 0.8мм, который маркировался и фотографировался. Фотография участка поверхности была получена при помощи металлографического микроскопа ЛОМО МЕТАМ с увеличением в 40 раз. Фотография моделируемого участка представлена на Рис. 1.

Профилограммы и значения R_a , R_z и R_{max} получены на профилографе-профилометре БВ-7669. При помощи профилографа на участке измерялась шероховатость поверхности. После измерения получены значения R_a , R_z , R_{max} и профилограмма. Результаты представлены на Рис.2.

На профилограммах дан масштаб, что позволяет сделать вывод о размерах неровностей поверхности. Значения R_a , R_z и R_{max} позволяют получить обобщенные сведения о поверхности.

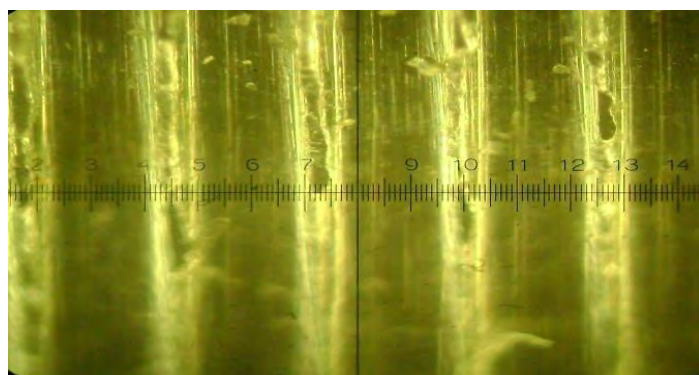


Рис. 1. Фотография моделируемого участка поверхности

Анализируя фотографию (рис 1) можно подразделить все неровности на три типа: тип 1 глубокие борозды на поверхности втулки, легко отождествляемые со спадами на профилограммах; тип 2 неглубокие борозды на поверхности втулки, формирующие поверхность, на профилограммах отображаемые малыми впадинами; тип 3, прочие малые неровности.

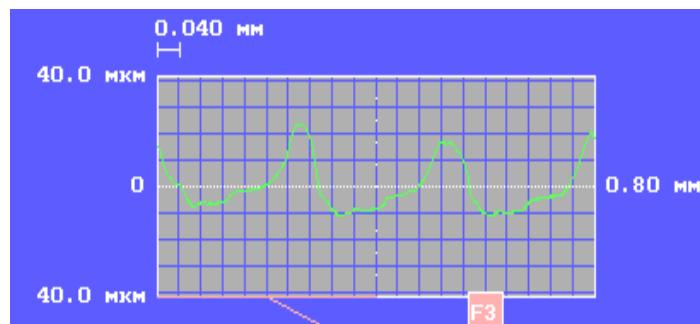


Рис. 1. Профилограмма поверхности втулки сталь 3 ($R_a=7,210\text{мкм}$, $R_z=29,45\text{мкм}$, $R_{max}=33,195\text{мкм}$)

Для каждого типа неровности есть значение средней глубины - L . Для создания трехмерной модели использовалось значение разницы $H_{i\ min}$ и $H_{i\ max}$ по каждому типу неровностей.

По полученным значениям шероховатости поверхности и профилограмме, можно определить значение величины L для каждого типа неровности:

$$L_1 = R_{max} \quad (1)$$

$$L_2 = ((H_{2max} - H_{2min}) + k_1 * R_z) / 2 \quad (2)$$

$$L_3 = ((H_{3max} - H_{3min}) + k_2 * R_a) / 2 \quad (3)$$

где, k понижающий коэффициент, введенный для корректирования значений R_z и R_a . Коэффициент определяется следующим образом:

$$k_2 = \frac{n - n_2}{n} \quad (4)$$

$$k_3 = \frac{n - n_3}{n} \quad (5)$$

где, n – общее число ячеек в профилограмме, n_2 – число ячеек, в которых значение отклонения профиля от линии m превышает $\frac{R_z}{2}$, n_3 – число ячеек, в которых значение отклонения профиля от линии m превышает $\frac{R_a}{2}$.

Моделирование проводилось в программе 3ds Max.

При создании трехмерной модели шероховатости поверхности втулки моделируется в масштабе плоскость (размер моделируемого участка – 0.8x0,8мм, размер моделируемой плоскости 200x200 мм) с заданными конечными элементами – вершинами, причем плоскость содержит 100x100 ячеек (Рис. 3).

Далее на плоскость наносится текстура, созданная из фотографии моделируемого участка поверхности (Рис. 4).

На плоскости определяются вершины, соответствующие областям неровности типа 1 и им задается в масштабе, указанном выше величина L_1 , причем ее значение после приведения в соответствии с действующим в модели.

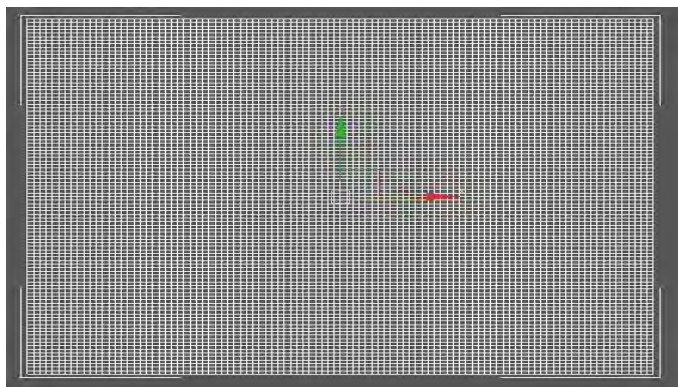


Рис. 3. Моделируемая поверхность

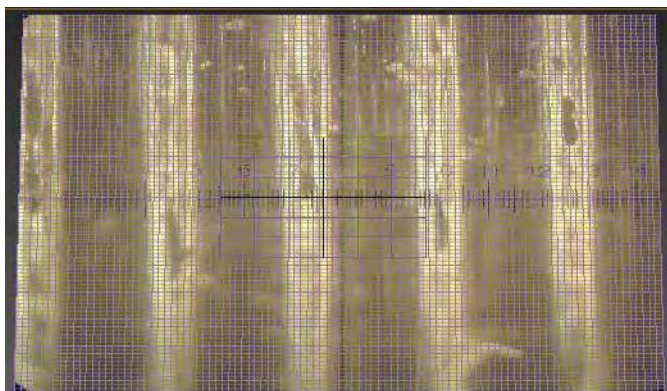


Рис. 4. Моделируемая поверхность с нанесенной текстурой

Неровностям типа 2 и 3 таким же образом задаются величины L_2 и L_3 соответственно. Моделируемая поверхность с заданными величинами L для каждого типа неровностей принимает вид (Рис. 5):

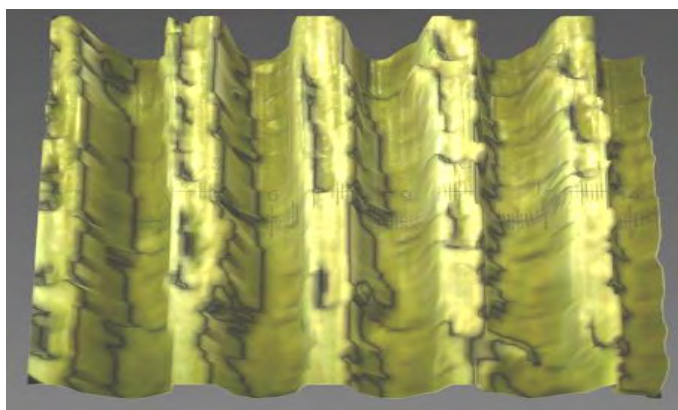


Рис. 5. Моделируемая поверхность с заданными величинами L

При помощи специального оператора программы, в которой проводится моделирование поверхности, задается общая величина случайной неровности R равная:

$$R = (H_{3\max} - H_{3\min}) * k_3 = (0.435 + 0.428) * 0.7 = 0.4781 \quad (6)$$

Оператор задает моделируемому участку неровность с максимальным значением отклонения от средней плоскости поверхности, равным R .

После выполнения всех операций моделирования, программой рассчитывается рендер поверхности (Рис. 6).

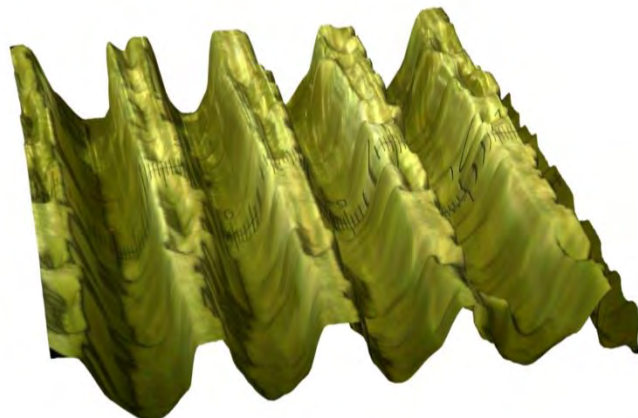


Рис. 6. Трехмерная модель участка поверхности образца

Полученную трехмерную модель можно считать адекватной моделью участка поверхности втулки, так как в ней учтены значения шероховатости, полученные по замеру на этом участке. Так же в построении модели были использована фотография данного участка, как источник информации о расположении неровностей на поверхности участка [2-3].

Список литературы

- [1] Полетаев В.А., Чернов Л.К. Визуализация поверхности деталей после магнитной галтовки в магнитно-абразивном устройстве. Вестник ИГЭУ. - Иваново: - 2013. - № 5. - С.72-76.
- [2] Полетаев В.А., Перминов С.М., Пахолкова Т.А., Власов А.М., Исследование влияния качества поверхности магнитных полюсов на момент трения магнитоожидкостных герметизаторов. // Трение и смазка в машинах и механизмах. - Москва. - М.: «Машиностроение». - 2014. - № 9. - С.38-43
- [3] Власов А.М., Полетаев В.А., Пахолкова Т.А. Построение трехмерной модели шероховатой поверхности // Новые материалы и технологии в машиностроении: сборник научных трудов. - Брянск: Брянская государственная инженерно-технологическая академия. - 2014. - №20. - С.19-22

References

- [1] Poletaev V.A., Chernov L.K. Vizualizacija poverhnosti detalej posle magnitnoj galtovki v magnitno-abrazivnom ustrojstve. [Visualization of the surface magnetic parts after surface finishing in abrasive magnetic device.] Vestnik IGJeU. - Ivanovo: 2013, issue 5, pp.72-76.
- [2] Poletaev V.A., Perminov S.M., Paholkova T.A., Vlasov A.M. Issledovanie vlijaniya kachestva poverhnosti magnitnyh poljusov na moment trenija magnitozhidkostnyh germetizatorov. [Study of the influence of surface quality of the magnetic poles at the time of friction of the magnetic liquid sealants.] Trenie i smazka v mashinah i mehanizmah. - Moskva. - M.: «Mashinostroenie», 2014, issue 9, pp.38-43.
- [3] Vlasov A. M., Poletaev, V. A., Pahalkova T. A. Postroenie trehmernoj modeli sherohovatoj poverhnosti [Construction of three-dimensional model of a rough surface] Novye materialy i tehnologii v mashinostroenii: sbornik nauchnyh trudov. - Brjansk: Brjanskaja gosudarstvennaja inzhenerno-tehnologicheskaja akademija, 2014, issue 20, pp.19-22

Нейтральная поверхность детали при сложном нагружении

М.А. Ноздрин, К.П. Бондарев

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

Иваново, Россия

nozdrin@tipm.ispu.ru

Аннотация - в работе для задачи сложного нагружения детали машины формулируется алгоритм построения нейтральной поверхности, на которой нормальные напряжения во всех точках равны нулю. Рассматривается консоль под действием двух сосредоточенных сил и распределенной нагрузки. Нахождение нейтральной поверхности в детали позволяет определить опасные точки, расположенные на наибольших расстояниях от поверхности. В этих точках проводится расчет по выбранным теориям прочности.

Ключевые слова – сложное сопротивление, нейтральная поверхность, график нейтральной поверхности.

Neutral surface of a detail at difficult loading

Mikhail Nozdrin, Konstantin Bondarev

Ivanovo State Power University of V.I. Lenin

Ivanovo, Russia

nozdrin@tipm.ispu.ru

Abstract - in work for a problem of difficult loading of a detail of the machine the algorithm of creation of a neutral surface is formulated, on which normal tension is equal in all points to zero. The console under the influence of two concentrated forces and the distributed loading is considered. Finding of a neutral surface in a detail allows to define the dangerous points located at the greatest distances from a surface. In these points calculation for the chosen theories of durability is carried out.

Keywords – combined resistance, neutral surface, schedule of a neutral surface.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Нейтральная поверхность – это поверхность, в которой нормальные напряжения равны нулю [1].

Рассматривается консоль под действием двух сосредоточенных сил и распределенной нагрузки (рис.1).

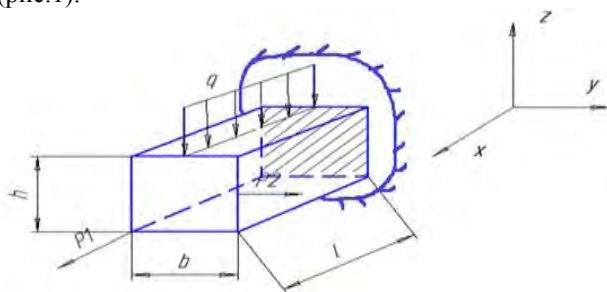


Рис. 1. Схема нагружения детали

II. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для решения данной задачи необходимо вывести уравнения изгибающих моментов в плоскостях ZX и YX, возникающих при данном нагружении.

Уравнение нейтральной поверхности имеет вид:

$$\sigma = \frac{N_x}{A} - \frac{M_y}{I_y} \cdot z - \frac{M_z}{I_z} \cdot y = 0 \quad (1)$$

Уравнения изгибающих моментов записываются в виде:

- уравнение момента в плоскости ZX:

$$M_y(x) = P1 \cdot \frac{h}{2} - \frac{q \cdot x^2}{2} \quad (2)$$

- уравнение момента в плоскости YX:

$$M_z(x) = P1 \cdot \frac{b}{2} + P2 \cdot x \quad (3)$$

По известной формуле нейтральной поверхности (1) составляется уравнение для данного вида нагружения:

$$z(x, y) = \frac{N(x) \cdot I_y}{A \cdot M_y(x)} - \frac{M_z(x) \cdot I_y}{I_z \cdot M_y(x)}, \quad (4)$$

где

$$N(x) = P1, \quad I_y = \frac{b^3 \cdot h}{12}, \quad I_z = \frac{b \cdot h^3}{12}, \quad A = b \cdot h$$

$N(x)$ – внутренняя продольная сила;

I_y, I_z – моменты инерции сечения;

A – площадь сечения детали.

Окончательный вид уравнения нейтральной поверхности, полученный после упрощающих преобразований:

$$z(x, y) = \frac{P1 \cdot b^2}{6(2M_1 - q \cdot x^2)} - \frac{2 \cdot (M_2 + P2 \cdot x) \cdot b^2}{h^2(2M_1 - q \cdot x^2)} y \quad (5)$$

III. ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ

Нейтральная поверхность (рис. 2) строится с помощью функции быстрого графика в среде Mathcad 15 [2], при следующих числовых параметрах:

- геометрические параметры $l=2$ м; $b=0,2$ м; $h=0,3$ м;
- параметры нагрузки $P1=300$ Н; $P2=100$ Н; $q=75$ Н/м.

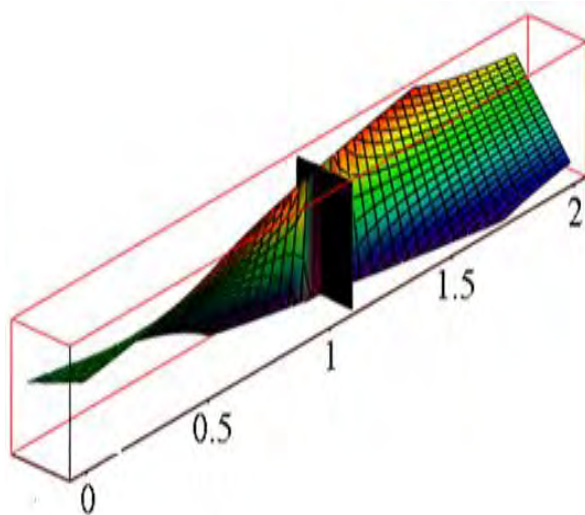


Рис. 2. Нейтральная поверхность

Нахождение нейтральной поверхности в детали позволяет определить опасные точки, расположенные на наибольших расстояниях от поверхности. В этих точках проводится расчет по выбранным теориям прочности.

При $x=1,035$ нейтральная поверхность уходит в бесконечность, а напряжения стремятся к нулю.

При $x=0$ (торцевое сечение) поверхность проходит практически посередине сечения, поэтому здесь наблюдаются наибольшие нормальные напряжения.

Список литературы

- [1] Феодосьев, В.И. Сопrotивление материалов. М.: МГТУ, 2000. – 592 с.
- [2] Ракитин, В.И. Руководство по методам вычислений и приложения MATHCAD. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 264 с.

References

- [1] Feodosev, V.I. Sopotivlenie materialov, Moscow: MGTU, 2000. 592 pp.
- [2] Rakitin V.I. Rukovodstvo po metodam vichisleniya i prilozheniya MATHCAD. Moscow: FIZMALIT, 2005. 264 pp.

РАСЧЕТ НА ИЗНОС МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ НИТИ

К. Н. Панченко, Т. Ю. Степанова
ФГБОУВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,
г. Иваново, РФ

Аннотация.

Предложена методика определения износа металлической нити при механической переработке на ткацком станке. Предложена модель определения износа текстильных нитей из различных материалов

Ключевые слова – Износ, металлическая нить, абразивное изнашивание, контактное давление, износостойкость материала

CALCULATING THE WEAR OF METAL THREAD

K.N. Panchenko, TY Stepanova.
Ivanovo State University of Chemistry and Technology,
Ivanovo, Russian Federation

Abstract.

A method for determining the wear metal wire for mechanical processing on the loom. A model for determining the wear of textile yarns of different materials

Keywords – Depreciation, metallic thread, abrasion, contact pressure, wear resistance of the material

Разработка методики расчета контактной пары «металлическая нить-металл» на износ позволяет решить задачу прогнозирования прочности основных нитей в процессе ткачества.

Существует много теорий, которые освещают отдельные аспекты инженерных расчетов на износ, поэтому необходимо создать методику расчета технической нити на износ.

При расчетах на износ для большинства случаев применяют линейную зависимость между временем изнашивания t и величиной износа U , то есть считают, что в период нормальной переработки нитей основы скорость изнашивания γ остается постоянной:

$$\gamma = U/t = \text{const.} \quad (1)$$

Основными факторами, определяющими скорость изнашивания, является удельное давление p и скорость скольжения v . Зависимость износа от p и v определяется видом изнашивания. Установлено [1-3], что для контактной пары «металлическая нить – металл оснастки ткацкого станка» основным видом износа является абразивный. Это определяется режимом переработки основных нитей на ткацком станке, то есть, нет больших удельных контактных давлений и высоких скоростей скольжения, температура эксплуатации $20 \div 28^\circ\text{C}$.

Закон Хрущева М.М. определяет, что для абразивного изнашивания линейный износ U прямо пропорционален удельному давлению p на поверхности трения и пути трения S :

$$U = k \times p \times S, \quad (2)$$

где k – коэффициент, характеризующий условия износа нити, Па^{-1} .

Контактирующие поверхности являются твердыми телами, и их контактирование будет происходить по прямой линии. В условиях производства, при взаимодействии нити с металлом оснастки ткацкого станка с определенным усилием и наличием упруго-пластических деформаций, контактирование будет происходить по площадке определенной длины. Длина площадки контактирования зависит от величины контактного давления, поверхностной твердости, микро- и макрогеометрических характеристик контактной пары.

Для большинства контактных пар аналогичной конструкции единичное усилие находится в пределах $0.03 \div 0.15$ Н. Для практических расчетов имеет смысл принять среднюю величину первоначальной площадки контактирования, исходя из конструктивных размеров ткацкого станка и толщины нити. В результате последующих контактов длина площадки контактирования будет увеличиваться.

Для выполнения расчета износа металлической нити примем, что сила F_n равномерно распределена на всех участках контактирования, поэтому на всех участках действует контактное напряжение, определяемое по формуле Герца:

$$\sigma_n = 0,418 \sqrt{g \frac{E_{np.}}{R_{np.}}}, \quad (3)$$

где g – нормальная нагрузка на единицу длины контактной линии (для цилиндрических поверхностей $g = \frac{F_n}{b}$;

F_n – контактная сила, Н; b – длина контактной площадки нити с деталью ткацкого станка, м);

$$E_{np.} = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2} \quad - \quad \text{приведенный модуль}$$

упругости, Па;

где E_1, E_2 – модули упругости материалов контактирующих тел, Па;

$$R_{np.} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} \quad - \quad \text{приведенный радиус}$$

кривизны контактирующих поверхностей, м;

где R_1, R_2 – соответственно радиус детали и радиус нити, м (Рис 1).

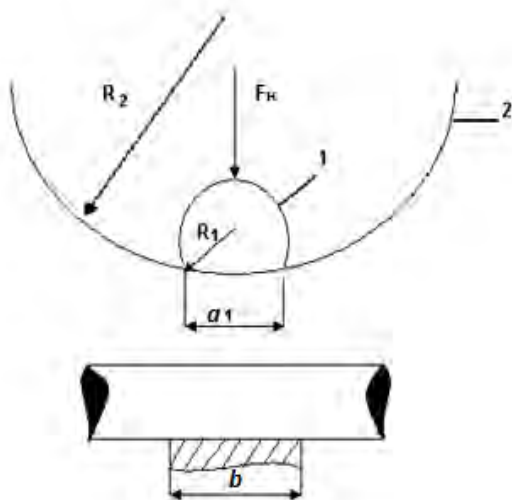


Рис 1. Схема контакта нити с деталью станка: 1 – нить; 2 – деталь; a_1, b – соответственно ширина и длина контактной поверхности [4]

Линейный износ (износ вдоль оси) нити при контакте за один цикл будет определяться по формуле

$$U = kS\sigma_{н.} \quad (4)$$

Путь трения за один цикл равен длине контактной площади нити с деталью ткацкого станка, т. е. $S = b$. Величина пути трения нити, которая проходит путь за цикл контакта в каждом конкретном случае, определяется конструкцией детали ткацкого станка.

Устойчивость к истиранию текстильных основных нитей определялась на приборе ТКИ-5-27-1. Истирающее воздействие создавали трением нитей о стальную поверхность глазков галев.

Изнашивание – это вид повреждения рабочих поверхностей открытых контактных пар, в данном случае нити и глазка галева. Износостойкость металлических нитей можно увеличить с помощью обработки замасливателями.

Истирание поверхностей нитей проводилось возвратно-поступательным движением о поверхность глазка галева вдоль оси нити. Нагрузка выбирается в зависимости от толщины испытуемой нити. После истирания до разрушения определяли коэффициент

износа нити, который учитывает площадь контактной поверхности и контактную силу:

$$k = \frac{n_n \cdot A}{n_s \cdot F_n}; \quad (5)$$

где n_n – среднее число циклов из его результатов испытаний необработанной нити; n_s – среднее число циклов эмульсированной нити; $A = b \cdot a_i$ – площадь контактной поверхности, м²; F_n – контактная сила, Н [4].

При взаимодействии нити и глазка галева с параллельно образующими равномерно распределенной нагрузкой интенсивности g площадка контакта имеет вид узкого прямоугольника, ширина которого определяется по формуле

$$a_1 = 2.15 \sqrt{g \frac{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}}{\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}}} \quad (6)$$

При истирании нити до разрушения происходит по площади

$$A = b \cdot a_i, \quad (7)$$

где b – длина контактной поверхности, м; a_i – ширина контактной поверхности, м.

По результатам испытаний нити определяем коэффициент условий изнашивания, который учитывает площадь контактного пятна и контактную силу. Определим изменение размеров металлической нити, вызванное увеличением площади контактирования после цикла истирания (Рис 2).

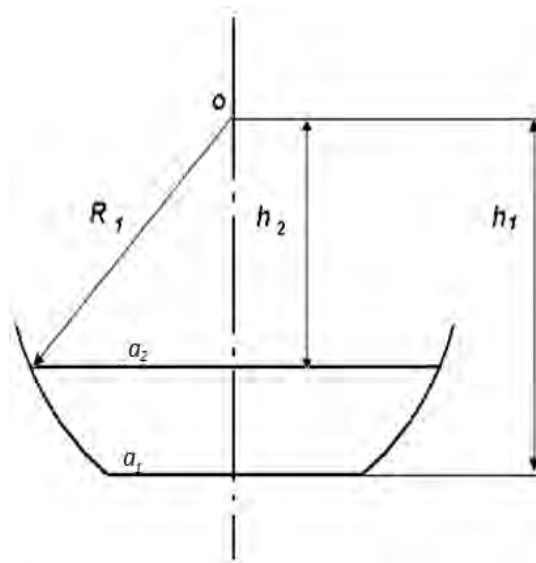


Рис 2 Определение контактных площадок нити до и после цикла истирания [4]

Высота от площади контактирования до центра окружности O перед циклом равна:

$$h_1 = \sqrt{R^2 - a_1^2}, \quad (8)$$

где R – радиус цилиндрической поверхности нити.

Тогда после цикла истирания нити

$$h_2 = h_1 - U_1. \quad (9)$$

Тогда после цикла истирания нити

$$h_2 = h_1 - U_1. \quad (10)$$

Список литературы

- [1] Степанова, Т. Ю. Исследование влияния ПАВ на фрикционные свойства волокон /Т. Ю. Степанова, Т. Г. Комарова // Эффект безызносности и триботехнологии. – ИГХТУ, Иваново. – 2004. - № 1. – С. 37 – 43.
- [2] Камбалов, В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. – М.: Наука, 1974. – 112 с.
- [3] Костецкий, Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев.: Техника. 1976. – 292 с.
- [4] Вопросы. Гипотезы. Ответы: Наука XXI века: коллективная монография. - Краснодар, 2015. Книга 9. – 36

Соответственно измениться и ширина площадки контактирования нити

$$a_2 = \sqrt{R^2 - h_2^2}. \quad (11)$$

Данная методика позволяет рассчитать линейный износ нити по её геометрическим характеристикам.

Расчет на износ отдельных контактных пар является моментом прогнозирования прочных характеристик технических нитей. Дополнительная обработка замасливателями позволяет снизить износ нити и увеличивает число циклов до разрушения, что способствует увеличению производительности оборудования.

References

- [1] Stepanova, T. Ju., Komarova T. G. Issledovanie vlijanija PAV na frikcionnye svojstva volokon [Investigation of the effect of surfactants on the frictional properties of fibers], Jeffect bezyznosnosti i tribotehnologii, IGHTU, Ivanovo, 2004, issue 1. pp. 37 – 43.
- [2] Kambalov, V. S. Vlijanie sherohovatosti tverdyh tel na trenie i iznos. [Influence of surface roughness of solids friction and wear.], M., Nauka, 1974, 112 pp.
- [3] Kosteckij, B. I. Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii. [surface strength in friction materials.], Kiev, Tehnika, 1976., 292 pp.
- [4] Voprosy. Gipotezy. Otvety: Nauka XXI veka: kollektivnaja monografija. [Questions. Hypotheses. Answers: Science of the XXI century: the collective monograph.], Krasnodar, 2015. Kniga 9. pp. 36

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ УПРОЧНЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Коровкин А.А., Ведерникова И.И.

ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина"
Иваново, Россия
E-mail: iv30-10-76@mail.ru

Аннотация.

В данной статье исследовали коррозионную стойкость упрочненной поверхности. Была проведена проверка коррозионной стойкости различных покрытий. Найдены наиболее лучшие защитные покрытия для материалов.

Ключевые слова: коррозия, стойкость, материал, вещество, толщина слоя, покрытие, взаимодействие химического состава, поверхность, реакция.

STUDY OF CORROSION RESISTANCE OF HARDENED SURFACE

Korovkin A.A., Vedernikova I.I.

Ivanovo State Power Engineering University
Ivanovo, Russian Federation
E-mail: iv30-10-76@mail.ru

Abstract.

This article investigated the corrosion resistance of the hardened surface. Was conducted to verify the corrosion resistance of different coatings. Found the best protective coatings for materials.

Keywords: corrosion, durability, material, substance, thickness, coating, interaction of the chemical composition, the surface reaction.

При длительной работе любой машины даже при нормальных условиях эксплуатации и соблюдении правил технического обслуживания ее составные части изнашиваются. По характеру воздействия на поверхность трения и протекающих на ней процессов при эксплуатации оборудования классифицируют виды изнашивания различной природы. Продукты износа, физико-химическое воздействие окружающей среды оказывают определенное влияние на процесс коррозии поверхностей и их последующее разрушение. Высокая коррозионная стойкость алюминиевых сплавов определяется образованием на их поверхности тонкой окисной пленки, которая препятствует дальнейшему прониканию кислорода и сильно замедляет процесс окисления. При этом коррозия алюминиевых сплавов имеет затухающий во времени характер. Коррозия алюминиевых сплавов может вызываться как химическими, так и электрохимическими реакциями. Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов и конструкций из этих материалов зависит от: характера и степени агрессивности среды; системы, марок и состояния сплава; формы элементов и конструкций; вида контактов с другими материалами и т. д.

Была проведена проверка коррозионной стойкости различных покрытий. Проверялась модель износа в присутствии электролита.

Процесс коррозии можно представить в виде следующих основных стадий:

- транспортировка реагирующих веществ к поверхности раздела фаз;
- химическое или электрохимическое взаимодействие;
- отвод продуктов реакции из реакционной зоны.

Скорость коррозии определяется двумя основными показателями коррозионной стойкости металлов:

- глубинный показатель коррозии K_n – глубина коррозионного разрушения Π в единицу времени τ $K_n = \Pi/\tau$ (мм/год)
- показатель изменения массы – изменение массы образца металла в результате коррозии, отнесенное к единице поверхности металла p к единице времени:

$$K_m = \Delta m/S \cdot \tau \text{ (л/м}^2 \cdot \text{час)} \quad (1)$$

Скорость коррозии определялась объемным методом, т.е. по объему выделившегося водорода, в конечном итоге определяется группа и балл коррозионной стойкости.

В качестве агрессивных сред выступали 5 % раствор KOH и 6 % раствор серной кислоты H₂SO₄.

Брали 4 образца:

1 – образец неанодированного алюминия;

2 – образец алюминия, анодированного в растворе серной кислоты с добавлением щавелевой кислоты H₂SO₄+ H₂C₂O₄, упрочненный лазерным модифицированием;

3 – образец, анодированный в растворе серной кислоты H₂SO₄;

4 – образец нержавеющей легированной стали X18H9T.

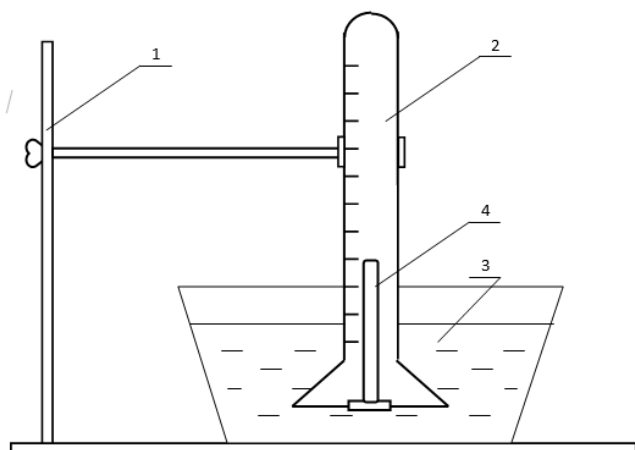


Рис.1. Схема установки для определения скорости коррозии.

1 – штатив, 3 – корытце с раствором агрессивной среды, 2 – пробирка, 4 – испытуемый образец.

Взвесив и измерив, площадь поверхности образцов, помещали их в пробирки с агрессивной средой (5 % KOH и 6 % H₂SO₄) и засекали время. Через каждые 15 минут снимали показания. По окончании опыта образцы вновь взвешивались. По объему выделившегося водорода с помощью формулы определили изменение массы образцов.

$$\Delta m = \frac{A \cdot V_o}{n \cdot 11,2 \cdot 1000}, \quad (2)$$

где A – атомный вес металла; V_o – объем выделившегося водорода (мл); n – валентность металла. Затем определили показатель изменения массы K_m и глубинный показатель коррозии K_n соответственно по формулам:

$$K_m = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau} \quad (г/м^2 \cdot час), \quad (3)$$

где S – площадь поверхности образца (м²), τ - время испытаний (час).

$$K_n = \frac{K_m \cdot 8,76}{\gamma_{\mu e}} \quad (мм/год) \quad (4)$$

где γ_{μe} - плотность материала (г/см³).

Потом по найденным величинам K_m и K_n из таблицы определили группу и балл коррозионной стойкости.

Из проведенных исследований можно сделать вывод: в щелочной среде коррозионная стойкость анодированного алюминия по сравнению с неанодированным не хуже, а в кислой среде даже лучше, что можно объяснить взаимодействием химического состава анодной пленки со средой. Разрыхление получаемых покрытий не наблюдалось.

Одним из наиболее распространенных способов защиты металлов от коррозии является нанесение на их поверхность защитных пленок: лака, краски, эмали, других металлов. Покрытие металла не исключает коррозию, а служит для нее лишь преградой, а значит, лишь тормозит процесс коррозии. Именно поэтому важное значение имеет качество покрытия – толщина, пористость, равномерность, проницаемость, способность набухать в воде, прочность сцепления (адгезия). Качество покрытия зависит от тщательности подготовки поверхности и способа нанесения защитного слоя. В противном случае они будут препятствовать хорошей адгезии покрытия с поверхностью металла. Низкое качество покрытия нередко связано с повышенной пористостью. Поверхность анодной пленки пористая, что снижает её износостойкость при работе в паре трения. При воздействии лазером происходит передача теплоты в глубину металла. В результате алюминий, выплавляясь, поднимается вверх по капиллярам и заливает их, что приводит к получению беспористой, прочной и износостойкой рабочей поверхности детали. Этим также можно объяснить и полученные результаты испытаний коррозионной стойкости анодированной поверхности, модифицированной лазерным воздействием.

Список литературы

- [1] Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безыносность): Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: «Издательство МСХА», 2001. 616 с.
- [2] Ведерникова И.И. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук, Иваново, 2004.

References

- [1] Garkunov D.N. Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost') [Tribotechnology (wear and no-wear)], Uchebnik. – 4-e izd., pererab. i dop. – M.: «Izdatel'stvo MSHA», 2001. 616 pp.
- [2] Vedernikova I.I. Dissertacija na soiskanie stepeni kandidata tehniceskikh nauk. Ivanovo, 2004.

Влияние несинусоидальности питающего напряжения на виброшумовые характеристики асинхронных двигателей

Ю.Б. Казаков, Ю.И. Бондаренко

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
Иваново, Россия
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Состояние вопроса: Шумы и вибрации транспортных тяговых электрических двигателей должны укладываться в строгие экологические нормы. Существующие методики позволяют определять виброшумовые характеристики двигателей при синусоидальном питающем напряжении. В то же время современные транспортные силовые установки все чаще используют системы частотного управления тяговыми электродвигателями с несинусоидальным питающим напряжением от преобразователей частоты. Наличие высших временных гармоник напряжения может вызывать дополнительный спектр вибровозмущающих сил в электродвигателе, что повлияет на электромагнитный шум. Создание энергоэффективных тяговых асинхронных машин с частотным управлением для гибридного привода транспортных средств требует корректного определения их виброшумовых характеристик. Необходима разработка методики расчета электромагнитных шумов электродвигателей при несинусоидальности питающего напряжения и оценка влияния степени несинусоидальности напряжения на шум.

Материалы и методы: Методика оценки влияния несинусоидальности питающего напряжения на виброшумовые характеристики асинхронных электродвигателей включает разложение формы кривой напряжения на временные гармоники, алгоритм расчета электромагнитных шумов от каждой временной гармоники напряжения для наиболее выраженных пространственных гармоник электромагнитных полей, определение интегральных показателей электромагнитного шума от совокупного действия всего спектра временных и пространственных гармоник.

Результаты: Разработана методика расчета интегральных показателей электромагнитного шума асинхронных двигателей при несинусоидальности питающего напряжения, которая учитывает форму несинусоидальности, в том числе в виде широтно-импульсной модуляции, зубчатость сердечников статора и ротора, электромагнитное состояние двигателя, спектр временных и пространственных гармоник электромагнитных сил. Оценены виброшумовые характеристики тягового асинхронного двигателя 120 кВт при синусоидальной форме питающего напряжения и при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения.

Выводы: Несинусоидальность питающего напряжения вызывает появление спектра временных гармоник напряжения, дополнительного спектра вибровозмущающих сил в электродвигателе, что изменяет его электромагнитный шум. Разработанная методика позволяет проводить расчет интегральных показателей электромагнитного шума асинхронных двигателей при несинусоидальности питающего напряжения. Электромагнитный шум тягового асинхронного двигателя 120 кВт при форме питающего напряжения в виде широтно-импульсной модуляции может возрастать до 6 дБ, по сравнению с синусоидальным питающим напряжением.

Ключевые слова — асинхронный электродвигатель, несинусоидальность напряжения, электромагнитный шум.

Influence of nonsinusoidal feed-in voltage on vibronoise descriptions of induction motors

Yu.B. Kazakov, Yu.I. Bondarenko

Ivanovo State Power University
Ivanovo, Russia
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Background: Noises and vibrations of transport traction electric motors must be laid in strict ecological norms. Existent methodologies allow to determine vibronoise descriptions of motors at sinewave feed-in voltage. At the same time modern transport power-plants all more often use the systems of frequency management traction electric motors with nonsinusoidal feed-in voltage from the transformers of frequency. The presence of temporal ultraharmonics of voltage can cause the additional spectrum of vibrorevolving forces in an electric motor, that will influence on electromagnetic noise. Creation of energyeffective hauling induction machines with a frequency management for the hybrid drive of transport vehicles requires correct determination of their vibronoise descriptions. Development of methodology of calculation of electromagnetic noises of electric motors at nonsinusoidal of feed-in voltage and estimation of influence of degree of nonsinusoidal voltage are needed on noise.

Materials and methods: Methodology of estimation of influence of nonsinusoidal of feed-in voltage on vibronoise descriptions of induction electric motors includes decomposition of form the curve of voltage on temporal accordions, algorithm of calculation of electromagnetic noises from every temporal accordion of voltage for the most expressed spatial accordions of

the electromagnetic fields, determination of integral indexes of electromagnetic noise from the combined action of all spectrum of temporal and spatial accordions.

Results: Methodology of calculation of integral indexes of electromagnetic noise of induction motors is worked out at nonsinusoidal of feed-in voltage, that takes into account the form of nonsinusoidal, including as latitudinal-impulsive modulation, dentation of mandrels of stator and rotor, electromagnetic state of motors, spectrum of temporal and spatial accordions of electromagnetic forces. Vibronoise descriptions of traction induction motor are appraised 120 kW at the sinewave form of feed-in voltage and at a feed from the transformer of frequency with latitudinal-impulsive modulation of voltage.

Conclusions: Nonsinusoidal of feed-in voltage causes appearance of spectrum of temporal accordions of voltage, additional spectrum of vibrorevolving forces in an electric motor, that changes his electromagnetic noise. The worked out methodology allows to conduct the calculation of integral indexes of electromagnetic noise of induction motors at nonsinusoidal of feed-in voltage. Electromagnetic noise of traction of induction motors 120 kW at the form of feed-in voltage as latitudinal-impulsive modulation can increase to 6 дБ, as compared to sinewave feed-in voltage.

Keywords — induction motor, nonsinusoidal voltage, electromagnetic noise.

Преобразование энергии в электрических машинах сопровождается возникновением шума и вибраций. Их показатели должны укладываться в строгие экологические нормы. Источником магнитных шумов и вибраций являются переменные пульсирующие и вращающиеся электромагнитных силы и моменты, действующие на конструкцию электрической машины, вызывая ее виброактивность и колебания. Величины магнитных сил и их частоты зависят от типа электрической машины, частоты вращения, формы и частоты питающего напряжения, электромагнитных нагрузок, чисел зубцов статора и ротора, обмотки статора и других факторов [1-4].

Современные транспортные силовые установки все чаще используют системы частотного управления тяговыми асинхронными электродвигателями (АД) с несинусоидальным питающим напряжением от преобразователей частоты (ПЧ). Наличие высших временных гармоник напряжения вызывает появление дополнительного спектра вибровозмущающих сил в электродвигателе, что изменяет их электромагнитный шум. Отмечено, что присутствие высших гармоник в напряжении сети с суммарной амплитудой 20 % может увеличить амплитуду шумов и вибраций АД до 40 % [5]. В то же время увеличение числа фаз АД, питание напряжением особой формы может позволить улучшить его виброшумовые характеристики [6].

Существующие методики [2,3] позволяют определять магнитные шумы и вибрации АД при синусоидальном питающем напряжении. Однако расчетных методик изменения их виброшумовых характеристик при несинусоидальном напряжении нет. Необходима разработка такой методики.

Источником магнитного шума и вибрации являются колебания ярма статора электродвигателя, поэтому виброакустические расчёты сводятся к исследованиям колебаний её ярма под действием периодически изменяющихся во времени и распределённых по окружности радиальных и тангенциальных сил гармонических полей статора и ротора, которые зависят от распределения магнитной индукции в зазоре.

Пространственные гармонические полей статора (v) определяются зубчатостью статора и

схемой обмотки при p - числе пар полюсов и d - знаменателе дробности обмотки

$$v = 6kp/d + p,$$

пространственные зубцовые гармонические полей короткозамкнутого ротора (μ) определяются зубчатостью ротора и числом пар полюсов

$$\mu = \kappa Z_2 + p,$$

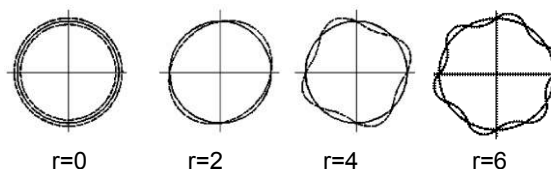


Рис. 1. Формы колебаний ярма статора АД для порядков вибраций r

для $\kappa = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Пространственные гармоники полей статора v , зубцовых ротора μ и порядки вибрации $r = \mu \pm v$, не превышающие 6, так как большие порядки вибраций несущественны, для трехфазного АД с короткозамкнутым ротором 3 кВт, 1000 об/мин с числами пазов статора $Z_1 = 36$ и ротора $Z_2 = 42$ представлены на рис. 1 и в таблице 1.

Таблица 1. Пространственные гармоники полей статора v , зубцовых ротора μ и соответствующие им порядки вибрации r

$v \backslash \mu$	+3	-15	+21	-33	+39	-51	+57	-69	+75	-87
+3	+6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-39	-	-	-	-6	0	-	-	-	-	-
+45	-	-	-	-	+6	-	-	-	-	-
-81	-	-	-	-	-	-	-	-	-6	+6
+87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0

Угловая частота вращения радиальной вибрационной силы порядка r

$$\omega_r = 2\pi f_r,$$

где для $r = \mu - v$ её частота

$$f_r = f_1 \kappa Z_2 (1-s) / p \quad (1)$$

или для $r = \mu + v$

$$f_r = f_1 [\kappa Z_2 (1-s) / p + 2]; \quad (2)$$

где s – скольжение, f_1 - частота напряжения.

Амплитуда радиальной вибрационной силы порядка r

$$P_r = 20B^2_8(R_1/R_c), \quad (3)$$

здесь R_1 – радиус сердечника внутренний, R_c – средний радиус спинки ярма статора, B_δ – индукция в зазоре, берется из электромагнитного расчета.

Приведенная деформация (податливость) статора определяется при $g=0$ как

$$\lambda_c = R_c^2 / (E h_c)$$

или при $g \geq 2$ как

$$\lambda_c = (12 R_c / E) (R_c / h_c)^3 (r^2 + 1) / r^2 (r^2 - 1)^2,$$

где h_c – высота сердечника, E – модуль упругости. Для рассматриваемого двигателя λ_c уменьшается с 0,32 см/Н при $g=0$ до 0,16 см/Н при $g=6$.

Скорость колебаний (вибраций) на поверхности сердечника статора

$$y_c = P_r / \sqrt{2 Z_c},$$

где m_c – приведенная масса спинки статора,

$Z_c = |\omega_r| m_c 10^{-2} - 1 / |\omega_r| \lambda_c$ – полное механическое сопротивление статора.

Уровень магнитного шума для порядка вибрации g

$$L_r = 20 \lg(\omega_r |y_c| 10^2 / 3), \text{ дБ.}$$

Разные гармоники полей создают свои уровни шума L_1, L_2, \dots, L_m . При определении результирующего уровня вибрации L_Σ исходят из соображений, что если одновременно действуют два акустических источника, уровни громкости которых в рассматриваемой точке акустического поля равны L_1 и L_2 ($L_1 > L_2$), то результирующий уровень в той же точке равен $L_\Sigma = L_1 + \Delta L$, где зависимость $\Delta L = \psi(L_1 - L_2)$ определяется в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2. Зависимость $\Delta L = \psi(L_1 - L_2)$

$L_1 - L_2$, дБ	0,0	2,0	4,0	6,0	10,0
ΔL , дБ	3,0	2,0	1,5	1,0	0,5

Результаты расчетов виброшумовых характеристик [3] сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Величины вибраций и шума АД

ν	μ	$g = \mu \pm \nu$	V_ν , Тл	B_μ , Тл	P_r , Н/см ²	ω_r , 1/с	Y_c , см/с	L_r , дБ	L_Σ , дБ
+3	+3	+6	0,778	-	9,32	628	0,662	43,0	67
-33	-39	-6	0,173	0,16	0,85	4187	0,406	55,0	
+39	-39	0	0,274	0,16	1,35	3559	1,097	62,5	
+39	+45	+6	0,274	0,13	1,10	4187	0,525	57,5	
+75	-81	-6	0,185	0,09	0,52	7746	0,461	61,5	

Здесь для $L_1=62,5$ и $L_2=61,5$ - $\Delta L=2,5$ дБ; далее для другой пары источников шумов $L_1=61,5$ и $L_2=57,5$ - $\Delta L=1,5$ дБ; для следующей пары источников шумов $L_1=57,5$ и $L_2=55$ - $\Delta L \approx 1,5$ дБ; для следующей пары источников шумов $L_1=55$ и $L_2=43$ - $\Delta L \leq 0,5$ дБ и не имеет практического значения; $\Sigma \Delta L = 5,5$ и $L_\Sigma = 62,5 + 5,5 = 67$ дБ.

Для рассматриваемого двигателя уровень шума не должен превышать 72 дБ. Уровень вибрации двигателей оценивается по наибольшему из эффективных значений вибрационной скорости и не должен превышать 2,8 см/с. Из полученных данных следует, что двигатель по уровню шумов и вибраций находится на пределе требований.

Расчет виброшумовых характеристик более мощного тягового АД ТАД-250 120 кВт при синусоидальном напряжении по подобному

алгоритму дал уровень шума 83 дБ при второй по значимости влиянии, после первой, пятой пространственной гармонической поля статора.

При работе АД от источника с несинусоидальной формой питающего напряжения появляются высшие временные гармоники напряжения. Каждая временная гармоника напряжения γ будет создавать свои токи, электромагнитные поля и силы, деформации, вибрации ярма статора и магнитные шумы. ПЧ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выдает напряжение разряженной импульсной формы с широким спектром временных гармоник. Наибольшие амплитуды наблюдаются для гармоник, близких к кратности числа импульсов ШИМ на периоде N , но нечетных, и их амплитуды соизмеримы с амплитудой первой (основной) гармоники. Так, для параметров ШИМ $N=24$ и скважности импульсов $\epsilon=0,2$ наибольшие амплитуды напряжений наблюдаются для $\gamma=23$ - $U_{23}/U_1=0,94$ и для $\gamma=47$ -

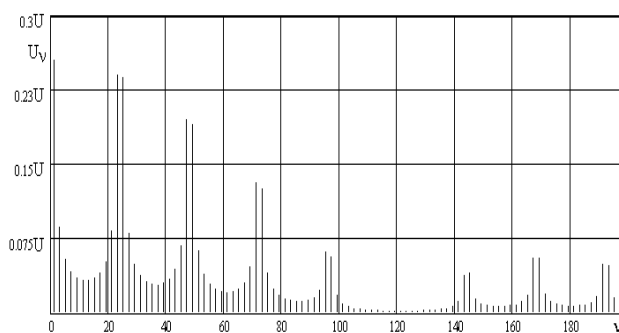


Рис. 2. Спектральный состав временных гармоник выходного напряжения ПЧ с ШИМ при $N=24$ и $\epsilon=0,2$

$U_{47}/U_1=0,77$ [7] (рис.2).

Для оценки влияния высших временных гармоник напряжения расчет виброшумовых характеристик нужно проводить по описанной выше методике для каждой временной гармоники γ . Частота возбуждающих сил пропорциональна номеру временной гармоники и вместо f_1 в (1,2) расчеты проводим для всех $f_{1\gamma} = \gamma f_1$. Так как для высоких временных гармоник γ АД находится в режиме КЗ и $s_\gamma=1$, то в (1,2) принято, что амплитуды гармоник магнитной индукции в зазоре $B_{\delta\gamma}$ в (3) определяются как

$$B_{\delta\gamma} = B_\delta U_\gamma / (2 U_1).$$

Результаты расчетов [8] виброшумовых характеристик ТАД-250 при питании от ПЧ с ШИМ напряжения с учетом влияния пространственных $\nu=1$ и $\nu=5$, как наиболее выраженных, и 179 временных гармоник γ электромагнитных полей приведены на рис. 3 и в таблице 4.

Результирующий уровень шума ТАД при питании от ПЧ с ШИМ напряжения и несинусоидальной формой напряжения составляет 88 дБ, что соответствует нормам для данного двигателя - 94 дБ. Увеличение уровня шума по сравнению с питанием напряжением синусоидальной формы составляет 5 дБ или 6 %.



Рис. 3. Уровни электромагнитных шумов от высших временных гармонических полей, вызванных несинусоидальностью питающего напряжения ПЧ с ШИМ для наиболее выраженных 1 и 5 пространственных

Таблица 4. Уровни шумов (L) для пространственных v и временных γ гармоник электромагнитных полей при работе ТАД от ПЧ с ШИМ напряжения

γ	$L_{v=1}$, дБ	$L_{v=5}$, дБ	γ	$L_{v=1}$, дБ	$L_{v=5}$, дБ
1	82	54	19	55.6	26.6
3	64.4	35.4	21	63.5	34.5
5	56.2	27.3	23	81.9	53.0
7	51.6	22.6	25	81.8	52.8
9	48.9	19.9	27	62.9	33.9
11	47.6	18.6	29	54.6	25.6
13	47.5	18.5	31	49.9	20.9
15	48.7	19.7
17	51.0	22.0	173	29.8	0.87

Общие выводы

Разработана методика определения электромагнитного шума АД, которая учитывает форму несинусоидальности напряжения, в том числе в виде широтно-импульсной модуляции, зубчатость сердечников статора и ротора, электромагнитное состояние двигателя, действие полного спектра временных и пространственных гармоник электромагнитных сил.

Показано, что изменение питания тягового АД 120 кВт с синусоидальной формы напряжения на питание от ПЧ с ШИМ напряжения приводит к возрастанию шума на 5-6 дБ.

Список литературы

[1] Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.

[2] Шубов И.Г. Шум и вибрации электрических машин.- Л.: Энергоатомиздат, 1986.

[3] Попов В.И., Тихонов С.И. Магнитный шум трехфазных многополюсных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии RA // Электричество. 2008. №4, С.66-73.

[4] Попов В.И., Ахунов Т.А., Макаров Л.Н. Современные асинхронные электрические машины: Новая Российская серия RA.- М.: ЗНАК, 1999.

[5] Немцев А.Г., Федоров О.В., Шестакова Л.А. О вибрации электродвигателей при наличии высших гармонических составляющих в напряжении источника питания // Труды VIII Междун. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. - Т 1. - С. 330-331.

[6] Ананьев С. С., Голубев А. Н. Улучшение виброшумовых характеристик асинхронного электропривода. - Вестник ИГЭУ, 2005. - № 6. - С. 81-84.

[7] Казаков Ю.Б. Энергоэффективность работы электродвигателей и трансформаторов при режимных и конструктивных вариациях: учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 152 с.: ил.

[8] Ю.И. Бондаренко, Ю.Б. Казаков. Расчет шумов тягового асинхронного двигателя при работе от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения // «ЭНЕРГИЯ – 2015». X междун. научн.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых: Материалы конф. / ФГБОУВПО Ивановск. гос. энерг. ун-т имени В.И.Ленина. – Иваново, 2015. Т.4. С. 49-53.

References

[1] Geller B., Gamata V. *Vysshie garmoniki v asin-khronnykh mashinakh.* – М.: Energiya, 1981. – 352 s.

[2] Shubov I.G. *Shum i vibratsii elektricheskikh ma-shin.*- L.: Energoatomizdat, 1986.

[3] Popov V.I., Tikhonov S.I. *Magnitnyy shum trekh-faznykh mnogopolyusnykh asinkhronnykh dvigateley s korotkozamknutym rotorom serii RA* // Elektrichestvo. 2008. №4, S.66-73.

[4] Popov V.I., Akhunov T.A., Makarov L.N. *Sovre-mennye asinkhronnye elektricheskie mashiny: Novaya Rossiyskaya seriya RA.*- М.: ZNAK, 1999.

[5] Nemtsev A.G., Fedorov O.V., Shestakova L.A. *O vibratsii elektrodvigateley pri nalichii vysshikh garmonicheskikh sostavlyayushchikh v napryazhenii istochnika pitaniya* // Trudy VIII Mezhdun. konf. po avtomatiziro-vannomu elektroprivodu AEP-2014. – Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2014. Т 1. С. 330-331.

[6] Anan'ev S. S., Golubev A. N. *Uluchshenie vibro-shumovykh kharakteristik asinkhronnogo elektroprivoda.* - Vestnik IGEU, 2005. - № 6. - S. 81-84.

[7] Kazakov Yu.B. *Energoeffektivnost' raboty elektrodvigateley i transformatorov pri rezhimnykh i konstruktivnykh variatsiyakh: uchebnoe posobie dlya vu-zov.* – М.: Izdatel'skiy dom MEI, 2013. – 152 s.: il.

[8] Yu.I. Bondarenko, Yu.B. Kazakov. *Raschet шумов тягового асинхронного двигателя при работе от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения* // «ЭНЕРГИЯ – 2015». X mezh-dun. na-uchn.-tekhn. konf. stud., asp. i molodykh uchennykh: Mate-rialy konf. / FGBOUVPO Ivanovsk. gos. energ. un-t imeni V.I.Lenina. – Ivanovo, 2015. Т.4. S. 49-53.

Анализ теплового состояния тягового асинхронного двигателя гибридного транспорта

Я.А.Зверев магистрант, Ю.Б.Казаков д.т.н., профессор
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: abcdf12465@mail.ru, elmash@em.ispu.ru

Аннотация — Рассмотрена проблема анализа теплового состояния тяговых двигателей. Определена возможная перспективы использования современных компьютерных программ для их расчета.

Ключевые слова — тепловые расчеты, тяговый асинхронный электродвигатель.

Thermal analysis of traction asynchronous motor hybrid transport

Y.A.Zverev undergraduate, Y.B.Kazakov Doctor of Engineering, prof.
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: abcdf12465@mail.ru, elmash@em.ispu.ru

Abstract — The problem of the analysis of the thermal state of the traction motors. Identify possible prospects for the use of modern computer programs for calculating them.

Key words — thermal calculations, traction asynchronous motor.

Асинхронные тяговые электродвигатели (ТЭД) — основной тип двигателей переменного тока, используемых на транспорте. Поэтому прогнозирование ресурса ТЭД является актуальной задачей в транспортном электромашиностроении, решение которой позволяет определить срок восстановления ТЭД в зависимости от условий эксплуатации. Ресурс ТЭД количественно определяется совокупностью вероятностных характеристик и параметров, отражающих закономерности возникновения отказов в конкретных условиях эксплуатации. Тяговые электродвигатели относятся к наиболее нагруженному оборудованию с точки зрения комплексного воздействия на них тепловых, электрических, механических и климатических факторов. Поэтому, несмотря на постоянно проводимые мероприятия конструктивно-технологического характера при изготовлении и ремонте, уровень повреждаемости ТЭД в эксплуатации хотя и снижается, но остается довольно высоким.

Отдельно необходимо выделить тепловые перегревы ТЭД, так как согласно статистике отказов на них приходится 40% повреждений тяговых асинхронных электродвигателей, поэтому анализ теплового состояния ТЭД — актуальная задача. Как известно, превышение температуры на $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижает срок службы изоляции в два раза. Исходя из этого, система прогнозирования ресурса тягового электродвигателя представляется как совокупность вычислительно-программных

средств, в числе которых важное место занимает тепловая математическая модель, позволяющая определить температуру всех частей тягового электродвигателя. Также важное место занимает модель, описывающая закономерность изменения свойств изоляции от температуры, представляющая информацию о температурном поле во всем его объеме.

Подробную информацию о температурном поле машины можно получить теоретическим путем на основе уравнения теплопроводности. Действительно, корректная математическая модель обеспечивает полную картину поля, если имеются надежные сведения о распределении потерь, свойствах материалов и течении охлаждающих агентов. В задачи теплового расчета входит определение средней температуры активных частей машины, вычисление тепловых потоков между смежными элементами конструкции, т.е. расчет поля температуры в машине для номинального режима работы. Для ТЭД номинальным является продолжительный режим работы. Многочисленные теоретические разработки, применяемый математический аппарат и большое число экспериментальных исследований позволяют производить тепловой расчет с большой точностью. В настоящее время тепловые расчеты производят в программных комплексах, таких как Ansys Thermal, SolidWorks Flow Simulation.

Современные тяговые АД питаются от преобразователя частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения. Такой способ питания вызывает дополнительные

потери в двигателе и как следствие этому больший нагрев частей машины [1]. Результаты измерения температур двигателя АИРМ132S8 показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения температур АД АИРМ132S8 с ШИМ напряжения

	Синусоидальное питающее напряжение	Несущая частота ШИМ $f_{on}, \text{кГц}$	
		4000	12000
$f_1, \text{Гц}$	50	66,7	66,7
k_{U_1}	1	0,897	0,879
$\Theta_{м1}$	73,9	103,7	90,9
$T_{кор}, ^\circ\text{C}$	62,8	87,2	68,0
$T_{окр}, ^\circ\text{C}$	18,5	18,7	14,2

Из таблицы видно, что при работе АД от источника синусоидального напряжения температура обмотки статора $\Theta_{м1}$ и температура корпуса $T_{кор}$ существенно меньше, чем при работе от ПЧ, что подтверждает важность анализа теплового состояния ТЭД. Для анализа, моделирования и расчета тепловых потерь используются различные программные комплексы. Одним из них является Solid Works Flow Simulation. Анализ теплового состояния проведен для тягового асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, номинальной мощностью 182 кВт. Результаты моделирования представлены на рисунках 1,2. Необходимым для моделирования теплового процесса являются : граничные условия, геометрия объекта, источники тепла и пути прохождения тепловых потоков. Результаты довольно наглядны и позволяют определить реальные значения температур, скорость и направление теплового потока. Исходя из результатов расчета, можно принимать конструктивные меры позволяющие улучшить тепловое состояние ТЭД, в частности установку дополнительного вентилятора-наездника, выбор хладагента или изменение формы лопаток вентилятора, с целью увеличения аэродинамического КПД.

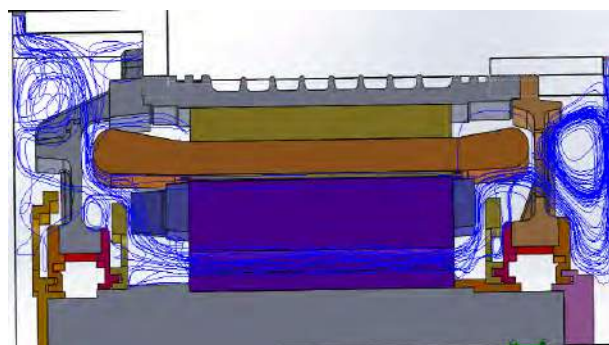


Рис. 1 - Картина прохождения воздуха сквозь машину

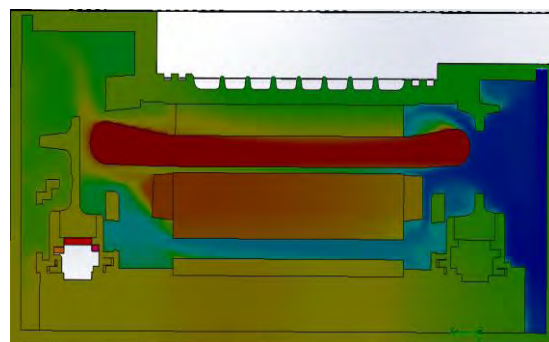


Рис. 2 - Картина теплового состояния двигателя

Таким образом, анализ теплового состояния – актуальная задача при проектировании тяговых АД. Поскольку современные тяговые АД питаются от ПЧ с ШИМ напряжения, что вызывает дополнительные потери в двигателе и как следствие этому больший нагрев частей машины. В связи с этим ухудшается тепловое состояние двигателя, поэтому важность тепловых расчетов возрастает. Для анализа, моделирования и расчета тепловых потерь используются программные комплексы, такие как SolidWorks Flow Simulation. Программа позволяет показать тепловые потоки внутри двигателя, а также нагрев отдельных частей машины и действительные величины температур. Программа имеет доступный интерфейс, высокое быстродействие, что позволяет использовать этот программный пакет в научно-исследовательской деятельности.

Список литературы

[1] Казаков Ю.Б. Энергоэффективность работы электродвигателей и трансформаторов при конструктивных и режимных вариациях : учебное пособие для вузов / Ю.Б.Казаков. – М.:Издательский дом МЭИ, 2013. – 152 м.: ил.

References

[1] Kazakov Ju.B. Jenergojefektivnost' raboty jelektrodvigatelej i transformatorov pri konstruktivnyh i rezhimnyh variacijah : uchebnoe posobie dlja vuzov / Ju.B.Kazakov. – M.:Izdatel'skij dom MJeI, 2013. – 152 m.: il.

Параметрическая модель для расчета электромагнитных процессов в гибридном шаговом двигателе

В.Н.Караулов, С.В.Жуков

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34

E-mail: wiktor2012@mail.ru, latigo@bk.ru

Разработана простая параметрическая математическая модель, позволяющая быстро и качественно оценить рабочие свойства гибридных шаговых двигателей, результаты расчета сопоставлены с полевой моделью.

Ключевые слова — гибридный шаговый двигатель, параметрическая модель, полевая модель.

Parametric model for calculation of the electromagnetic processes in hybrid crossbar engine

V.N. Karaulov, S.V. Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University

153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

E-mail: wiktor2012@mail.ru, latigo@bk.ru

It is designed simple parametric mathematical model, allowing quickly and qualitatively to value the working characteristics of hybrid crossbar engines, results of the calculation were compared with field model.

Keywords — the hybrid crossbar engine, parametric model, field model.

I. ВВЕДЕНИЕ

Шаговые двигатели получили широкое распространение относительно недавно, примерно 20-25 лет назад. Отличительные свойства этих машин - высокая точность позиционирования, быстрая отработка шага, высокий крутящий момент, удобство регулирования величин крутящего момента и частоты вращения. Вследствие этих качеств шаговый двигатель становится перспективным двигателем в приводах многих современных устройств, начиная от компьютерной и бытовой техники (лазеры, принтеры, стиральные машины), заканчивая высокоточными приборами медицинских исследований (например, томографы) и использованием в приводе станков с ЧПУ.

Гибридный шаговый двигатель (ГШД) – наиболее распространённый вид шаговых двигателей. Термин «гибридный» происходит от того, что двигатель работает по принципу реактивного и при этом на роторе используется постоянный магнит [1].

Конструкция ГШД показана на рисунке 1. Статор шихтованный, с явно выраженными полюсами, с катушками двухфазного возбуждения, с пазами на полюсных наконечниках. Ротор имеет два шихтованных венца с пазами на поверхности, обращённой к зазору. Венцы ротора смещены друг относительно друга на половину зубцового деления. Венцы насажены на

постоянный магнит, намагниченный аксиально. Втулка магнита охватывает немагнитный вал.

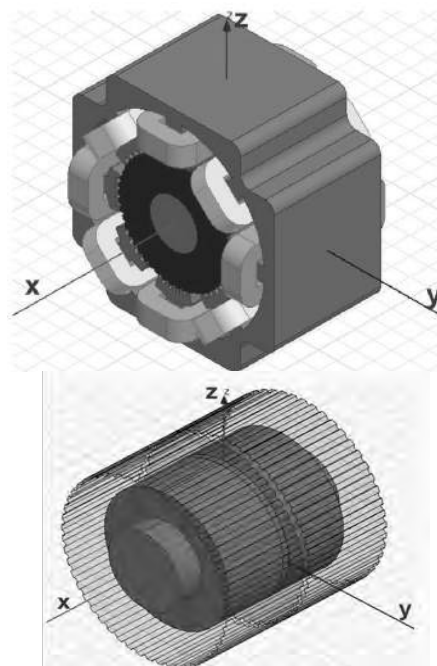


Рис. 1. Трёхмерная модель ГШД

Отличительная особенность магнитного поля в ГЩД показана на рисунке 2. В зазоре под полюсным наконечником над одним венцом ротора поле обмотки статора усилено полем постоянного магнита, над другим венцом ротора – ослаблено. Магнитный поток возбуждённой фазы статора пересекает зазор и переходит на венец ротора под одной половиной возбуждённых полюсов статора, а возвращается под другой половиной других полюсов статора с другого венца ротора. Половина аксиальной длины каждого полюса «работает, другая – отдыхает». Фаза питается переменным напряжением. После изменения направления тока в фазе статора меняются роли половинок полюсов статора. Конфигурация магнитного поля в машине сложная, трёхмерная, непрерывно изменяющаяся.

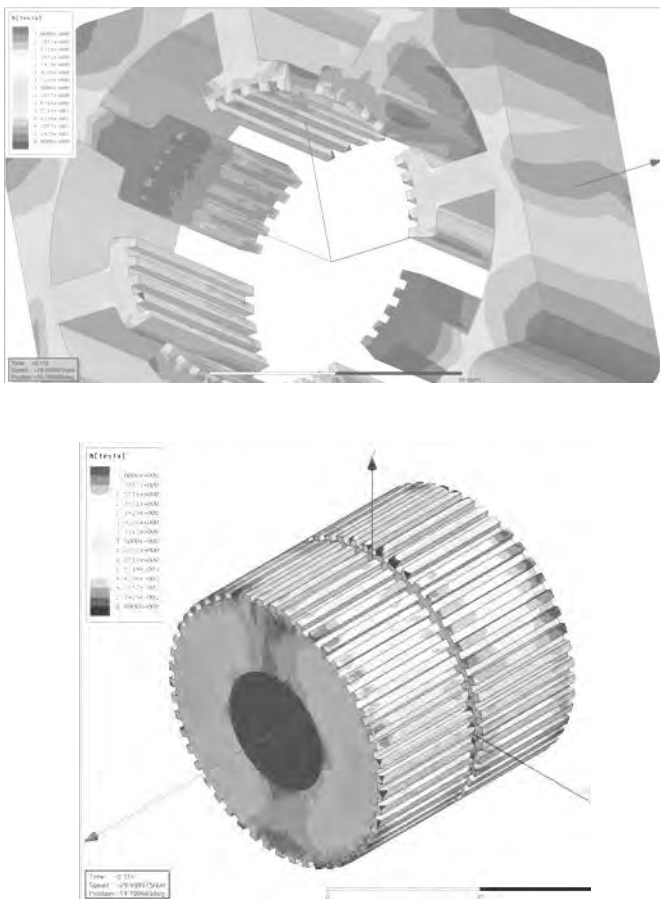


Рис. 2. Картина магнитной индукции в различных участках магнитной цепи ГЩД

II. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЩД

Параметрическая модель использует классические допущения: не учитываются вихревые токи и гистерезис в магнитопроводе; коммутация ключей инвертора напряжения происходит мгновенно; угловая частота вращения ротора принимается постоянной (установившийся режим работы). В соответствии с конструкцией ГЩД приняты следующие допущения: магнитная система двигателя симметричная и взаимная

индукция между фазами отсутствует; магнитное поле постоянного магнита не влияет на величину рабочего потока и лишь направляет рабочий поток на активные половины полюсов.

Моделируется работа одной половины возбуждённого полюса при перемещении ротора от момента полного рассогласования зубцов статора и ротора до момента их полного согласования. Напряжение, питающее фазу, изменяется по закону, представленному на рисунке 3.

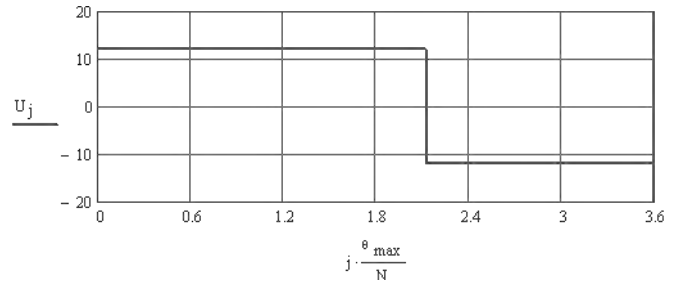


Рис. 3. Зависимость $u(\theta)$ напряжения в фазе в от угла поворота ротора

Рассчитываются: ток в фазе, рабочий магнитный поток, электромагнитный момент, полезная и потребляемая мощности, коэффициенты полезного действия и мощности. Ниже представлены расчётные формулы и результаты моделирования установившегося режима работы ГЩД (мощность 2,5 Вт, напряжение 12 В, частота вращения 30 об/мин, электромагнитный момент 0,8 Нм).

Зависимость магнитной проводимости зазора между зубцами статора и ротора от угла рассогласования зубцов рассчитывается согласно методу, изложенному в [2]. Метод основан на расчёте униполярной проводимости зазора при односторонней зубчатости с помощью аппроксимации кривой проводимости функцией

$$\lambda(x) = \begin{cases} c + d \cdot \operatorname{ch}\left(\frac{x}{p}\right) & \text{if } \delta \leq |x| \leq p \\ \lambda_{\max} = \frac{1}{\delta} & \text{if } \delta > |x| \end{cases}$$

где коэффициенты c , d , p зависят от ширины паза и величины зазора δ . Последовательно учитывается влияние пазов каждого сердечника. В итоге рассчитывается зависимость проводимости зазора при двухсторонней зубчатости от угла рассогласования зубцов $\Lambda(\theta)$.

Зависимость $\Lambda(\theta)$ представлена на рисунке 4.

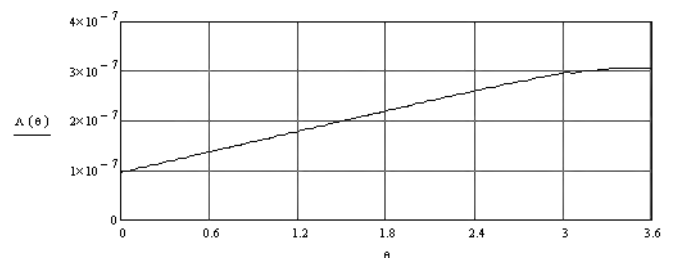


Рис. 4. Зависимость $\Lambda(\theta)$ проводимости зазора от угла поворота ротора

Определяется зависимость магнитного сопротивления зазора под полюсным наконечником от угла поворота ротора $R\delta(\theta) = \frac{1}{\Lambda(\theta) \cdot Z}$, где Z – число зубцов на полюсном наконечнике.

Зависимость рабочего потока от тока фазы - характеристика намагничивания магнитной цепи - рассчитывается при различном положении ротора $\Phi(\Theta, I)$ на основе закона полного тока. Ввиду слабого насыщения ярм и полюсов в ГШД, учитывается падение магнитного напряжения только зубцах статора и ротора. Характеристики $\Phi(\Theta, I)$ представлены на рисунке 5.

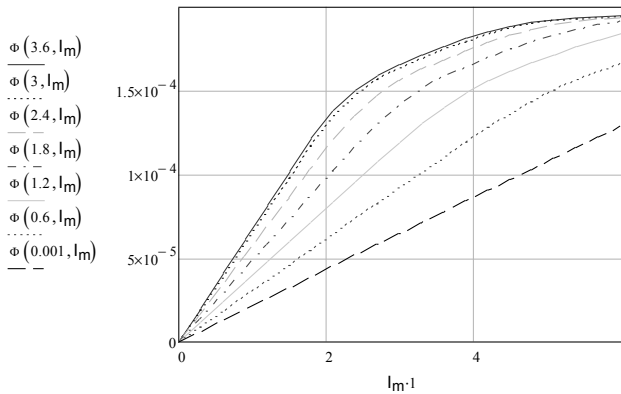


Рис. 5. Характеристики $\Phi(\Theta, I)$ намагничивания магнитной цепи при различном положении ротора

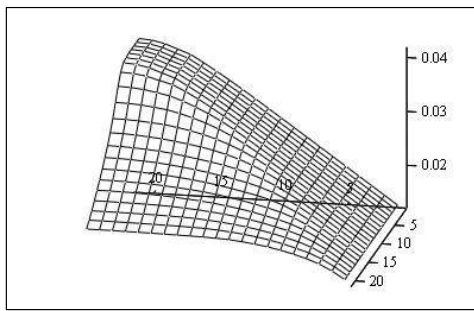
Через зазор и по магнитной цепи ротора проходит рабочий магнитный поток $\Phi(\Theta, I)$. По статору - полный поток полюса $\Phi \dot{i} \dot{e} i'(\Theta, I) = \hat{E} \sigma \cdot \hat{O}(\Theta, I)$, где коэффициент рассеяния полюсов $k\sigma=3$.

Рассчитывается зависимость индуктивности фазы от тока и угла рассогласования

$$L(\Theta, I) = K \cdot \Phi \dot{i} \dot{e} i'(\Theta, I) \cdot \frac{W}{I},$$

где K – число катушек в фазе; W – число витков в катушке. Зависимость $L(\Theta, I)$ показана на рисунке 6.

Потокоцепление фазы $\psi(\Theta, I) = L(\Theta, I) \cdot I$.



L

Рис. 6. Зависимость $L(\Theta, I)$ индуктивности фазы от тока и угла поворота ротора

Уравнение равновесия напряжений в фазе $u - \frac{d\Psi(\Theta, i)}{dt} = i \cdot r$ рассчитывается численным методом в среде Mathcad. В итоге определяется зависимость тока в фазе от угла рассогласования $i(\Theta)$ и зависимость потокоцепление фазы от тока фазы $\psi(i)$. Зависимость $i(\Theta)$ показана на рисунке 7.

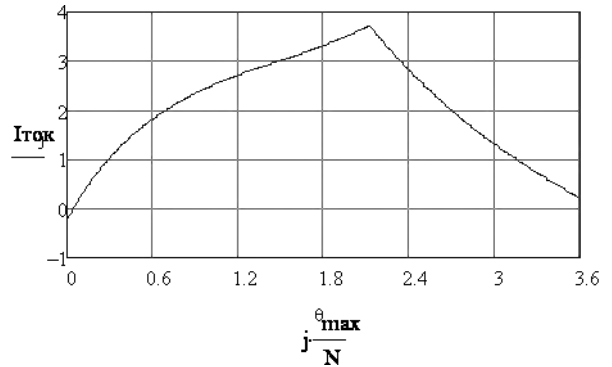


Рис. 7. Зависимость $i(\Theta)$ тока в фазе от угла поворота ротора

Зависимость потокоцепление фазы от тока фазы $\psi(i)$ показана на рисунке 8. Площадь, охваченная кривой $\psi(i)$, представляет собой энергию, преобразованную фазой в механическую работу при перемещении ротора от момента полного рассогласования зубцов статора и ротора до момента их полного согласования.

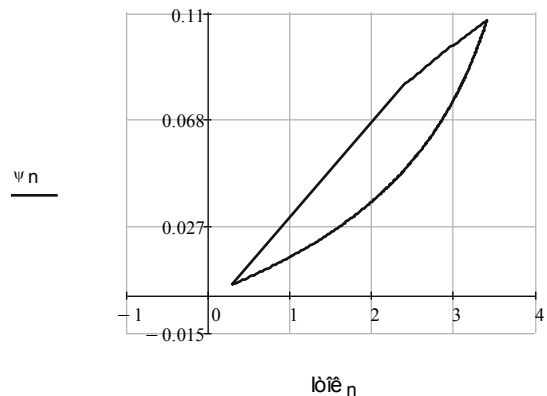


Рис. 8. Зависимость $\psi(i)$ потокоцепление фазы от тока фазы

Электромагнитный момент рассчитывается с помощью энергетического метода. Используется следующее выражение $M = \frac{dW'}{d\theta}$ $i \delta e \Delta\varphi = const$,

где $dW' = \frac{d\psi \cdot \Delta\varphi}{2}$ - приращение магнитной коэнергии

в зазоре при виртуальном повороте ротора на угол $d\theta$ в условиях неизменного падения магнитного напряжения в зазоре $\Delta\varphi = \hat{O} \cdot R\delta = const$. Зависимость $M(\theta)$ показана на рисунке 9.

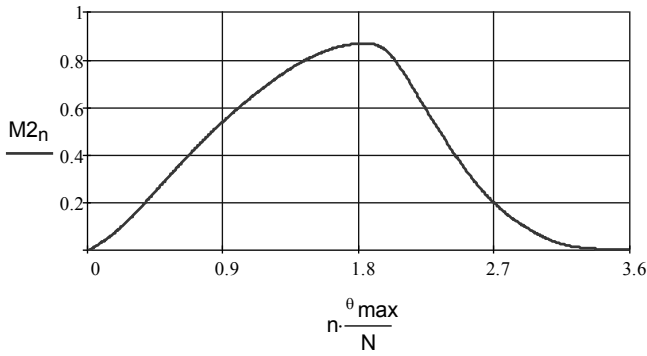


Рис. 9. Зависимость $M(\theta)$ момента фазы от угла поворота ротора

Зависимость моментов двух фаз от угла поворота ротора показана на рисунке 10. Суммарный и средний моменты двигателя при двухфазном питании показаны на рисунке 11.

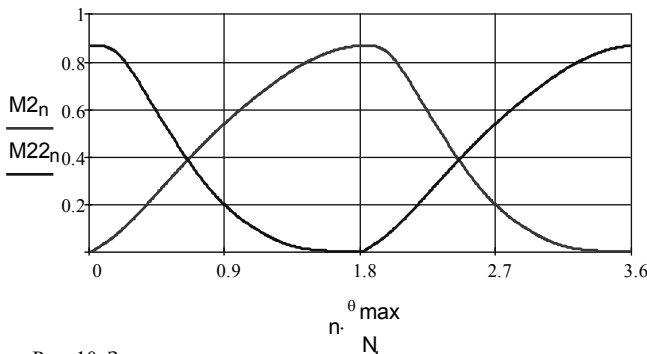


Рис. 10. Зависимость моментов двух фаз от угла поворота ротора

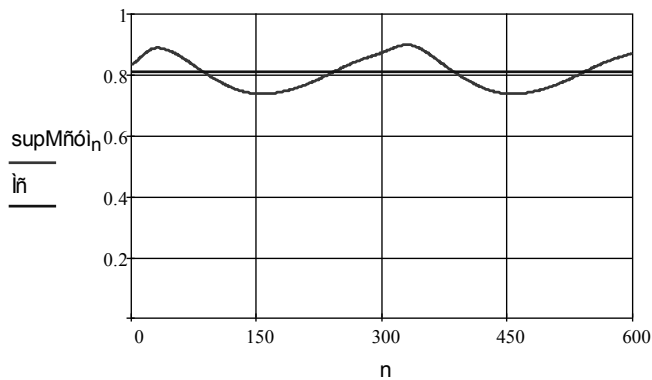


Рис. 11. Суммарный и средний моменты двигателя при двухфазном питании

Полезная мощность двигателя $P_2 = M_{cp} \cdot \Omega = 2,5$ Вт.

Потребляемая активная мощность фазы

$$P_1 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\dot{\theta}} u(t) \cdot i(t) dt = 7,9 \text{ Вт.}$$

На рисунке 12 представлена зависимость $p(t) = u(t) \cdot i(t)$ потребляемой мгновенной электрической мощности фазы и её средняя величина - активная мощность фазы.

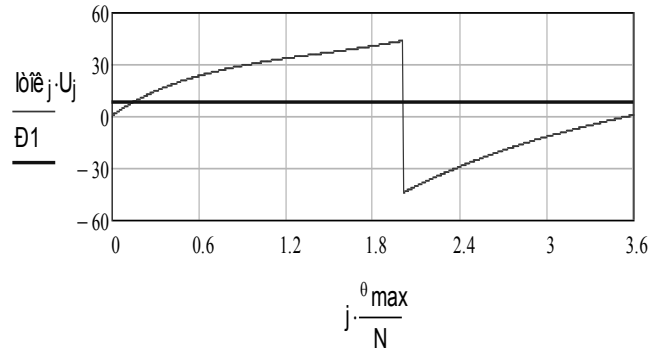


Рис. 12. Зависимость $p(t) = u(t) \cdot i(t)$ потребляемой мгновенной электрической мощности фазы и её средняя величина - активная мощность фазы

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = \frac{2 \cdot P_1}{P_2} = 0,16.$$

Коэффициент мощности

$$\cos(\varphi) = \frac{P_1}{\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^{\dot{\theta}} u^2(t) \cdot dt \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\dot{\theta}} i^2(t) \cdot dt}} = 0,29.$$

На рисунке 13 представлены зависимости коэффициентов полезного действия и мощности от номера точки npp смены полярности питающего напряжения фазы. Общее число точек в кривой напряжения на моделируемом интервале равно 600.

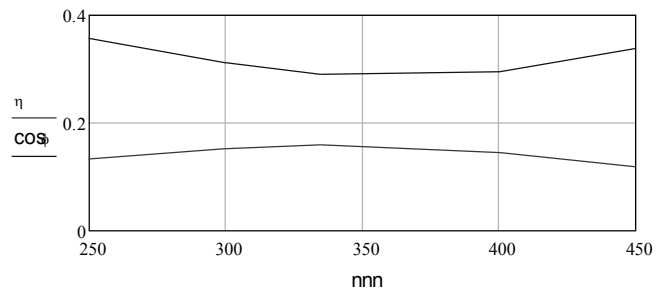


Рис. 13. Зависимости коэффициентов полезного действия и мощности от точки смены полярности питающего напряжения фазы

Максимальная величина коэффициента полезного действия двигателя достигается в том случае, когда смена направления тока в фазе происходит в моменты полного рассогласования и полного согласования зубцов статора и ротора. Результаты, представленные на рисунках 7-12, соответствуют этому условию.

Для регулирования величины электромагнитного момента ГШД следует изменить величину питающего напряжения; для регулирования скорости вращения - частоту питающего напряжения. На рисунке 14 представлена зависимость $\dot{I}(U)$ электромагнитного момента ГШД от величины питающего напряжения.

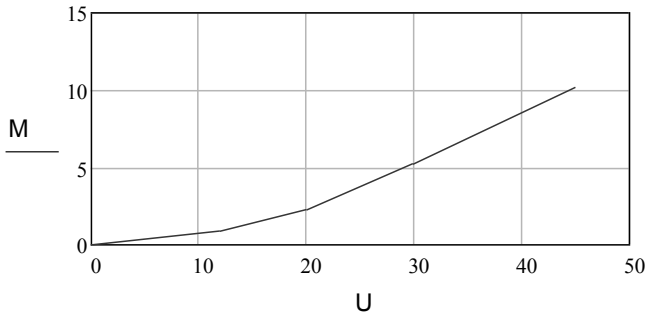


Рис. 14. Зависимость $\dot{i}(U)$ электромагнитного момента ГЩД от величины питающего напряжения

III. РАСЧЁТ ГЩД В ПОЛЕВОЙ МОДЕЛИ

Полевая модель ГЩД реализована в ANSYS Maxwell [3]. Полевая модель используется для проверки допущений, принятых в параметрической модели. Расчёты выявили слабое насыщение ярм и полюсов, отсутствие взаимной индукции между фазами, отсутствие влияния магнитного поля постоянного магнита на среднюю величину электромагнитного момента.

С помощью полевой модели ГЩД определена величина коэффициента рассеяния полюса $K\sigma = \frac{\Phi \dot{i} \dot{e} i}{\Phi} = 3$, где $\Phi \dot{i} \dot{e} i$ - магнитный поток в основании сердечника полюса; Φ - магнитный поток в венце ротора. На рисунке 15 показаны сечения, сквозь которые проходят полный и рабочий магнитные потоки.

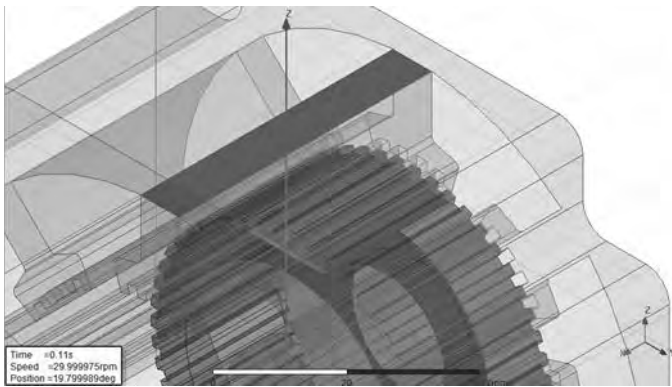


Рис. 15. Сечения, сквозь которые проходят полный (верхнее сечение) и рабочий (нижнее сечение) магнитные потоки

Полевая модель ГЩД используется для проверки результатов, получаемых с помощью параметрической модели. Выполнен расчёт пуска двигателя при неизменной величине нагрузки на валу. На рисунке 16 представлена зависимость $n(t)$ частоты вращения от времени. В установившемся режиме работы средняя величина частоты вращения 30 об/мин.

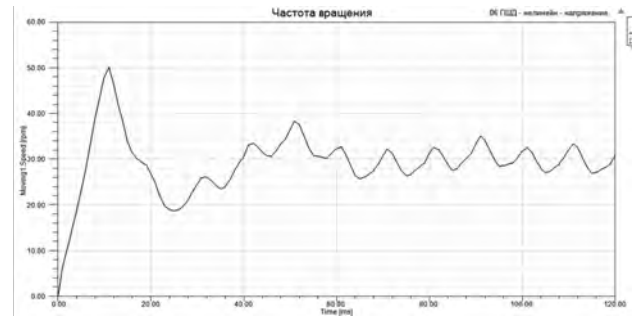


Рис. 16. Зависимость $n(t)$ частоты вращения ротора ГЩД от времени

На рисунке 17 представлена зависимость $\theta(t)$ угла поворота ротора от времени. Угол линейно нарастает - двигатель отработывает шаг каждые 10 мс.

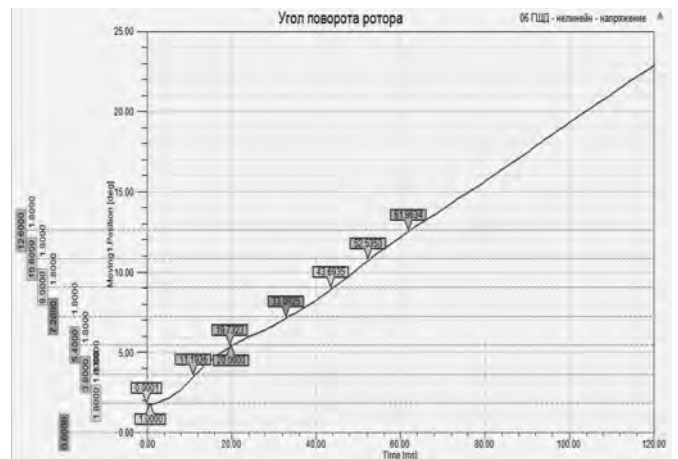


Рис. 17. Зависимость $\theta(t)$ угла поворота ротора от времени

На рисунке 18 представлены кривые фазных напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$, токов $i_1(t)$ и $i_2(t)$, кривая $M(t)$ электромагнитного момента двигателя.

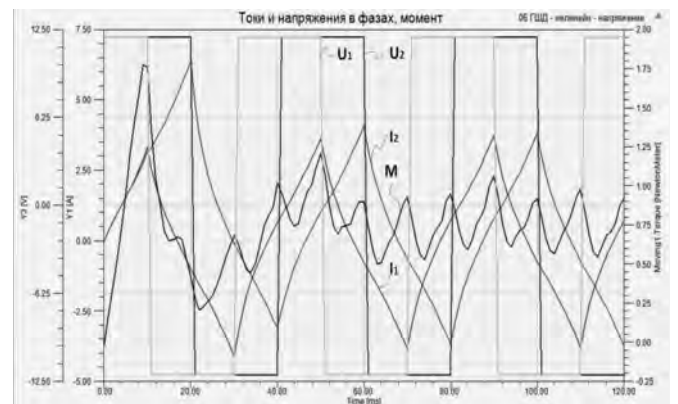


Рис. 18. Зависимости фазных напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$, токов $i_1(t)$ и $i_2(t)$, $M(t)$ электромагнитного момента двигателя от времени

Сопоставление результатов расчётов полевой и параметрической моделей представлено на рисунках 19-22 и в таблице 1.

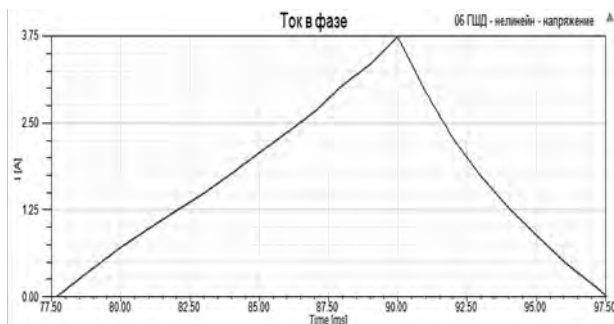


Рис. 19. Зависимость тока в фазе от угла поворота ротора, рассчитанная в полевой модели

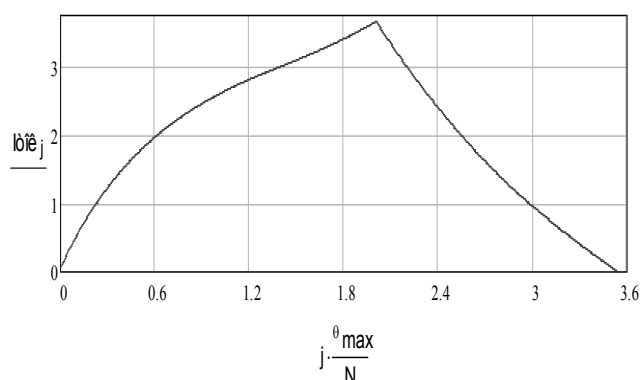


Рис. 20. Зависимость тока в фазе от угла поворота ротора, рассчитанная в параметрической модели

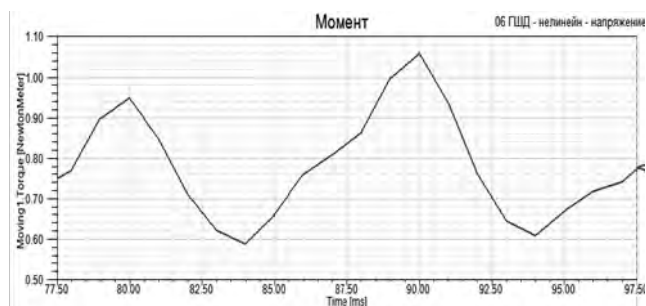


Рис. 21. Зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора, рассчитанная в полевой модели

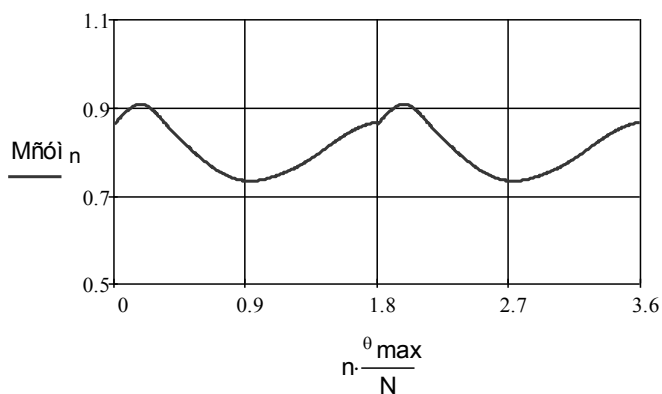


Рис. 22. Зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора, рассчитанная в параметрической модели

Расхождения в кривых объясняются принятыми допущениями.

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ГЩД В ПОЛЕВОЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛЯХ

Сравниваемый параметр	Полевая модель в ANSYS Maxwell	Параметрическая модель в Mathcad
Питающее напряжение, В	12	12
Амплитуда тока в фазе, А	3,7	3,7
Момент, Нм	0,8	0,811
КПД, %	14,4	16,1
Время отработки шага, мс	10	10
Частота вращения, об/мин	30	30

Коэффициент полезного действия в параметрической модели рассчитан с учётом лишь потерь в меди статора; в полевой модели – учтены также потери в стали и механические. Рассчитанные величины – ток, момент, полезная и потребляемая мощности, КПД – отличаются незначительно.

IV. ВЫВОД

Разработана простая параметрическая модель, позволяющая быстро и качественно оценить рабочие свойства гибридного шагового двигателя при различной величине, частоте и фазе питающего напряжения.

Список литературы

- [1] Карпенко Б.К., Ларченко В.И., Прокофьев Ю.А. Шаговые электродвигатели. Киев: Техника, 1972.
- [2] Иванов-Смоленский А. В., Аванесов М. А. Метод расчета униполярных проводимостей зубцовых контуров с учетом двухсторонней зубчатости. // Труды Московского ордена Ленина Энергетического Института. - выпуск 449, 1980.
- [3] Вебинары ANSYS на русском языке. Электромеханика. Интернет-сайт. Режим доступа: <http://www.cae-club.ru/forumy/elektromagnetizm/elektromekhanika>

References

- [1] Karpenko B.K., Larchenko V.I. Prokofiev YU.A. The Crossbar electric motors. The Kiev: Technology, 1972.
- [2] Ivanov-Smolenskiy A. V., Avanesov M. A. Method of the calculation unipolar conductivities toothing sidebar with provision for two-way zuchatosti. // Works Moscow order Lenin Energy Instituta. - an issue 449, 1980.
- [3] Vebinary ANSYS in russian language. Elektromekhanika. Internet-site. Mode of the access: <http://www.cae-club.ru/forumy/elektromagnetizm/elektromekhanika>

Синтез параметрически грубых систем модального управления

И. В. Вершинин, В. В. Тютиков

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
Иваново, Россия
e-mail: tvv@ispu.ru

Аннотация — Предложена методика синтеза одноконтурной системы автоматического управления с полиномиальным регулятором, гарантирующая получение высокого коэффициента усиления в контуре управления и необходимого качества переходных процессов (быстродействие и характер процессов). Высокий коэффициент усиления обеспечивает системе параметрическую грубость и высокую статическую точность. Методика основана на формировании характеристического полинома системы, имеющего две группы корней, одна из которых обеспечивает наличие высокого коэффициента усиления, а другая определяет качество переходных процессов. Эффективность применения методики проиллюстрирована на примере типового электромеханического объекта.

Ключевые слова — модальное управление, полиномиальный регулятор, параметрическая грубость, высокий коэффициент усиления

Synthesis parametrically roughness modal control systems

Ivan Vershinin, Vladimir Tyutikov
Ivanovo State Power Engineering University
e-mail: tvv@ispu.ru

Abstract — The proposed method of synthesis of single-loop automatic control systems with polynomial controller, which guarantees to obtain a high gain in the control loop and the required quality of transient processes (performance, and the nature of the processes). High gain system provides parametric roughness and high static accuracy. The technique is based on the formation of the characteristic polynomial of a system having two groups of roots, one of which provides high gain and the other determines the quality of transients. The efficacy of the technique is illustrated with the example of the typical electromechanical object.

Keywords — modal control, polynomial controller, parametric roughness, a high gain.

I. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение низкой параметрической чувствительности является важным требованием к современным системам автоматического управления. Исследования в этом направлении начались достаточно давно [1] и в настоящее время активно продолжаются [2-5].

Известно [6], что большой коэффициент усиления в контуре позволяет обеспечить не только высокую статическую точность, но и низкую чувствительность к вариациям параметров объекта управления. Традиционно введение большого коэффициента усиления обеспечивается в два этапа: синтез основного регулятора (в терминологии автора «стабилизирующего устройства», состоящего из звеньев с передаточными

функциями вида $H(s) = \frac{\tau s}{1 + \tau s}$), обеспечивающего в

зоне существенных частот необходимые свойства системы, дающие возможность последующего введения в контур «большого» коэффициента усиления и, собственно, введение самого коэффициента усиления. При этом качество (характер и темп) переходных процессов САУ с изменением коэффициента усиления, также может меняться.

Использование систем модального управления (МУ), позволяющих обеспечивать требуемое качество процессов в объектах, в общем случае может приводить к получению САУ с высокой чувствительностью к вариациям параметров. Вопросам повышения параметрической грубости таких систем также посвящено немало работ. В [4, 7, 8] есть достаточно объемные библиографии по этой тематике.

Данная статья посвящена использованию метода больших коэффициентов усиления для обеспечения робастных свойств САУ с полиномиальными регуляторами (ПР). Рассматриваемый подход основан на одноэтапной процедуре: синтезируемый регулятор должен обеспечивать одновременно как требуемое качество процессов в САУ, на основе соответствующего

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках базовой части государственного задания.

расположения корней характеристического полинома, так и свойство робастности посредством большого коэффициента усиления.

II. РОБАСТНОЕ МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В СИСТЕМАХ С ПОЛИНОМИАЛЬНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

Системы с полиномиальными регуляторами «входа-выхода» (рис. 1), где $A(s)$, $B(s)$, $C(s)$, $R(s)$ полиномы знаменателя и числителя передаточных функций (ПФ) объекта и регулятора соответственно, являются наиболее простым в структурном отношении решением задачи синтеза систем МУ. Поэтому решение проблемы обеспечения параметрической грубости целесообразно начать именно с них.

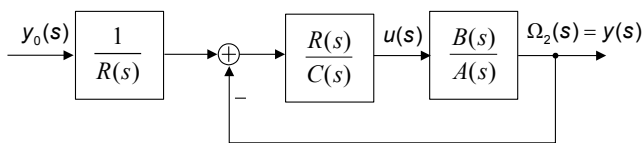


Рис. 1

В рамках выбранного подхода [7, 8] наиболее наглядно это можно показать на примере синтеза ПР для объекта управления (ОУ), не имеющего нулей в ПФ ($B(s) = b_0$).

Синтез полиномиального регулятора осуществляют по уравнению синтеза

$$A(s)C(s) + B(s)R(s) = D(s), \quad (1)$$

обычно принимая

$$\begin{aligned} \deg R(s) &= \deg A(s) - 1, \\ \deg C(s) &= \begin{cases} 0, & \text{при } \deg B(s) = 0, \\ \deg B(s) - 1, & \text{при } \deg B(s) > 0, \end{cases} \quad (2) \\ \deg D(s) &= \deg A(s) + \deg C(s), \end{aligned}$$

где

$$D(s) = s^n + d_{n-1}s^{n-1} + \dots + d_1s + d_0$$

– характеристический полином (ХП) передаточной функции САУ

$$H(s) = \frac{y(s)}{y_0(s)} = \frac{B(s)}{A(s)C(s) + B(s)R(s)} = \frac{B(s)}{D(s)},$$

в основном определяющий качество переходных процессов. Полиномы $A(s)$ и $D(s)$ нормированы, т.е. коэффициенты при старшей степени s равны единице.

Для упрощения изложения положим $B(s) = b_0$ (это справедливо для многих технических объектов и

систем) и $C(s) = c_0 = 1$ (дифференцирующий регулятор), тогда уравнение (1) синтеза ПР примет вид:

$$A(s) + b_0R(s) = D(s), \quad (3)$$

Анализируя систему уравнений, составленную из коэффициентов при равных степенях s уравнения синтеза (3) в условиях (2)

$$\begin{cases} a_{n-1} + r_{n-1} = d_{n-1}, \\ \dots \\ a_1 + r_1 = d_1, \\ a_0 + r_0 = d_0, \end{cases}$$

можно сделать вывод о том, что увеличение значений коэффициентов полинома $D(s)$ приведет к соответствующему увеличению коэффициентов регулятора

$$\begin{cases} r_{n-1} = d_{n-1} - a_{n-1}, \\ \dots \\ r_1 = d_1 - a_1, \\ r_0 = d_0 - a_0, \end{cases}$$

т.е. увеличению коэффициента усиления в контуре управления. Это позволит не только снизить статическую ошибку, но и повысить параметрическую грубость САУ. Это справедливо, если $d_i > a_i$, что может быть легко обеспечено, поскольку коэффициенты d_i задаются проектировщиком.

Отметим, что при $\deg C(s) > 0$ указанный эффект сохраняется, однако показать это аналитически сложно.

При $\deg B(s) > 0$, в зависимости от выбора значений d_i , возможно получение передаточной функции регулятора в виде неустойчивого или неминимальнофазового звена [8]. В этом случае говорить о грубости САУ не приходится.

Однако необходимо учитывать, что при использовании в качестве $D(s)$ стандартных полиномов (Ньютона, Баттерворта и т.п.) увеличение значений d_i приводит к росту быстродействия:

$$D(s) = s^n + d'_{n-1}\Omega_0s^{n-1} + \dots + d'_1\Omega_0^{n-1}s + \Omega_0^n.$$

Здесь Ω_0 – среднегеометрический корень, определяющий быстродействие, d'_i – коэффициенты, от которых зависит характер процессов.

Известно, что быстродействие динамических систем зависит от расположения «созвездия» корней их ХП на комплексной плоскости: чем дальше оно расположено от мнимой оси (чем выше значение Ω_0), тем выше быстродействие. Характерной особенностью стандартных полиномов является компактное

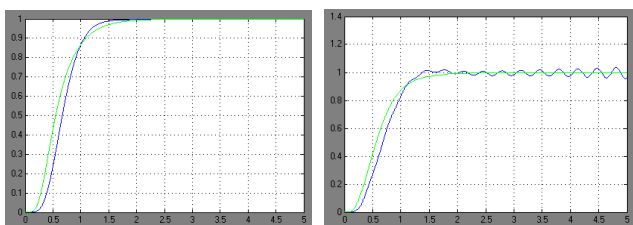
Во втором случае с помощью выбора меньшего по модулю корня ХП ($s_7 = -3$) обеспечивается требуемое время переходных процессов в САУ, а значения остальных корней выбираются для получения высокого коэффициента усиления в контуре.

Исследовалось двукратное изменение момента инерции J_2 исполнительного механизма, как параметра наиболее подверженного вариациям. Структура исследуемой САУ приведена на рис. 1.

Графики переходных процессов при номинальных параметрах ОУ приведены на рис. 2, а (темная линия для $H_{p1}(s)$, светлая линия для $H_{p2}(s)$). Очевидно, что при более высоких значениях коэффициентов регулятора $H_{p2}(s)$ качество процессов практически одинаково.

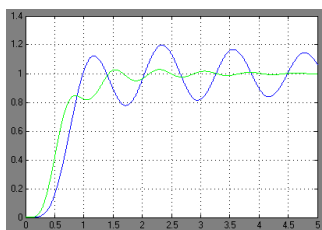
Графики переходных процессов по частоте вращения Ω_2 , полученные при уменьшении момента инерции исполнительного механизма в два раза приведены на рис. 2, б, а при увеличении в 2 раза – на рис. 2, в (темная линия для $H_{p1}(s)$).

Таким образом, анализ результатов показал, что система, синтезированная по предложенному принципу, обладает значительно большей параметрической грубостью в сравнении с синтезированной с использованием стандартного ХП. Более того, данный подход позволяет обеспечить компромисс между параметрической грубостью и величиной коэффициентов регулятора, поскольку последняя может быть критична для его последующей программно-аппаратной реализации.



а)

б)



в)

Рис. 2

Дальнейшие исследования предполагается вести в направлении оценки помехоустойчивости и затрат на управление систем, синтезированных по предложенному методу.

Список литературы

1. **Надеждин П.В.** О практической неустойчивости (негрубости) систем, полученных по методу статьи [1] // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 1973. – №5. – С. 196–198.
2. **Гайдук А. Р.** Синтез систем управления при слабо обусловленной полноте объектов // Автоматика и телемеханика. 1997, № 4. С. 133-144.
3. **Гончаров В. И.,** Лиепиньш А. В., Рудницкий В. А. Синтез робастных регуляторов низкого порядка // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 4. – С. 36–43.
4. **Поляк Б.Т.,** Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
5. **Филимонов А. Б.,** Филимонов Н. Б. Метод больших коэффициентов усиления и эффект локализации движений в задачах синтеза систем автоматического управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 2. – с. 2-10.
6. **Мееров М. В.** Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности – М.: Наука, 1967. – 424 с.
7. **Гайдук А. Р.** Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.
8. **Тютиков В. В., Тарарыкин С. В.** Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново: ИГЭУ, 2006. – 256 с.

References

1. Nadezhdin P.V. O prakticheskoy neustojchivosti (negrubosti) sistem, poluchennyh po metodu stat'i [1] // Izv. RAN. Avtomatika i telemehanika. 1973, №5, pp. 196–198.
2. Gajduk A. R. Sintez sistem upravlenija pri slabo obuslovennoj polnote obyektov // Avtomatika i telemehanika. 1997, № 4, pp. 133-144.
3. Goncharov V. I., Liepin'sh A. V., Rudnickij V. A. Sintez robastnyh reguljatorov nizkogo porjadka // Izv. RAN. Teorija i sistemy upravlenija. 2001, № 4, pp. 36–43.
4. Poljak B.T., Shherbakov P.S. Robastnaja ustojchivost' i upravlenie. M.: Nauka, 2002, 303 pp.
5. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Metod bol'shih kojefficientov usilenija i jeffekt lokalizacii dvizhenij v zadachah sinteza sistem avtomaticheskogo upravlenija // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. 2009, № 2, pp. 2-10.
6. Meerov M. V. Sintez struktur sistem avtomaticheskogo regulirovanija vysokoj tochnosti. M.: Nauka, 1967, 424 pp.
7. Gajduk A. R. Teorija i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravlenija (polinomial'nyj podhod). M.: FIZMATLIT, 2012, 360 pp.
8. Tjutikov V. V., Tararykin S. V. Robastnoe modal'noe upravlenie tehnologicheskimi obyektami. Ivanovo: IGJeU, 2006, 256 pp.

V. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Системы управления и автоматизация
- Информационные технологии в управлении
- Разработка программного обеспечения
- Численные методы и параллельные вычисления
- Прикладные задачи математики
- Геометрическое моделирование и графика

Особенности реализации сложных функций АСУТП с использованием тренажеров

К.О. Егорова, А.В. Голубев

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина

Иваново, Россия

kafsu@su.ispu.ru, kse290792@gmail.com

Аннотация — Потенциал реализации задач в современных программно-технических комплексах практически неограничен, что позволяет успешно реализовывать все типовые и часть сложных функций, в том числе автоматизированный пуск. Однако реализация системы пуска в современных АСУТП на реальном оборудовании затруднительна и связана с многочисленными испытаниями. Реализована часть системы автоматизированного пуска котла - пошаговое логическое управление вентиляцией топки и пуском ПЭН. Выявлены ошибки и произведена отладка алгоритма управления в системе тренажерного комплекса. Проведены испытания пуска вентиляцией топки и пуска ПЭН.

Ключевые слова — тренажерный комплекс, сложные функции, функционально-групповое управление, автоматизированный пуск

Features of development of sophisticated functions of automatic control system of technological process in the system of the training complex

K.O. Egorova, A.V. Golubev

Ivanovo State Power University

Ivanovo, Russia

kafsu@su.ispu.ru, kse290792@gmail.com

Abstract — Implementation challenges in modern IC complexes are practically unlimited, thus it allows us to implement successfully all typical and some of the sophisticated functions including automated start-up. However, the implementation of the trigger system in modern process control systems on technological equipment is difficult and goes along with multiple tests. A part of the system of automated start-up of the boiler is implemented, that is step-by-step logic control system of ventilation of the combustion chamber and feed electric pump. The errors are identified and debugging of the control algorithm in the system of the training complex is carried out. The tests of start-up of ventilation of the combustion chamber and feed electric pump are carried out.

Keywords — training complex, sophisticated functions, functional-group control, automated start-up

Задача оптимизации работы электростанций всегда актуальна, однако при оптимизации нормальных режимов работы энергетического оборудования на первый план выдвигается задача обеспечения маневренного управления энергоблоками в режимах, требующих быстрого и глубокого изменения нагрузки, а также для обеспечения автоматизации пуска и аварийной разгрузки энергоблока.

В пусковых режимах энергоблока оператору приходится контролировать большое число параметров и показателей состояния оборудования. Это чрезвычайно затрудняет работу оператора, неизбежно снижает качество эксплуатации и, как следствие, эксплуатационную надежность оборудования [1].

Потенциал реализации задач в современных программно-технических комплексах (ПТК) практически неограничен, что позволяет успешно реализовывать все

типовые и часть сложных функций. Однако реализация сложных функций в современных АСУТП на реальном оборудовании затруднительна и связана с многочисленными испытаниями.

Использование полигонов АСУТП с имитационными моделями технологического оборудования, разработанных на основе тренажера и функционирующих в режиме реального времени, является одним из решений таких сложных и наукоемких задач, как автоматизация пусковых и аварийных режимов работы энергоблоков [2]. На практике сложные функции АСУТП используют как фундамент типовые функции такие, как дистанционное управление, автоматическое регулирование и технологические защиты.

Таким образом, на первом этапе для реализации таких функций полигон АСУТП должен быть максимально

Разработка интернет-ресурса для анализа мест размещения объектов торговли в городе Иваново

А.М. Садыков, Д.Д. Кайзер

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
Иваново, Россия
dasha-kaizer@mail.ru

Аннотация – данная работа посвящена решению проблемы выбора места расположения торгового объекта с учетом пространственных факторов. Основной целью является разработка веб-сайта, на котором можно определять наиболее выгодное местоположение объекта торговли на карте города Иваново, исходя из указанных пользователем вариантов расположения. В результате проведенного исследования для решения поставленной задачи был выбран интерактивный метод теории принятия решений: метод «смещенного идеала» и реализован экспериментальный веб-сайт, позволяющий решать поставленную задачу.

Ключевые слова – место расположения; веб-сайт; метод «смещенного идеала»

Development of the Internet resource for the analysis of the shops allocation in the Ivanovo city

Artur Sadykov, Darya Kayzer

Ivanovo State Power Engineering University
Ivanovo, Russian Federation
dasha-kaizer@mail.ru

Abstract – this paper is devoted to the problem of a choice the shop location. Main purpose is to development of the web site which allows to set variants for the location and determine the most favorable location of the shop on the map of Ivanovo. To solve the task was chosen interactive method of the decision theory: the method of “displaced ideal”, and also was realized the web site.

Keywords – location; web site; method of “displaced ideal”

I. ВВЕДЕНИЕ

Для любого предприятия торговли выбор места расположения является одной из важнейших задач, которая во многом предопределяет успех его деятельности. От того, где будет располагаться торговый объект, зависит привлекательность магазина для потребителей, сроки возврата инвестиций и прибыль предприятия. Математические методы решения таких задач рассматриваются в [1]. Примеры решения можно найти в [2,3]. Однако использование таких средств математического анализа для решения в конкретных условиях в настоящее время затруднено из-за сложности организации расчетов и сбора исходных данных.

В городе Иваново имеется реализованная на базе географической информационной системы (ГИС) бесплатная картографическая информационно-справочная система КИССА (www.ivanovomap.ru). В составе этой

системы можно реализовать возможности анализа мест размещения объектов торговли с учетом уже имеющихся там данных и предоставить эти возможности широкому кругу пользователей. Целью данной работы является разработка веб-сайта, на котором можно определять наиболее выгодное местоположение торгового объекта на карте города Иваново, исходя из указанных пользователем вариантов расположения.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Определение оптимального варианта расположения магазина является многокритериальной задачей, на исход решения которой оказывают влияние множество факторов. В данной работе были использован подход, основанный на учете зон влияния (зон охвата). Для каждой точки потенциального размещения магазина можно определить такую зону в простейшем случае как круг, радиус которого зависит от типа магазина (табл. 1).

Таблица 1. Зоны охвата торговых объектов

Тип магазина	Примерная площадь (м ²)	Радиус зоны охвата (м)
Магазин шаговой доступности (минимаркет)	До 300	500
Универсальный магазин (мидмаркет, универмаг, универсам)	300 – 600	1500
Средние специализированные и универсальные магазины (супермаркет, большой универмаг и т.п.)	600 – 2000	3000
Крупные специализированные и универсальные магазины (гипермаркет, торговый центр и т.д.)	Более 2000	7000

Зная зону охвата магазина, можно определить количество конкурентов, сфера влияния которых попадает в эту зону, а также количество потенциальных покупателей. Таким образом, можно определить 2 критерия, по которым будет определяться наиболее предпочтительный вариант расположения: количество конкурентов и количество потенциальных клиентов (1):

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x)) \quad (1)$$

где $f(x)$ – вектор критериев, $f_1(x)$ – количество конкурентов, $f_2(x)$ – количество потенциальных клиентов.

На основе уже этих данных можно сформулировать поставленную задачу, как многокритериальную задачу:

X – множество альтернатив;

Y – множество критериев;

$f_i : Y \rightarrow R, i = 1, \dots, n$ – множество показателей качества (критериев, определенных на множестве исходов);

$\varphi : X \rightarrow Y$ – детерминированная функция, отображающая множество альтернатив во множество исходов.

С помощью суперпозиции (2)

$$J_i(x) = f_i(\varphi(x)), i = 1, \dots, n \quad (2)$$

мы имеем возможность непосредственно оценивать качество самого решения (альтернативы) $x \in X$ и работать с векторным отображением

$$J : X \rightarrow R^n, J = (J_1, \dots, J_n), J(X) = F \subset R^n \quad (3)$$

В результате приходим к очень распространенной в приложениях многокритериальной модели принятия решений, или задаче многокритериальной оптимизации вида:

$$J_i(x) \rightarrow \max_{x \in X}, i = 1, \dots, n \quad (4)$$

Для ее решения был выбран интерактивный метод теории принятия решений: метод «смещенного идеала». Так как нельзя выделить один главный критерий, по которому будет проводиться оценка вариантов расположения торгового объекта. По методу «смещенного

идеала» невыгодные варианты постепенно исключаются, пока не останется самый предпочтительный.

Для определения значений критериев от каждого поставленного пользователем варианта строятся зоны охвата (Рис. 1).

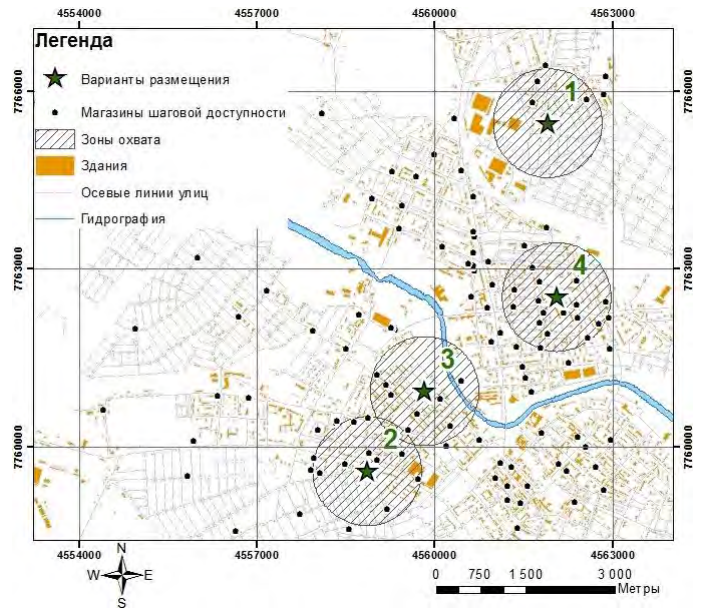


Рис. 1. Построение зон охвата вариантов расположения.

Количество пересечений зон влияния магазинов шаговой доступности с зоной влияния будущего магазина устанавливает количество конкурентов (Рис. 2).

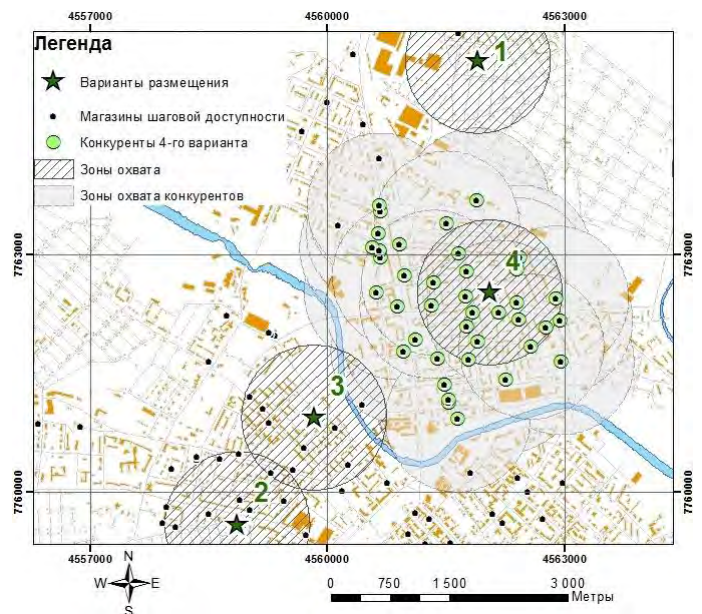


Рис. 2. Определение количества конкурентов для варианта расположения торгового объекта.

Количество потенциальных клиентов определяется подсчетом жителей, живущих в домах, которые попадают в зону влияния будущего магазина (Рис. 3).

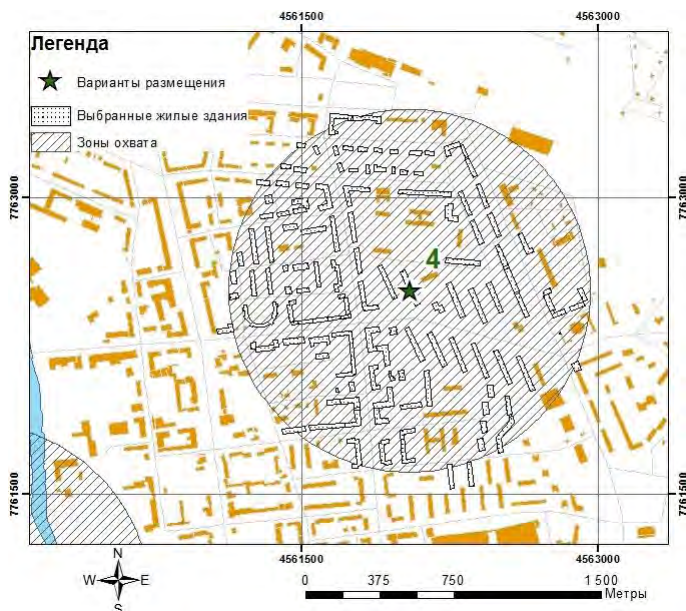


Рис. 3. Выборка жилых зданий, которые попадают в зону влияния варианта расположения.

Данные о количестве потенциальных клиентов и количестве конкурентов используются в методе «смещенного идеала» и представлены в табл. 2.

Таблица II. ЗНАЧЕНИЯ КРИТЕРИЕВ ВЫБОРА

Номер варианта размещения торгового объекта	Количество конкурентов	Количество потенциальных клиентов
1	10	4330
2	26	6312
3	36	9413
4	40	11590

Первым шагом в методе «смещенного идеала» является формирование идеального объекта. Значения его критериев будут равны максимальным значениям критериев выбора, полезность по которым возрастает, и минимальным – полезность по которым убывает [4]. Таким образом, получаем вектор значений идеального объекта:

$$Y^+ = \{k_1^+, \dots, k_n^+\} \quad (5)$$

Причем идеальный объект может не принадлежать реальному множеству объектов или вообще не существовать.

Формируется наихудший объект. Значения критериев наихудшего объекта будут равны минимальным значениям критериев выбора, полезность по которым возрастает, и максимальным – полезность по которым убывает:

$$Y^- = \{k_1^-, \dots, k_n^-\} \quad (6)$$

Теперь с помощью идеального и наихудшего объекта можно оценить текущие объекты с точки зрения удаленности или близости к идеальному объекту:

$$b_i = \frac{(k^+ - k_i)}{(k^+ - k^-)} \quad (7)$$

где k_i – текущее значение критерия сравниваемого объекта, b_i – значение критерия в относительных единицах. Значение критерия в относительных единицах интерпретируются как расстояние от текущего объекта по критерию до идеального объекта.

Для выявления не наилучших объектов используется метрика, вычисляющая расстояние от каждого объекта до наихудшего объекта:

$$L^p = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^n (1 - b_i)^p} \quad (8)$$

где, p – коэффициент, характеризующий степень концентрации, позволяющий переходить к различным видам метрики для вычисления расстояния. Чем больше значение метрики L , тем ближе объект находится к идеальному.

Проанализировав значения метрик при разных значениях p , из дальнейшего рассмотрения исключаются объекты, которые доминируются по всем используемым метрикам.

Если сокращенное множество альтернатив состоит более чем из одного объекта, процедура повторяется, начиная с построения нового идеального объекта.

Для реализации поставленной задачи был написан скрипт на языке Python, который включает в себя функции геообработки и метод «смещенного идеала». Скрипт был использован при построении модели в нотации ModelBuilder, которая публикуется средствами ArcGIS for Desktop на ГИС-сервере.

Разработанное веб-приложение имеет клиент-серверную архитектуру, состоящую из клиента, веб-сервера и ГИС-сервера.

Клиентская часть приложения разрабатывалась с помощью ArcGIS API for JavaScript. В работе ArcGIS API for JavaScript используется серверный интерфейс прикладного программирования (API) REST.

На ГИС-сервере располагается сервис геообработки, сервис пространственных объектов и картографические сервисы. С помощью сервиса пространственных объектов пользователь может устанавливать варианты размещения торговых объектов на карте города, редактировать и удалять их. Сервис геообработки содержит в себе функции геообработки и метод «смещенного идеала», обрабатывает данные, полученные из веб-приложения, и возвращает результирующий слой: проранжированные по привлекательности варианты размещения торгового объекта. Картографические сервисы отвечают за отображение объектов на карте.

Веб-приложение использует карту и базу данных системы КИССА. Интерфейс интернет-ресурса представлен на Рис.4.

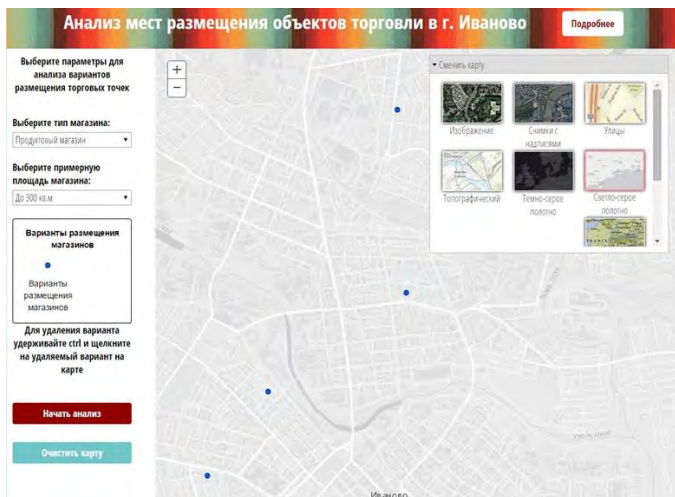


Рис. 4. Интерфейс веб-приложения.

Интерфейс системы состоит из карты, боковой области и панели навигации. Пользователю предлагается выбрать тип будущего магазина (продуктовый магазин/спортивные товары/магазин одежды) и его примерную площадь (до 300 (м²)/300 – 600 (м²)/600 – 2000 (м²)/более 2000 (м²)). Далее следует область редактирования, которая позволяет пользователю установить варианты размещения торгового объекта. Чтобы удалить вариант расположения следует удерживать **ctrl** и нажать левой кнопкой мыши на удаляемый вариант на карте. Для удаления всех вариантов размещения существует кнопка «Очистить карту».

После установки вариантов размещения пользователь может запустить процесс анализа, нажав на кнопку «Начать анализ». В этот момент тип будущего магазина, его площадь и координаты поставленных пользователем вариантов отправляются на сервер.

Сервер возвращает результат анализа: проранжированные варианты размещения торгового объекта (Рис.6).

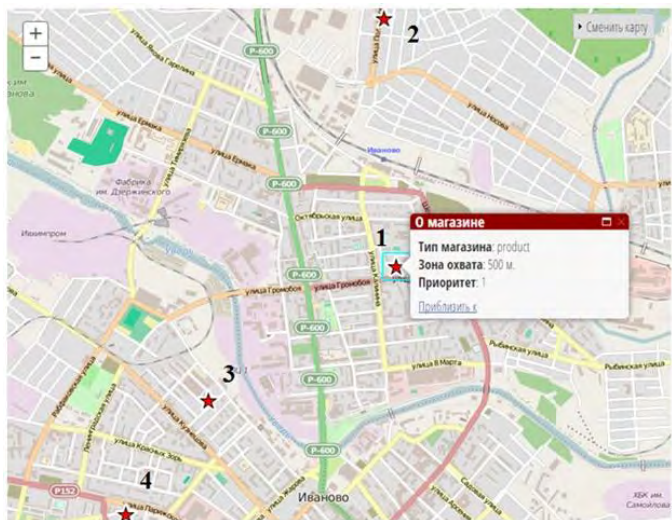


Рис. 5. Проранжированные варианты размещения торгового объекта.

По щелчку мыши на экране отображается информация о варианте размещения: тип магазина, его зона охвата и приоритет.

Чтобы снова запустить приложение необходимо очистить карту и повторить все шаги, описанные выше.

III. ВЫВОДЫ И ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Результаты проведенных экспериментов по выбору мест размещения с использованием разработанного сайта показывают, что реализованный метод дает адекватные результаты.

В дальнейшем планируется добавление большего числа критериев, по которым будет проводиться анализ вариантов расположения торговых объектов. Например, наличие в зоне охвата торгового объекта офисных зданий, развлекательных центров, кинотеатров, остановок общественного транспорта и другие.

Для более корректного определения зон охвата размещаемых объектов целесообразно использовать точные области обслуживания. Область обслуживания сети – это регион, охватывающий все доступные улицы. Для этого потребуются актуальный граф дорог. На основе этой информации можно определять области обслуживания в пешей доступности и доступности на автомобиле.

Список литературы

- [1] Методы решения задачи размещения объектов обслуживания [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.mtas.ru/Library/uploads/1206870951.pdf>.
- [2] ГИС для розничной торговли [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://esri-cis.ru/news/arcview/detail.php?ID=878&SECTION_ID=26.
- [3] Размещение предприятий на географической территории с использованием дихотомического программирования [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/103-6155>.
- [4] Афоничкин А. И., Михаленко Д. Г. Управленческие решения в экономических системах: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2009.– 480 с.: ил. – (Серия «Учебник для вузов»).

References

- [1] Metody reshenija zadachi razmeshhenija ob#ektov obsluzhivaniya [Methods for solving the problem of placement of service facilities] [Jelektronnyj resurs]: – Rezhim dostupa: <http://www.mtas.ru/Library/uploads/1206870951.pdf>.
- [2] GIS dlja roznichnoj trgovli [GIS for retail] [Jelektronnyj resurs]: – Rezhim dostupa: http://esri-cis.ru/news/arcview/detail.php?ID=878&SECTION_ID=26.
- [3] Razmeshhenie predpriyatij na geograficheskoj territorii s ispol'zovaniem dihotoicheskoego programmirovaniya [Placement of the enterprises in a geographic territory using a dichotomous programming] [Jelektronnyj resurs]: – Rezhim dostupa: <http://www.science-education.ru/103-6155>.
- [4] Afonichkin A. I., Mihalenko D. G. Upravlencheskie reshenija v jekonomicheskix sistemah: Uchebnik dlja vuzov. [Management decisions in economic systems: Textbook for universities], SPb.: Piter, 2009, 480 pp.: il. – (Serija «Uchebnik dlja vuzov»).

Разработка веб-приложения для выбора мест проживания в городе Иваново с учетом пространственных критериев

А.М. Садыков, М.Д. Кайзер

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
Иваново, Россия
kaizer-md@mail.ru

Аннотация – в работе рассматривается решение задачи выбора места жительства в городе Иваново. Целью работы является разработка веб-приложения, позволяющего осуществлять поиск места жительства с использованием карты города. При поиске учитываются различные критерии, в том числе и территориальные. В проведенном исследовании была выбрана технология разработки и реализовано веб-приложение.

Ключевые слова – поиск; веб-приложение; карта

Development of a web application for the accommodation choice in the Ivanovo city taking into account the spatial criteria

Artur Sadykov, Maria Kayzer

Ivanovo State Power Engineering University
Ivanovo, Russian Federation
kaizer-md@mail.ru

Abstract – this work studies problem of accommodation choice in the city of Ivanovo. Purpose is to development of web application that allows to search accommodation with map of the city. The search takes into account various criteria including territorial criteria. As a result of this work technology of development was chosen and also web application was realized.

Keywords – search; web application; map

I. ВВЕДЕНИЕ

Практически каждый человек в своей жизни сталкивался с проблемой выбора места жительства. В большинстве случаев анализ различных территориальных факторов, оказывающих влияние на выбор, вызывает трудности, даже если использовать карту города, размещенную в Интернете. Благодаря географической информационной системе (ГИС), решение данной задачи можно упростить. Примером постановки задачи может быть следующая формулировка: необходимо подобрать один или несколько вариантов недвижимости, этажность которой не более 5 этажей, расстояние до проезжих частей магистральных улиц не более 1 км, расстояние до парков не более 400 м. Если первый критерий можно получить с помощью запроса к базе данных, то территориальные критерии требуют рассматривать здание как пространственный объект и могут быть учтены только с использованием ГИС [1].

Существующие разработки, например, система «2ГИС» для поиска новостроек по определенным

критериям в г. Москве [2], портал недвижимости Санкт-Петербурга, Москвы, их областей, Краснодарского края [3] помогают пользователям решать задачу выбора мест проживания. Однако они недоступны для жителей города Иваново. Интернет-приложения, позволяющие осуществлять поиск жилья в городе Иваново с помощью карты, например, сервис «Циан» [4], «Domofond.ru» [5] и другие, не обладают территориальными критериями поиска (расстояние до различных объектов). Целью данной работы является создание веб-приложения, названного геокалькулятор, и позволяющего решать данную задачу для территории города Иваново.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В результате ранее проведенных исследований была создана первая версия приложения в виде инструмента для настольных продуктов ArcGIS 10.1 [6]. Карта г. Иваново взята из картографического проекта в сети Интернет OpenStreetMap. В системе реализована возможность формирования в режиме диалога запросов на выборку зданий по следующим критериям: численность

жителей, количество этажей, расстояние до магистральных улиц, расстояние до водоемов, расстояние до парков. Пример запроса для выбора: найти жилое здание, численность которого от 10 до 300 человек, находящееся на расстоянии от 100 до 400 метров от проезжих частей магистральных улиц и от 200 до 600 метров от парка. В результате выполнения подобных запросов на карте отображается набор зданий, удовлетворяющих заданным условиям. В данной работе проведена разработка веб-приложения на основе имеющейся версии информационной системы, позволяющего получать необходимую информацию о зданиях в онлайн-режиме.

Разработка веб-версии геокалькулятора для выбора мест проживания в городе Иванове велась с помощью технологии JavaScript и API-интерфейса ArcGIS API for JavaScript. Для реализации поисковых запросов был создан сервис геообработки. Сервисы геообработки – это способ предоставления аналитических функций ArcGIS в Интернете. Сервисы содержат задачи геообработки, каждая задача использует простые данные из веб-приложений, обрабатывает их и возвращает значимые выходные данные в форме объектов, карт, отчетов и файлов. Задача геообработки – это инструмент геообработки, выполняющийся на сервере, его работа и выходные данные контролируются сервером [7]. Серверная часть веб-приложения для поиска зданий, в виде сервиса геообработки, создавалась с помощью скриптов на языке Python. Сервер ГИС-приложения – это наиболее важный компонент. Его функциональность, возможность настройки под пользователя, масштабируемость и производительность имеют решающее значение для успешной работы ГИС-приложения [8]. В качестве сервера веб-приложения для выбора мест проживания в г. Иванове использовался ArcGIS for Server.

Процесс разработки системы состоял из нескольких этапов. Первоначально были получены картографические данные из проекта OpenStreetMap, и сформирована база геоданных. Для реализации функции поиска был реализован алгоритм в виде скрипта на языке Python. Следующим этапом было формирование инструмента геообработки. Для его выполнения была использована программа ArcMap, являющаяся частью программного продукта ArcGIS for Desktop. Разработанный скрипт был включен в модель в нотации ModelBuilder. ModelBuilder – встроенное приложение ArcMap. В данной нотации элементы в виде эллипса означают наборы данных, а прямоугольные блоки – программно-реализованные функции ArcGIS (Рис. 1).

Входными данными в инструмент геообработки являются: путь к базе геоданных с исходными слоями (здания, водоемы, парки, магистрали) – *Inputs.gdb*, путь к базе геоданных с результатами поиска – *Scratch.gdb*, слой водоемов *water line clip*, слой зданий *BuildPopFloor 1*, слой парков *park*, слой магистральных улиц *road*, критерии поиска. Каждый критерий поиска имеет два поля – нижнюю и верхнюю границу. Для критерия количество этажей входными данными являются значения *floor1* и *floor2*, для количества жителей – *pop1* и *pop2*, для расстояния до водоемов – *water1* и *water2*, для расстояния до проезжих частей магистральных улиц – *road1* и *road2*, для расстояния до парков – *park1* и *park2*.

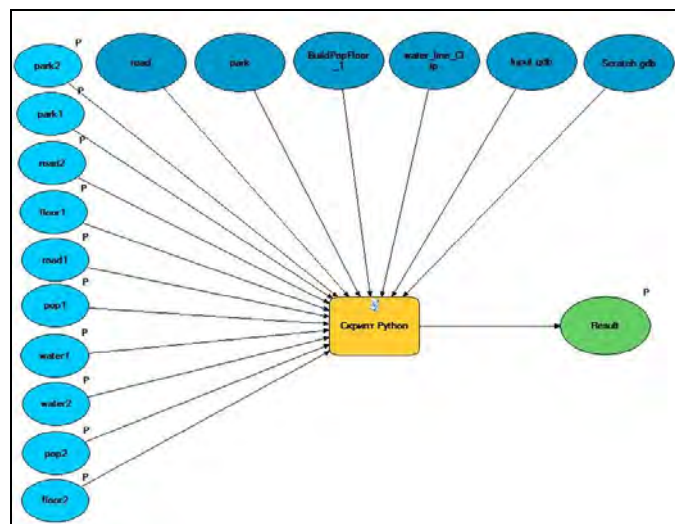


Рис. 1. Инструмент геообработки в нотации ModelBuilder.

Выходными данными данного инструмента геообработки является слой с результатами поиска, т.е. зданиями, удовлетворяющими введенными критериям. Для использования возможностей разработанного инструмента его необходимо сделать доступным в сети Интернет, этот процесс называется публикация. Публикация инструмента геообработки так же осуществлялась через программный продукт ArcMap. В результате на ГИС-сервере ArcGIS for Server был опубликован сервис геообработки, который принимает критерии поиска, введенные пользователем, и выполняет поиск, а так же картографический сервис, который позволяет получить отображение результатов поиска на карте.

Рассмотрим содержание сервиса геообработки, который использовался для реализации поисковых запросов. Исходные пространственные данные отображены на Рис. 2.

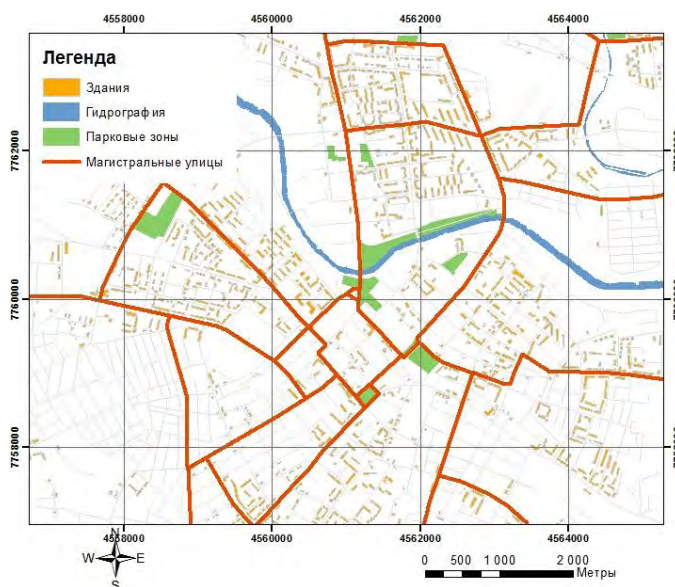


Рис. 2. Исходные пространственные данные.

Такие критерии поиска, как количество этажей и количество жителей реализуются SQL-запросами к слою

данных зданий. Поиск с учетом расстояний до объектов (например, до водоемов) происходит с использованием функций геообработки. Строится буферный полигон на меньшее расстояние, введенное пользователем, затем строится буфер на большее расстояние (Рис. 3), производится операция вырезание этих двух областей.

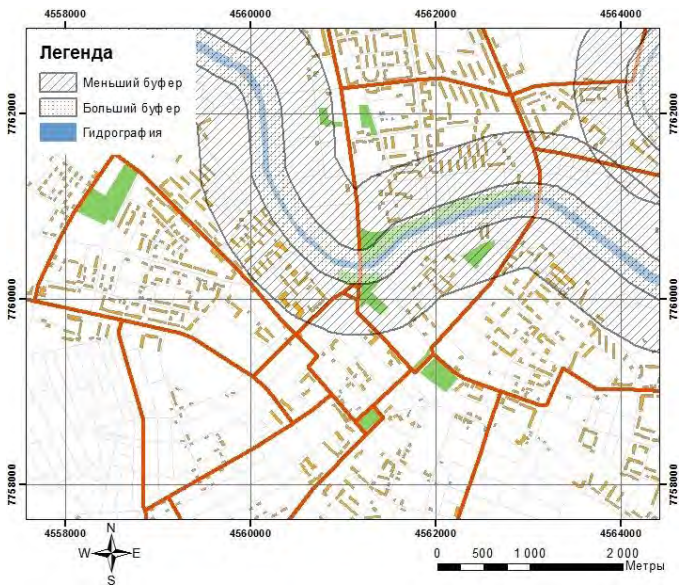


Рис. 3. Построение буферных областей вокруг водоемов на меньшее и большее расстояние.

Получается введенный пользователем интервал (Рис. 4). Все жилые здания, которые попадают в полученную область, будут удовлетворять критерию поиска на этом этапе и являются входными данными для учета критериев близости магистральной улиц и парков.

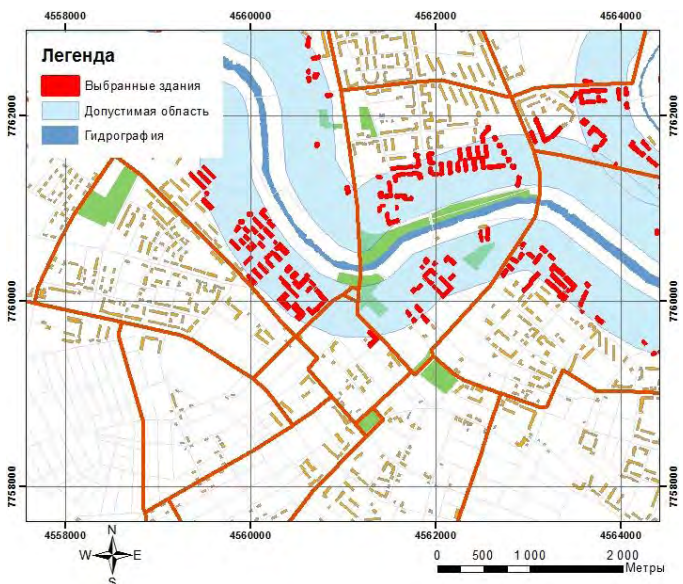


Рис. 4. Результат выполнения операции вырезания буферных областей.

На Рис. 5 показана диаграмма деятельности метода поиска, которая отображает процессы, составляющие реализованный алгоритм. Процесс поиска происходит последовательно: сначала выполняется выборка зданий по этажности и количеству жителей, затем результат выборки поступает на проверку близости к

пространственным объектам (водоемам, магистралям, паркам). Каждый запрос применяется только к зданиям, полученным в качестве результата в предыдущих выборках.



Рис. 5. Диаграмма деятельности метода поиска.

При разработке клиентской части веб-приложения использовался ArcGIS API for JavaScript, который создан на основе библиотек инструментов Dojo JavaScript toolkit. На Рис. 6 представлен интерфейс приложения для выбора мест проживания в городе Иваново.

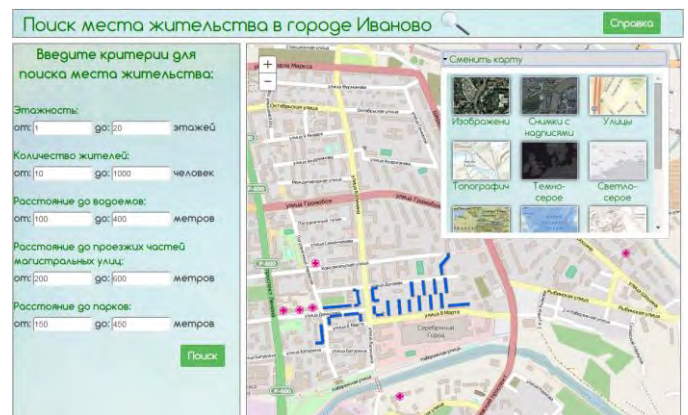


Рис. 6. Интерфейс веб-приложения с результатом работы.

На представленном выше рисунке показано, что основными элементами интерфейса приложения являются область карты и область ввода критериев поиска. Пользователь может заполнить от одного до пяти критериев поиска. Система запускает поиск мест проживания в том случае, если поля критериев заполнены верно (не содержат ошибок, например, нижняя граница критерия больше верхней). В результате здания, удовлетворяющие критериям поиска, отображаются на карте, выделяются цветом. Для просмотра более детальной информации о результате необходимо кликнуть на него левой кнопкой мыши. Данные о результатах поиска (адрес, этажность, количество жителей) берутся из базы геоданных. Фрагмент карты разработанного веб-приложения показан на Рис. 7.

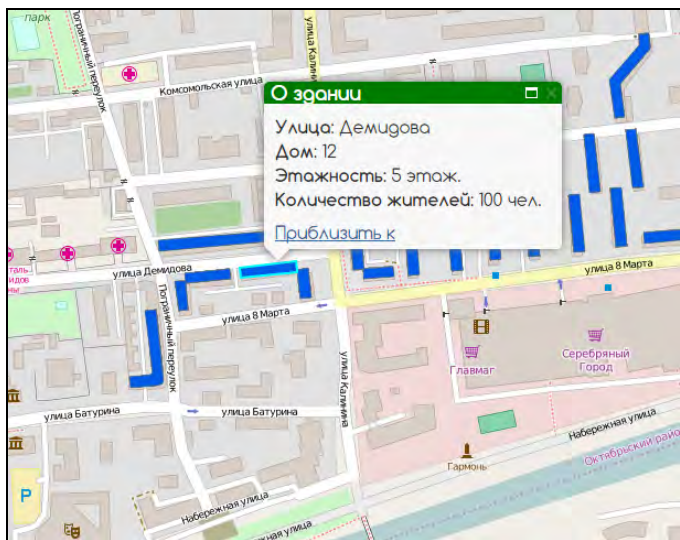


Рис. 7. Отображение окна с информацией о результате поиска.

Благодаря преобразованию информационной системы из инструмента для настольного приложения в веб-приложение, удалось достичь следующих результатов:

- с помощью картографического веб-приложения пользователи по всему миру могут иметь доступ к информации со своих компьютеров или мобильных устройств;
- веб-приложением могут пользоваться сотни пользователей одновременно, тогда как с настольной ГИС в определенный момент времени может работать только один человек;
- веб-версия сделала систему доступной для работы широкого круга пользователей, в том числе и людей, которые не являются профессионалами и не имеют опыта работы с ГИС, а так же избавила от необходимости установки дополнительного программного обеспечения.

III. Выводы и дальнейшие перспективы развития

В дальнейшем может быть увеличено количество критериев поиска, относящихся к объектам недвижимости (добавить тип жилья, количество комнат, стоимость, метраж, тип дома, наличие фото и т.п.), чтобы сделать процесс поиска более точным. Для повышения привлекательности системы возможно добавление данных об объектах торговли, образования, социально-культурного назначения, здравоохранения.

Результаты работы планируется использовать при развитии картографической информационно-справочной системы города Иваново (КИССА), что позволит в будущем предложить разработанное приложение агентствам недвижимости города.

Список литературы

- [1] Геоинформатика: Учеб. для студ. вузов / Е.Г.Капралов, А. В. Кошкарев, В. С. Тикунов и др.; Под ред. В. С.Тикунова. – М: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с, [8] с. цв. ил.: ил. (Классический университетский учебник).
- [2] Карта Москвы: улицы, дома и организации города [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://2gis.ru/moscow>.
- [3] Портал недвижимости Санкт-Петербурга, Москвы, их областей, Краснодарского края [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://www.restate.ru/map>.
- [4] Сервис "ЦИАН" [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://www.cian.ru/>.
- [5] Сервис "Domofond.ru" [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://www.domofond.ru/>.
- [6] Статья в сборнике тезисов (материалов) конференции: Кайзер М. Д., Кайзер Д. Д. Геокалькулятор для выбора мест проживания в городе Иваново // Тез. докл. (Материалы конференции). Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2014". Иваново: ФГБОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина", 2014. С. 201-203.
- [7] справочная библиотека ArcGIS [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://resources.arcgis.com/ru/help/>.
- [8] Пиньеде Фу Веб-ГИС: Принципы и применение [Текст]/ Пиньеде Фу, Цзюлинь Сунь.-Москва: Дата+, 2013. – 356 с.

References

- [1] Geoinformatika: Ucheb. dlja stud. vuzov [Geoinformatics: Textbook for universities]/ E.G.Kapralov, A. V. Koshkarev, V. S. Tikunov i dr.; Pod red. V. S.Tikunova. – M: Izdatel'skij centr «Akademija», 2005. – 480 s, [8] s. cv. il.: il. (Klassicheskij universitetskij uchebnyk).
- [2] Karta Moskvy: ulicy, doma i organizacii goroda[Moscow map: streets, houses and organizations of the city] [Jelektronnyj resurs]: - Rezhim dostupa: <http://2gis.ru/moscow>.
- [3] Portal nedvizhimosti Sankt-Peterburga, Moskvy, ih oblastej, Krasnodarskogo kraja [Portal of real estate of St. Petersburg, Moscow, their areas, Krasnodar Krai] [Jelektronnyj resurs]: - Rezhim dostupa: <http://www.restate.ru/map>.
- [4] Servis "CIAN" [Jelektronnyj resurs]: - Rezhim dostupa: <http://www.cian.ru/>.
- [5] Servis "Domofond.ru" [Jelektronnyj resurs]: - Rezhim dostupa: <http://www.domofond.ru/>.
- [6] Stat'ja v sbornike tezisov (materialov) konferencii: Kajzer M. D., Kajzer D. D. Geokal'kuljator dlja vybora mest prozhivanija v gorode Ivanove [Geocalculator for a choice of the accommodation in the city of Ivanovo] // Tez. dokl. (Materialy konferencii). Devjataja mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija studentov, aspirantov i molodyh uchenyh "Jenergija-2014". Ivanovo: FGBOU VPO "Ivanovskij gosudarstvennyj jenergeticheskij universitet im. V. I. Lenina", 2014. pp. 201-203.
- [7] Spravochnaja biblioteka ArcGIS [Reference library ArcGIS] [Jelektronnyj resurs]: - Rezhim dostupa: <http://resources.arcgis.com/ru/help/>.
- [8] Pin'de Fu Veb-GIS: Principy i primenenie[Web GIS: Principles and applications] [Tekst]/ Pin'de Fu, Czjul'ni Sun'.-Moskva: Data+, 2013. – 356 pp.

Параллельное моделирование смешивания газовых потоков при поперечном взаимодействии

С.С. Бокарев

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»
Иваново, Россия
boksts@gmail.com

В работе реализована задача смешивания газовых потоков при поперечном взаимодействии. Приведена математическая модель с необходимыми начальными и граничными условиями, рассмотрены методы дискретизации задачи. Получены как численные результаты так и графическая визуализация на OpenGL. Разработаны свои параллельные реализации с использованием технологий OpenMP и CUDA. Проведены исследования, замеры времени, вычислено ускорение параллельных реализаций по сравнению с последовательными.

Ключевые слова — гидродинамика; система «вихрь – функция тока»; уравнение Гельмгольца; уравнение Пуассона; противоточные производные; метод Якоби; OpenMP; CUDA.

Parallel modeling of mixing gas flows transverse interaction

Stanislav Bokarev

Ivanovo State Power Engineering University
Ivanovo, Russia
boksts@gmail.com

The work realized the task of mixing gas flows transverse interaction. A mathematical model with the necessary initial and boundary conditions, the methods sampling problem. Obtained as the numerical results and graphical visualization on OpenGL. Develop their parallel implementation using OpenMP technology and CUDA. The research, measurement time, calculated the acceleration of parallel implementations compared to sequential.

Keywords — hydrodynamics; system «vortex - stream function»; Helmholtz equation; Poisson equation; countercurrent derivatives; Jacobi method; OpenMP; CUDA.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время гидродинамика, изучающая процессы течения жидкостей и газов, получает все более широкое распространение и практическое применение при решении различных задач энергетики, науки и промышленности. Для исследования такого рода задач используют три основных подхода:

- Получение аналитических решений;
- Физический эксперимент;
- Использование численных методов;

Аналитические решения представляют собой сложную процедуру и получены лишь для простых задач. Физический эксперимент используется для того чтобы определить правильность численных решений и применяется в редких случаях при решении отдельных

моментов задачи, т.к. является достаточно затратным. Однако при решении больших и сложных систем получение оптимальных и адекватных результатов немислимо без использования численных методов (вычислительной гидродинамики), которые благодаря интенсивному росту производительности вычислительной техники могут существенно ускорить процесс моделирования таких систем.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Имеется сосуд, через который распространяется газ. Сосуд имеет два приточных отверстия и одно вытяжное. Одно приточное отверстие находится слева по всей высоте сосуда, другое снизу и занимает 20% от длины сосуда. Вытяжное отверстие располагается справа по всей высоте сосуда. Начальные скорости движения газов в отверстиях заданы по параболическому профилю. Задача двумерная "Рис. 1".

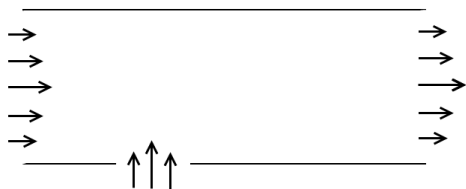


Рис. 1. Графическое представление постановки задачи.

Необходимо построить адекватную и оптимальную модель смешивания газовых потоков, после чего распараллелить вычисления, используя технологии параллельного программирования, с целью обседа большой расчетной области.

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Чтобы построить компьютерную модель смешивания газовых потоков необходимо сначала построить математическую модель. Для решения данной задачи применяется два вида математических моделей, которые представляют собой системы дифференциальных уравнений в частных производных, дополненные начальными и граничными условиями:

- Система ω - ψ («вихрь – функция тока»);
- Система P-U («давление – скорость»).

Рассмотрим систему ω - ψ :

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_x \frac{\partial \omega}{\partial x} + u_y \frac{\partial \omega}{\partial y} = g \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega; \quad (2)$$

$$u_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, u_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}; \quad (3)$$

где, ω – вихрь; ψ – функция тока; u_x, u_y – скорости по осям x и y ; x, y – координаты, t – время, g – вязкость

Данная система состоит из трех дифференциальных уравнений в частных производных. Уравнение (1) – уравнение Гельмгольца, (2) – уравнение Пуассона, (3) – уравнения составляющих скорости по координатным осям.

Первым решается уравнение Гельмгольца, которое позволяет отыскать значения вихря в точках расчетной области. Затем решается уравнение Пуассона, устанавливая поле функции тока. И наконец по известным функциям тока находятся искомые составляющие скорости по координатным осям. Данный процесс повторяется некоторое количество шагов по времени, пока не перестанет изменяться скорость с учетом требуемой точности.

Для полноты системы требуются начальные и граничные условия.

Существует большое разнообразие граничных и начальных условий применительно к данной

математической модели. Рассмотрим те, которые были использованы при решении данной задачи "Рис. 2".

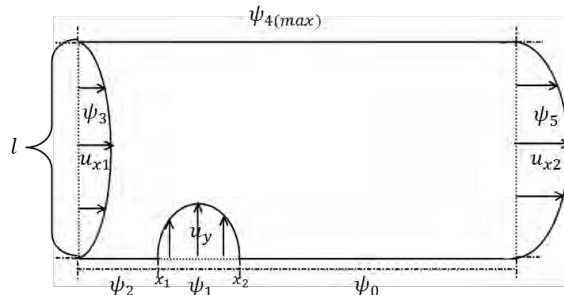


Рис. 2. Граничные условия.

Внутри расчетной области: $u_x = 0, u_y = 0, \psi = 0, \omega = 0$;

Границы для скоростей:

- на твердых стенках:

$$u_x|_r = 0, u_y|_r = 0; \quad (4)$$

- в приточных и вытяжном отверстиях задаем параболический профиль, используя следующие формулы:

$$u_{x1}|_r = \frac{4 * u_x^{max} * y * (l - y)}{l^2} \quad (5)$$

$$u_{x2}|_r = \frac{4 * (u_x^{max} * y + u_y^{max} * l) * y * (l - y)}{l^3} \quad (6)$$

$$u_y|_r = \frac{4 * u_y^{max} * (x - x1) * (x2 - x)}{(x2 - x1)^2} \quad (7)$$

где, u_{x1} – скорость на входе слева, u_{x2} – скорость на выходе справа, u_y – скорость на входе снизу, u_x^{max} и u_y^{max} – максимальные значения скоростей на входе, $x1$ и $x2$ – размеры приточного отверстия снизу, l – высота сосуда.

Границы для функции тока: функция тока считается исходя из скоростей на границах и растет от минимального (нулевого) значения на нижней границе до максимального значения на верхней. Затем на границе справа убывает с максимального значения до минимального.

$$\begin{aligned} \psi_0|_r &= 0, \psi_1|_r = \psi_0 - \int_{x1}^{x2} u_y dx, \psi_2|_r = \psi_1, \\ \psi_3|_r &= \psi_2 + \int_0^l u_{x1} dy, \psi_4(max)|_r = \psi_3, \\ \psi_5|_r &= \psi_4 - \int_l^0 u_{x2} dy \end{aligned} \quad (8)$$

Границы для вихря: значения на границах, в отличие от предыдущих составляющих системы, пересчитываются по ходу расчета (с каждым шагом по времени, как и внутри расчетной области (уравнение Гельмгольца)). Для горизонтальной и вертикальной стенки:

$$\omega|_{\Gamma} = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - \text{для горизонтальной стенки} \quad (9)$$

$$\omega|_{\Gamma} = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \text{для вертикальной стенки} \quad (10)$$

IV. ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ

Для решения данной системы дифференциальных уравнений воспользуемся методом сеток. На расчетную область накладывается сетка с ячейками размером $h \times h$ "Рис.3".

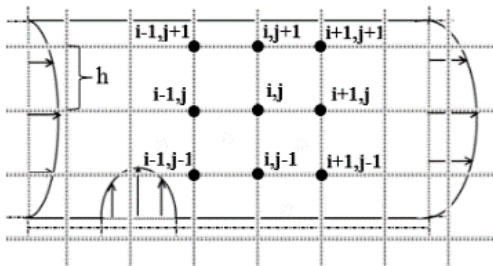


Рис. 3. Наложение сетки на расчетную область.

В таком случае составим разностные схемы для исходных уравнений согласно методам, которые позволяют их решить.

Уравнение Гельмгольца будем решать с помощью противоточных производных, которые обеспечивают хорошую устойчивость вычислений. Противоточные производные будут нами использованы при вычислении конвективных составляющих данного уравнения:

$$u_x \frac{\partial \omega}{\partial x} \Rightarrow \begin{cases} u_{x,i,j} \frac{\omega_{i,j} - \omega_{i-1,j}}{h}, u_{x,i,j} \geq 0; \\ u_{x,i,j} \frac{\omega_{i+1,j} - \omega_{i,j}}{h}, u_{x,i,j} < 0. \end{cases} \quad (11)$$

где, i, j – координаты узла расчетной области, h – размер ячейки.

При таком способе учитывается направление скорости, что позволяет вычислить производные как бы в будущий момент времени, что в итоге повышает устойчивость. На практике часто использую компактную форму записи, что позволяет избежать условий.

Уравнение Пуассона решаем с помощью метода Якоби, который обеспечивает неплохую сходимость и не сложен в реализации. Уравнение Пуассона решается до установления поля функции тока на всей расчетной области, т.е. когда разница между соседними узлами не будет превышать допустимую погрешность.

Составляющие скорости вычисляются исходя из значений функции тока. Чтобы повысить точность при их вычислении воспользуемся четырехточечным шаблоном. Формула (10) используется при вычислении скоростей в горизонтальном срезе сосуда:

$$U_{x,ij} = \frac{\Psi_{i+1,j+1} + \Psi_{i-1,j+1} - \Psi_{i+1,j-1} - \Psi_{i-1,j-1}}{4 \cdot h} \quad (12)$$

$$i = 2, 3, \dots, n-1; j = 2, 3, \dots, m-1$$

где, n и m – размеры поля.

V. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НА OPENGL

Чтобы убедиться в адекватности полученных результатов, была сделана графическая визуализация процесса смешивания газовых потоков в сосуде. Для плавности анимации использовалась библиотека OpenGL (Open Graphics Library). На "Рис. 4" представлен заключительный этап анимации, стрелки показывают скорости движения потоков и их направление.

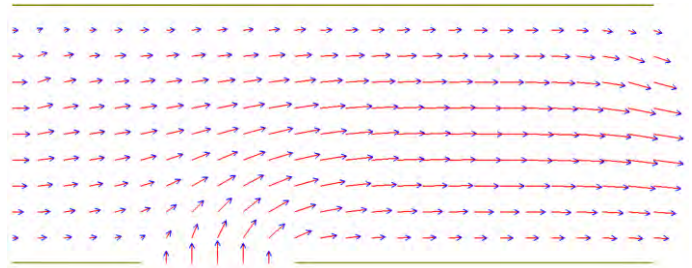


Рис. 4. Графическое представление результата работы программы.

VI. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ

A. OpenMP (Open Multi-Processing)

С помощью данной технологии были распараллелены вычислительные циклы по строкам расчетной области, таким образом, что итерации разделяются на приблизительно равные части (по физическому числу нитей – процессорных ядер), где каждая нить обчисляет свою часть (строки) параллельно с другими нитями.

B. CUDA (Compute Unified Device Architecture)

Блочная сеточная архитектура и концепция SIMD (Single Instruction Multiple Data), позволяют закрепить каждую нить (thread) за своей точкой расчетной области. В связи с тем, что данная технология не подразумевает синхронизацию нитей ядра непосредственно в самом ядре, разобьем нашу задачу на три друг от друга зависимые подзадачи, каждую из которых закрепим за своим вычислительным ядром. Таким образом, скопировав один раз необходимые данные на устройство – GPU (Graphics Processing Unit), запускаем вычислительный цикл, где: первое ядро (kernel_1) вычисляет граничные условия для вихря и решает уравнение Гельмгольца, затем второе ядро (kernel_2) решает уравнение Пуассона до установления поля функции тока, и, наконец, третье ядро (kernel_3) вычисляет итоговые скорости. После окончания вычислительного цикла по времени копируем полученные результаты (скорости) с видеокарты на хост. На "Рис. 5" t – время, τ – шаг по времени, t_{max} – максимальное время, pr – признак достижения точности.

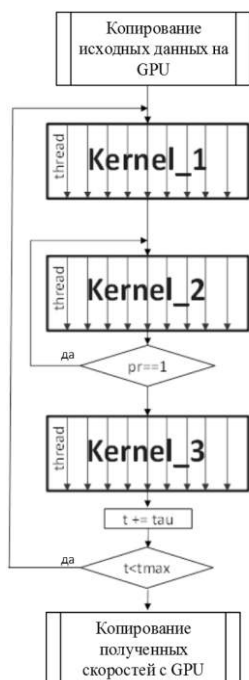


Рис. 5. Блок-схема параллельного варианта на CUDA.

VII. НАГРУЗОЧНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ

Чтобы оценить эффективность параллельных алгоритмов, проводим вычислительный эксперимент, запуская последовательную реализацию и параллельные на разных размерах расчетной области. В результате чего получаем графики зависимости времени вычисления от размеров расчетной области (размер ячейки $h=0.01$) для каждого варианта программы "Рис. 6". Характеристики системы: CPU (Central Processing Unit) - Intel Core i5-3337U, GPU - NVIDIA GeForce GT 750M.

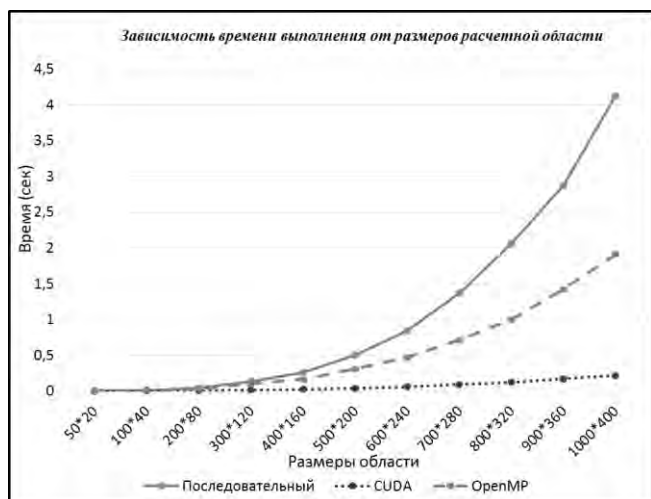


Рис. 6. Графики производительности последовательного и параллельных алгоритмов.

Как видно из полученных графиков, ускорения параллельных вариантов удается достичь уже на достаточно малых размерах расчетной области, а с увеличением ее размеров ускорение растет еще большими

темпами, причем наилучшие результаты показывает технология CUDA.

VIII. ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАБОТЫ

Таким образом построенная компьютерная модель отражает реальную модель (согласно визуализации), а, используя технологии OpenMP и CUDA, удалось достичь ускорения вычислений с увеличением размеров расчетной области, в особенности на CUDA.

В перспективе:

- Решение задачи в системе «давление – скорость»;
- Использование более эффективных методов решения уравнений (для уравнения Пуассона – метод Ричардсона, Дугласа и FACR, для уравнения Гельмгольца – схема Белоцерковского и Дюфорта-Франкеля);
- Усложнение поставленной задачи за счет моделей турбулентной вязкости и поля температур;
- Реализация на технологии MPI.

Список литературы

- [1] Балаев Э.Ф. и др. Численные методы и параллельные вычисления для задач механики жидкости, газа и плазмы. Учеб. пособие; ГОУВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина». –Иваново, 2003 – 336с.
- [2] Бокарев С.С. Параллельное моделирование смешивания газовых потоков при поперечном взаимодействии. С. 129-130. //Десятая международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия 2015»: материалы конференции. В 7 т. Т. 5 – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2015. – с.230
- [3] Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA: Учеб. пособие /А.В. Боресков и др. – М.: Издательство Московского университета, 2012. -336 с.
- [4] Филатов Е. Ю., Ясинский Ф.Н. Математическое моделирование течений жидкостей и газов: Учеб. пособие / ГОУВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина». – Иваново, 2007. – 84 с.

References

- [1] Balaev, Je.F., Nuzhdin, N.V., Pekunov, V.V., Sidorov, S.G., Chernysheva, L.P., Jasinskij, I.F., Jasinskij, F.N. *Chislennyye metody i parallel'nye vychisleniya dlya zadach mehaniki zhidkosti, gaza i plazmy* [Numerical methods and parallel computing to problems in the mechanics of liquid, gas and plasma.], Ivanovo: ISPEU, 2003, 336 pp.
- [2] Bokarev, S.S. *Parallel'noe modelirovanie smeshivaniya gazovyh potokov pri poperechnom vzaimodejstvii*, pp. 129-130 [Parallel modeling of mixing gas flows transverse interaction], in *Desjataja mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija studentov, aspirantov i molodyh uchenyh «Jenergija 2015»: materialy konferencii*, Ivanovo: ISPEU, 2015, 230 pp.
- [3] Borekov, A.V., Harlamov, A.A., Markovskij, N.D., Mikushin, D.N., Mortikov, E.V., Myl'cev, A.A., Saharnyh, N.A., Frolov, V.A. *Parallel'nye vychisleniya na GPU. Arhitektura i programmnaja model' CUDA* [Parallel computing on the GPU. Architecture and CUDA programming model], Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2012, 336 pp.
- [4] Filatov, E. Ju., Jasinskij, F.N. *Matematicheskoe modelirovanie techenij zhidkostej i gazov* [Mathematical modeling of flows of liquids and gases], Ivanovo: ISPEU, 2007, 84 pp.

Поиск безусловного экстремума функции методом тяжелого шарика с использованием параллельных технологий.

А.А. Гудухина
ФГБОУ ВПУ «ИГЭУ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»
Иваново, Россия

Аннотация: В работе реализован поиск безусловного экстремума методом тяжелого шарика. Приведен алгоритм реализации данной задачи. Разработана своя параллельная реализация с помощью технологии CUDA. Приведены исследования эффективности метода при разной форме целевой функции, а так же замеры времени; продемонстрировано преимущество параллельной реализации по сравнению с последовательной; сделан анализ полученных результатов.

Ключевые слова: поиск экстремума, метод тяжелого шарика, технология CUDA, параллельный алгоритм.

Search of unconditional extremum of a function by heavy ball method using parallel technologies.

A.A. Gudukhina
Ivanovo State Power Engineering University
Ivanovo, Russia

Abstract: the paper describes the search of unconditional extremum by heavy ball method. The problem solution algorithm is given. The author developed her own parallel implementation using CUDA technology. Research into the method effectiveness for various forms of the target function as well as time measurements are presented; advantages of parallel implementation compared to the gradual one are demonstrated; analysis of results is made.

Keywords: extremum search, heavy ball method, CUDA technology, parallel algorithm.

1. ВВЕДЕНИЕ

Существующие задачи оптимального проектирования объектов и технологических процессах промышленного производства, энергетики, оптимизация процессов управления, и другие определяют высокую актуальность и практическую значимость многомерных задач многоэкстремального нелинейного программирования, искомым решением которых является глобальный экстремум (минимум или максимум). Подобные задачи обладают высокой трудоемкостью численного анализа. Именно поэтому в данной работе будет рассматриваться решение задачи при помощи параллельных технологий.

Задачи отыскания экстремумов в многомерном случае существенно осложняются. Функция $F(X)$ может иметь сложную форму. Для графической интерпретации поверхности принято изображать ее с помощью линий уровня. Линия уровня – это кривая в 2-х мерном сечении пространства параметров, значение функции, на которой есть константа. Поверхность, соответствующая

зависимости $F(X)$, может иметь: «овраги» или «гребни» (поверхности уровня имеют структуру, сильно отличающуюся от сферической), «плато» (плоские горизонтальные участки), особые точки типа «седло». Это не имеет себе аналогий в классе одномерных функций. Если в одномерном случае имеется только два возможных направления поиска, то в многомерном – таких направлений может быть бесконечно много. В связи с этим центральной проблемой поиска экстремума многомерной функции является проблема выбора направления поиска. Переменные x_1, x_2, \dots, x_n могут быть взаимосвязаны. В многомерном случае область допустимых значений имеет бесчисленное множество форм.

Все перечисленные проблемы делают неэффективными стандартные методы поиска глобального экстремума (метод наискорейшего спуска, метод покоординатного поиска и др.). Частично эту проблему можно решить повторением известных алгоритмов из различных начальных положений поиска,

однако это не дает хороших результатов. Разработано несколько методов, способных не только искать глобальный экстремум, но и выбираться из локальных экстремумов. Самым известными являются: метод случайного поиска, метод тяжелого шарика, генетический поиск. В данной работе представлен метод тяжелого шарика как решение проблемы многоэкстремальности функции.

II. МЕТОД ТЯЖЕЛОГО ШАРИКА

Метод тяжелого шарика подходит для целевых функций, с «неглубокими» локальными минимумами. Идея использования метода тяжелого шарика основана на физической интерпретации процесса. Если достаточно тяжелый шарик катится по наклонной поверхности, он проскакивает небольшие впадины по инерции. Он остановится в самой «глубокой» впадине. Формула (1) - закон движения шарика, где m – масса шарика, V – скорость шарика, $f(x)$ – исследуемая функция, b – коэффициент трения.

$$m \cdot \frac{dV}{dt} = -gradf(x) - b \cdot \bar{V} = \bar{F} \quad (1)$$

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целевая функция имеет вид:

$$f(x_1, x_2) = \frac{x_1^2}{A_1} + \frac{x_2^2}{A_2} + \sum_k (A_k \cdot \sin(\omega_1 \cdot x_1) \cdot \sin(\omega_2 \cdot x_2)) \quad (2)$$

Данная функция имеет форму параболы с малыми коэффициентами (рис. 1), однако, с изменением A_i ($i = 0, 1, \dots, k$), ω_1, ω_2 кривая будет приобретать более сложную форму (рис. 2).

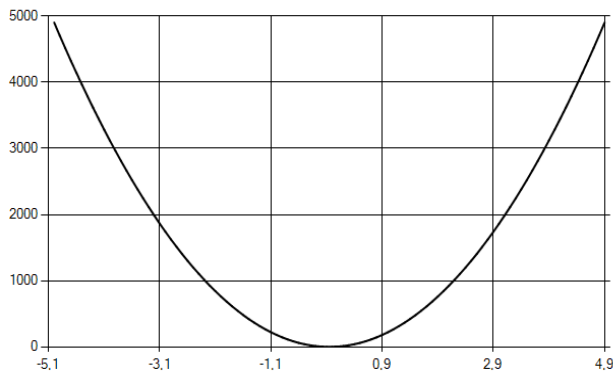


Рис. 1. График целевой функции при коэффициентах $\omega_1 = \omega_2 = 1, A_i = 0.01; (i = 0, 1, \dots, k)$

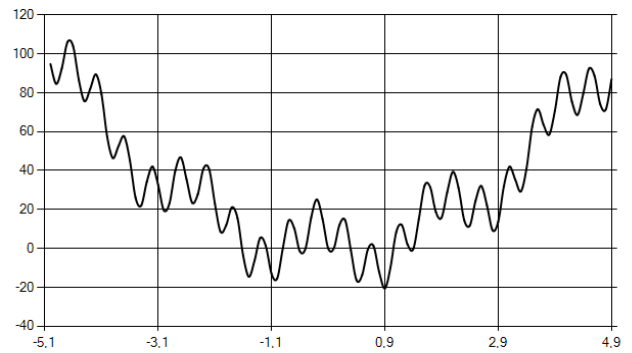


Рис. 2. График целевой функции при коэффициентах $\omega_1 = 5, \omega_2 = 8, A_i = 0.5; (i = 0, 1, \dots, k)$

IV. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО МИНИМУМА

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 3.

Алгоритм:

1. Задаются произвольные начальные координаты шарика.
2. Скорость шарика задается равной нулю.
3. Начинается новая итерация уточнения минимума функции. Количество итераций уточнения определяется пользователем в зависимости от размера области, на которой распределяются начальные координаты шариков. Если известно хорошее приближение, то количество таких итераций может быть небольшим. Если же нет, то экспериментальным образом определяется необходимое количество итераций. Экспериментально установлено, что для данной функции необходимое количество уточнений от трех до шести.
4. Вычисляются координаты градиента в указанной точке разностным методом по формуле (3).

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x_1} = \frac{f(x_1 + h, x_2) - f(x_1, x_2)}{h} \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} = \frac{f(x_1, x_2 + h) - f(x_1, x_2)}{h} \end{cases} \quad (3)$$

5. Вычисляется новый вектор скорости шарика по формуле (4).

$$\begin{cases} V_1^{k+1} = V_1^k + \tau \cdot \left(-\frac{\partial f}{\partial x_1} - b \cdot V_1^k \right) \\ V_2^{k+1} = V_2^k + \tau \cdot \left(-\frac{\partial f}{\partial x_2} - b \cdot V_2^k \right) \end{cases} \quad (4)$$

6. Вычисляется новый вектор координат шарика по формуле (5).

$$\begin{cases} x_1^{k+1} = x_1^k + \tau \cdot V_1^k \\ x_2^{k+1} = x_2^k + \tau \cdot V_2^k \end{cases} \quad (5)$$

7. Если значение целевой функции в новой точке меньше, чем в предыдущей, то выполняется переход к пункту 2, иначе – переход на следующую итерацию уточнения минимума - пункт 3.



Рис. 3. Блок-схема части алгоритма нахождения глобального минимума

V. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО МИНИМУМА

Воспользуемся технологией CUDA, чтобы распараллелить данный процесс и добиться максимальной скорости нахождения безусловного минимума целевой функции. Данная технология позволит нам запускать расчеты сразу для множества шариков. Каждая нить мультипроцессора будет рассчитывать минимум только для одного шарика, и все нити будут действовать параллельно на устройстве. После завершения расчетов на устройстве на хосте из локальных минимумов выбирается глобальный. На рис. 4 изображен график, который показывает преимущество параллельного алгоритма над последовательным. По вертикальной оси отмеряется время в секундах, затраченное на расчеты, а по горизонтальной – количество запущенных шариков. С ростом числа шариков выгода по времени становится значительнее.

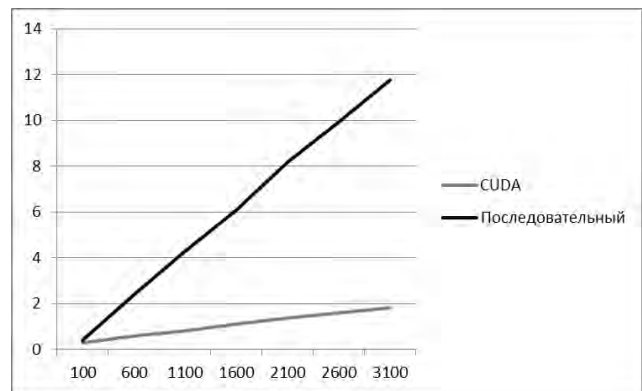


Рис. 4. График зависимости временных затрат на вычисления в зависимости от количества шариков

VI. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дальнейшее исследование данного метода нахождения глобального минимума показало, что существует две важные проблемы, связанные с его поиском.

Чтобы получить адекватные результаты расчетов необходимо исследовать целевую функцию, и как можно более точно определить область, где находится глобальный минимум. На рис. 5 продемонстрирован график, который показывает, с какой вероятностью (в %) шарик попадет в безусловный минимум, если начальные координаты будут находиться в разных диапазонах. Без хорошего приближения вероятность может быть меньше 1%. Однако, на времени нахождения минимума для каждого шарика (глобального или локального) размер рассматриваемой области не влияет.

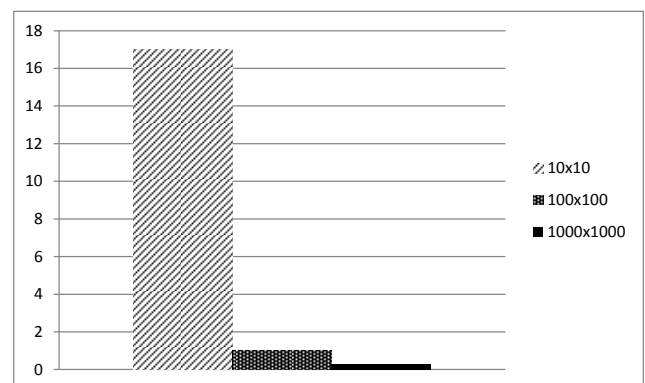


Рис. 5. График зависимости шанса (в процентах) нахождения безусловного минимума от размера начального поискового диапазона

На шансы нахождения глобального минимума влияют коэффициент b в формуле (1), а так же форма самой целевой функции. В рассматриваемом примере по формуле (2) она зависит от коэффициентов ω_1 , ω_2 и A_i ($i = 0, \dots, k$). Для данной целевой функции экспериментально установлено, что наилучшие результаты получаются при коэффициенте b равном 0,1. При ω_1 и ω_2 равным единицам всегда получается результат, близкий к глобальному минимуму (с точностью до двенадцатого порядка). Однако с изменением этих коэффициентов шансы шарика выбраться из локальных минимумов падают. На рис. 6 продемонстрирован график изменения

шанса попадания шарика в безусловный минимум при различных коэффициентах ω_1 и ω_2 .

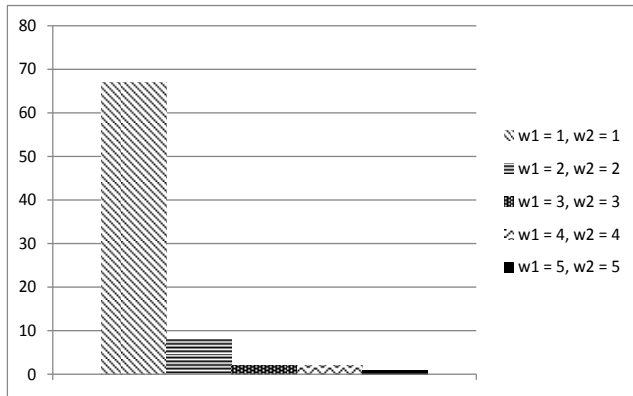


Рис. 6. График зависимости шанса (в процентах) нахождения безусловного минимума от формы целевой функции

Рассмотрим, как ведут себя шарики при различной форме целевой функции. Выберем четыре различных набора коэффициентов для функции и в каждом случае запустим десять шариков. На рис. 7 функция имеет коэффициенты $\omega_1 = 1, \omega_2 = 1, A_i = 0.2, (i = 0, \dots, k)$. В данном случае видно, что ничего не мешает шарикам определиться с направлением поиска глобального минимума. Каждый, вне зависимости от начального положения, достаточно легко нашел искомую точку.

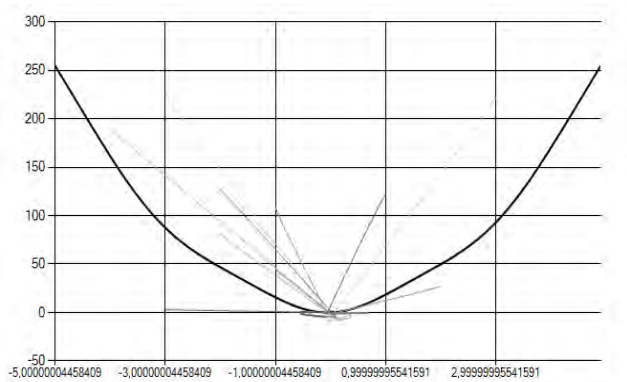


Рис. 7. Функция при коэффициентах $\omega_1 = 1, \omega_2 = 1, A_i = 0.2, (i = 0, \dots, k)$

Попробуем усложнить параметры ω_1, ω_2 и A_i , и получим картину, представленную на рис. 8. С функциями подобного вида метод тяжелого шарика уже не справляется. Некоторые шарики даже не смогли определиться, в какую сторону им двигаться, и остались на месте.

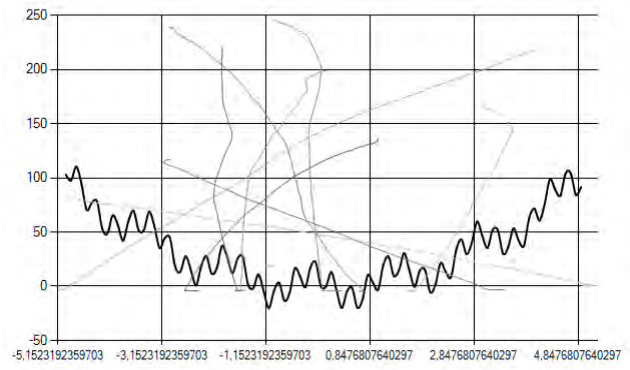


Рис. 8. Функция при коэффициентах $\omega_1 = 7, \omega_2 = 11, A_i = 0.5 + i \cdot 0.01, (i = 0, \dots, k)$

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрим достоинства и недостатки метода.

Достоинствами можно считать:

1. Высокая эффективность метода вдали от оптимума.
2. Возможность "проскока" мелких локальных "ямок" (минимумов) за счет "инерционности шарика".

Недостатки метода тяжелого шарика:

1. Возможно колебание вокруг точки оптимальности в районе оптимума.
2. Задание одновременно двух неформальных параметров, влияющих на эффективность поиска (масса шарика m и коэффициент трения b), которые для каждой функции следует подбирать индивидуально.
3. При наличии глубоких локальных минимумов шарик не сможет выбраться из них.

Так же, в данной работе рассмотрена эффективность работы параллельных технологий в данной проблемной области.

Список литературы

- [1] Асламова В.С. Автоматизация технологических процессов. – Ангарск: АГТА, 2005.
- [2] Боресков А.В. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA. – Москва: Издательство Московского Университета – 2012.
- [3] Стронгин Р.Г. Параллельные вычисления в задачах глобальной оптимизации. – Москва: Издательство Московского Университета – 2013.

References

- [1] Aslamova V.S. Automation of technological processes. – Angarsk, ASTA, 2005.
- [2] Boreskov A.V. Parallel computing on GPU. CUDA architecture and programming model. – Moscow: Publishing House of Moscow University – 2012.
- [3] Strongin R.G. Parallel computing in global optimization problems. – Moscow: Publishing House of Moscow University – 2013.

Особенности реализации модифицированного топологического метода для определения показателей надежности технических систем

М.А. Лобанов
ИГЭУ
Россия, Иваново

Объект исследования: методы определения показателей надежности, алгоритмы их реализации.

В статье рассматриваются вопросы разработки алгоритма определения показателей надежности с помощью модифицированного топологического метода и его реализации в программном комплексе для автоматизации расчетов показателей надежности технических систем.

В работе проведен краткий анализ методов оценки надежности технических систем. Для исследования выбрано два метода: первый основан на теории Марковских процессов, а второй является эффективным развитием классического топологического метода.

В программном продукте осуществлена реализация алгоритмов расчета показателей надежности с помощью вышеописанных методов. Тестирование программного комплекса при расчетах показателей надежности реальных технических систем показало его работоспособность, а также подтвердило эффективность выбранных методов оценки надежности.

Ключевые слова: ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ, ГРАФ ПЕРЕХОДОВ И СОСТОЯНИЙ, ТЕОРИЯ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ, ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД, ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.

Especially the implementation of the modified topological methods for determining indicators of reliability of technical systems

M.A. Lobanov
ISPU
Russia, Ivanovo

The object of research: the methods of determining the reliability, algorithms for their implementation. This article discusses the development of the algorithm for determining reliability indicators using a modified topological method and its implementation in the software package to automate the calculations of indicators of reliability of technical systems. In the brief analysis of methods for assessing the reliability of technical systems. Two methods were selected: the first is based on the theory of Markov processes, and the second is the development of an effective classical topological methods. In the software product implementation of algorithms for calculating indices of reliability by using the methods described above was performed. Testing of software in the calculation of reliability indices of real technical systems showed its efficiency and confirmed the efficacy of selected methods for assessing reliability.

Keywords — reliability of systems, a topological method, the graph, algorithm, Markov processes.

1. ВВЕДЕНИЕ

В целом задача определения показателей надежности технических систем достаточно известна и весьма проработана. В научной литературе предлагаются различные способы решения этой задачи (логико-вероятностные методы, топологические методы, методы статистического моделирования, методы, основанные на теории Марковских процессов и др.) [2]. Применение большинства из них вызывает трудности, если необходимо оценить надежность сложной системы, характеризующейся большим количеством возможных состояний. В силу этого разработка новых методов и их реализация представляется весьма актуальной.

Для исследования был выбран модифицированный топологический метод [3], который является эффективным развитием классического топологического метода. Реализуемый метод использует граф переходов и состояний системы.

Граф переходов и состояний представляет собой граф, в котором вершины определяют все возможные состояния системы, а ребра – возможные переходы из одного состояния в другое, веса ребер соответствуют интенсивностям этих переходов

II. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД

Модифицированный топологический метод основан на классическом топологическом методе. В топологическом методе [2] для расчета финальных вероятностей

нахождения системы в каждом из состояний используется следующая формула:

$$P^{(i)} = \frac{B_{mi}}{\sum_{i=1}^n B_{mi}}, \quad (1)$$

где n – число узлов графа, B_{mi} – произведение интенсивностей переходов из всех крайних свободных узлов в узел, соответствующий i -му состоянию системы, при перемещении в направлении стрелок.

Для систем, у которых граф переходов и состояний представляет собой «дерево», коэффициенты B_{mi} определяются однозначно для каждого узла, а в случае с многосвязным графом возможны различные варианты. Классический топологический метод предполагает разбиение такого графа на подграфы типа «дерево», вычисление B_{mi} и подстановку этих значений в формулу для вычисления финальных вероятностей.

В модифицированном топологическом методе предложено правило, согласно которому следует отдавать предпочтение тому пути, первое ребро по направлению которого имеет больший коэффициент, по найденным путям вычисляется B_{mi} . Благодаря данному правилу, не требуется разбивать граф на подграфы. Пример выбора «правильных» путей для одной из вершин приведен на рис. 1.

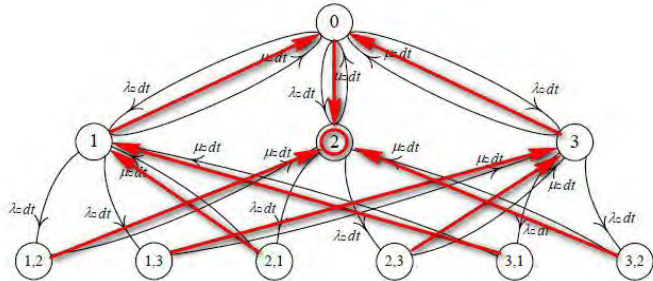


Рисунок 1. Модель правильных путей из всех вершин в вершину 2

Мы ищем «правильные» пути из всех вершин в вершину 2, двигаясь по направлению стрелок, как мы видим на этом графе, выбор путей не однозначен. К примеру, из вершины 3 в вершину 2 существует несколько путей: через вершину 0; через вершину 3,2; и через вершины 3,1 и 1; и выбор правильного пути следует осуществить в зависимости от коэффициентов, то есть выбирается ребро с наибольшим коэффициентом.

Поиск осуществляется не от всех вершин к конечной, как в исходном правиле, а от конечной ко всем остальным, двигаясь против направления стрелок. Чтобы найти «правильный» путь из одной вершины в другую, следует перебрать все возможные пути между этими вершинами, то есть найти «правильные» пути из первой вершины во все остальные вершины графа. Движение против стрелок позволяет просчитывать «правильные» пути для конкретной вершины и не хранить для всех остальных (рис. 2). Что весьма актуально для больших графов.

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 3.

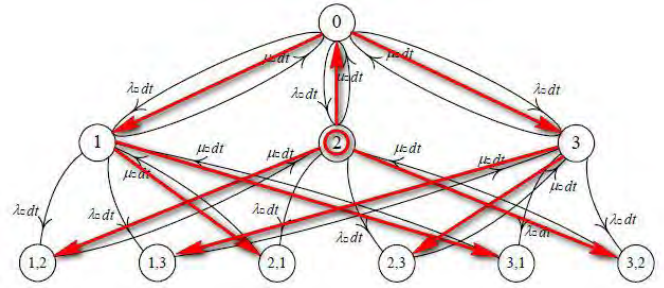


Рисунок 2. Модель правильных путей из вершины 2 во все остальные вершины

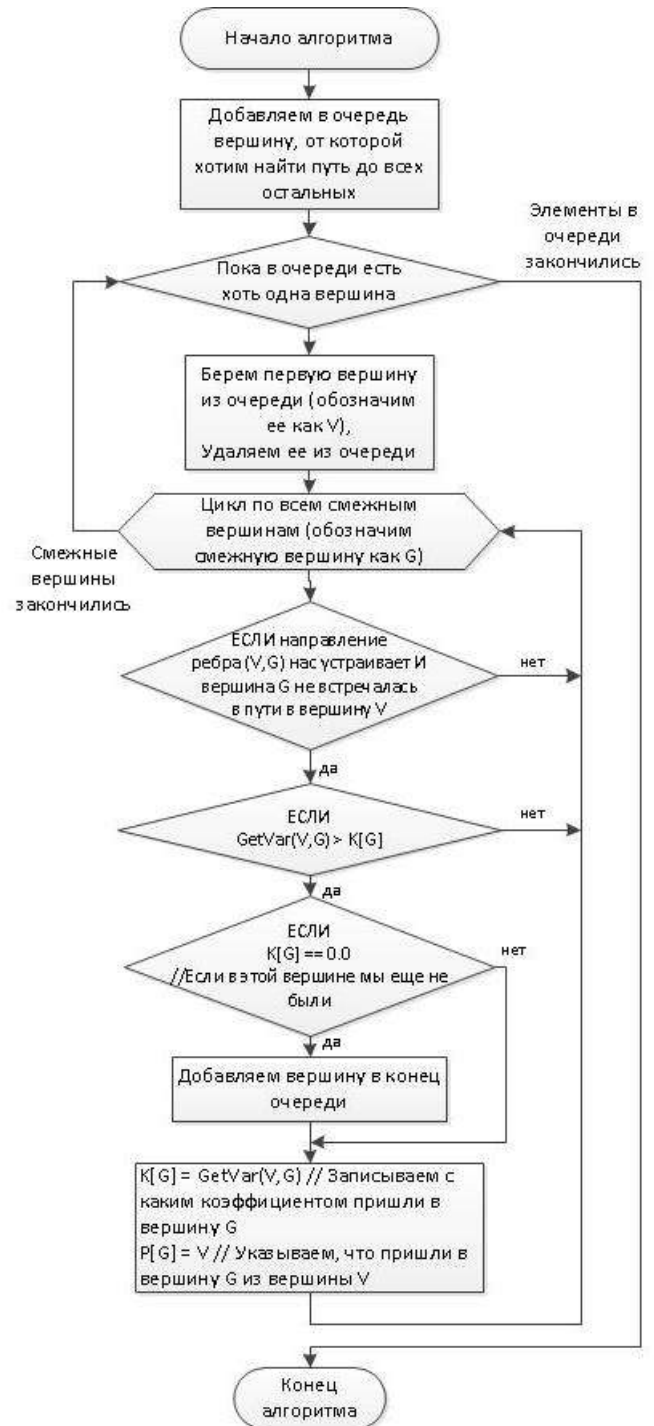


Рисунок 3. Алгоритм реализации модифицированного топологического метода

Одной из особенностей классического и модифицированного топологических методов является то, что произведения интенсивностей в больших системах с множеством состояний могут возрастать до значений, превышающих разрядную сетку стандартных типов данных, что может привести к потере точности. Для решения данной проблемы используется длинная арифметика для дробных чисел.

Для оценки этого метода и алгоритма был использован традиционный способ определения надежности систем с помощью метода Марковского моделирования.

III. МЕТОД МАРКОВСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Метод Марковского моделирования предполагает составление системы дифференциальных уравнений Колмогорова [2] с последующим её решением.

Система уравнений составляется по следующим правилам:

1. Число уравнений равно числу состояний, в которых может находиться система.
2. Производные искомой вероятности состояния равны сумме стольких слагаемых, сколько стрелок на графе состояний связано с этим состоянием.
3. Слагаемое имеет знак минус, если стрелка исходит из этого состояния, и плюс, если стрелка входит в это состояние.

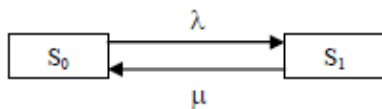


Рисунок 4. Пример простейшего графа переходов и состояний

Рассмотрим пример системы с двумя состояниями (рис. 4): работоспособном S_0 и не работоспособном S_1

Система уравнений для такого графа:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t) \end{cases}, \quad (2)$$

Система уравнений дополняется нормирующим условием

$$P_0(t) + P_1(t) = 1, \quad (3)$$

Решая данную систему уравнений, можно определить значения вероятностей нахождения системы в состояниях S_1 и S_0 .

Для решения системы уравнений используется метод Гаусса [1]:

На первом этапе путём элементарных преобразований над строками матрицы коэффициентов уравнений систему приводят к ступенчатой. На втором этапе осуществляется обратный ход, суть которого заключается в том, чтобы выразить в численном виде единственное решение системы линейных уравнений.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 5.

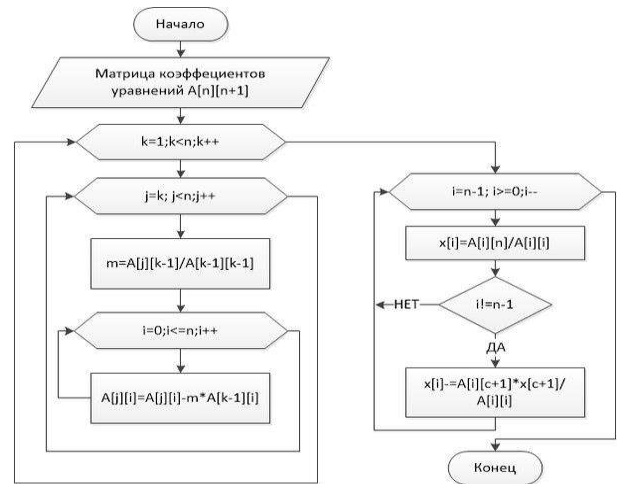


Рисунок 5. Алгоритм решения системы уравнений методом Гаусса

IV. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Описанные алгоритмы были реализованы в программном комплексе для автоматизации расчетов показателей надежности технических систем (DoRI_CL) [4].

Программный комплекс включает три модуля: модуль пользовательского интерфейса, модуль редактора графов и расчетный модуль. Структура комплекса и функции каждого модуля представлены на рис. 6.

Данный программный комплекс был разработан в среде Visual Studio 2013 на языке программирования C# [5].



Рисунок 6. Структура программного комплекса для расчета показателей надежности технических систем

Разработанная программа, главное окно которой показано на рис. 7, позволяет создавать математические модели реальных технических систем, сохранять их в файлы, загружать ранее созданные модели из файлов. Ее отличительной особенностью является программная реализация комплексного подхода к оценке надежности технических систем, описанных многосвязными графами переходов и состояний с использованием как

модифицированного топологического метода, так и теории Марковских процессов[3].

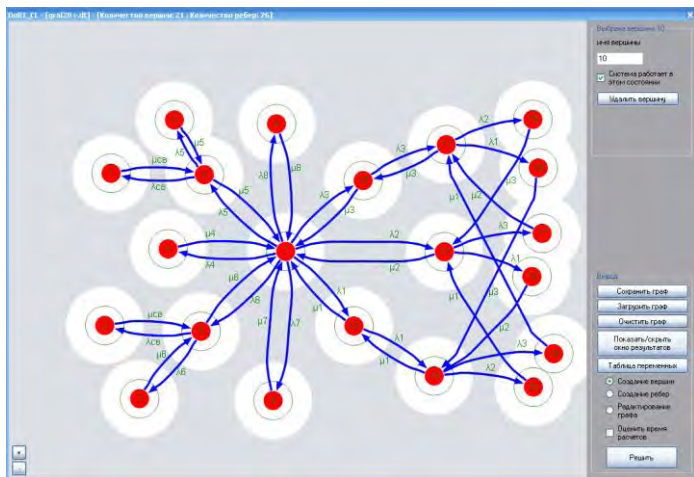


Рисунок 7. Главное окно программы

Результатами являются вероятности нахождения технической системы в каждом из состояний (рис. 8 и рис. 9). Так же для комплексной оценки рассчитываются коэффициент готовности и вероятность отказа элементов системы.

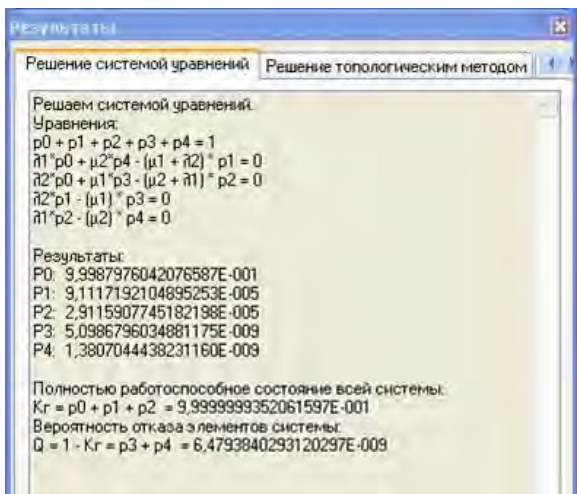


Рисунок 8. Пример результатов расчета методом Маркова

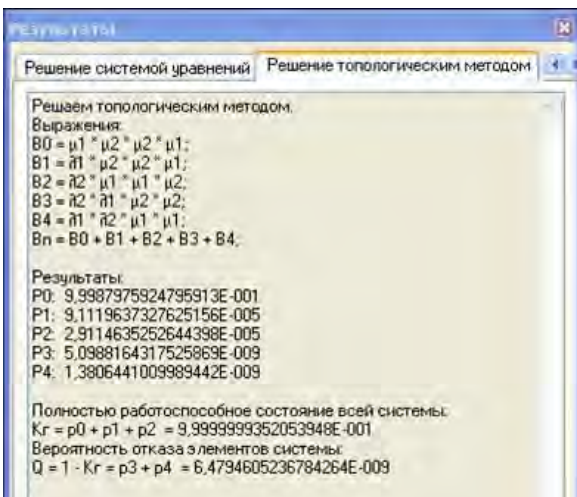


Рисунок 9. Пример результатов расчета модифицированным топологическим методом

V. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ

При сравнении метода Марковского моделирования и модифицированного топологического метода были получены следующие результаты: метод Марковского моделирования обеспечивает более высокую точность, но проигрывает модифицированному топологическому методу в быстродействии.

В связи с этим рекомендуется использовать модифицированный топологический метод, когда не принципиальна высокая точность вычисления, но требуется высокое быстродействие, что особенно актуально для сложных технических систем, которые описываются графами большой размерности.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм модифицированного топологического метода обеспечивает расчет показателей надежности с достаточно высокой точностью, что доказывает сравнение результатов, полученных двумя различными методами. При этом время расчета модифицированным топологическим методом значительно меньше чем методом Маркова. Созданный программный комплекс может быть использован для расчета показателей надежности любых технических систем, функционирование которых описывается графом переходов и состояний. Также его можно с успехом использовать в учебном процессе в качестве элемента лабораторного практикума при изучении дисциплин, связанных с теорией надежности.

В дальнейшем планируется расширить функционал программного комплекса за счет возможности осуществлять расчет большего количества показателей надежности.

Список литературы

1. **Калиткин Н.Н.** Численные методы / - М.: Академия, 2013. – 304с.
2. **Половко А. М., Гуров С. В.** Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп./ - СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 704с.
3. **Чекан Г.В.** Развитие топологического метода для комплексного подхода к определению показателей надежности технических систем // Вестник ИГЭУ / Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново.–2014.–Вып. 5. –С. 51-57.
4. **Чекан Г.В., Лобанов М.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: «Расчет показателей надежности технических систем» (DoRI_CL) №2015611559. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 января 2015 г.
5. **Шилдт Г.** Полный справочник по C# / - М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 752с.

References

- [1] Kalitkin N.N. Numerical methods / - M.: Academy, 2013. – p.304
- [2] Polovko A.M, Gurov S.V. Fundamentals of Reliability Theory. - 2nd ed., Rev. and ext. / - Spb.: BHV - St. Petersburg, 2006. – p.704
- [3] Chekan G.V. Topological method improvement as a part of the complex approach to determining reliability indexes of engineering systems // Ivanovo State Power University. - Ivanovo., 2014, vol. 5. p. 51-57.
- [4] Chekan G.V, Lobanov M.A. Certificate of state registration of the computer program "Calculation of reliability of technical systems" (DoRI_CL) №2015611559. Registered in Computer Program Register on January 30, 2015.
- [5] Herbert S. C# The Complete Reference, 4th Edition / - M.: Publishing House "Williams", 2004. – p.752

Разработка системы автоматической стабилизации температуры в нагревательной печи

О.В. Мозговая, И.А. Данилушкин
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия

Аннотация — В работе представлен синтез системы управления температурой с помощью метода пространства состояний. Проведена структурная и параметрическая идентификация модели объекта, синтезирован наблюдатель полного порядка, приведены результаты исследования полученного алгоритма на объекте.

Ключевые слова — пространство состояний, модальный регулятор, фильтр Калмана, широтно-импульсная модуляция

Development of the automatic system for temperature stabilization in the heating furnace

Ol'ga Mozgovaja, Ivan Danilushkin
Samara State Technical University
Samara, Russia

Abstract — The paper presents a synthesis of temperature control system using state-space method. Structural and parametric identification of the plant model is carried out. Full-order observer is synthesized. The results of testing the algorithm at real system are presented.

Keywords — state space, modal control, Kalman filter, pulse-width modulation

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные процессы обработки металла, предъявляют ряд требований к характеру процесса нагрева, влияющего на качество изделия при его дальнейшей обработке, температура выбирается такой, чтобы не произошел пережог либо перегрев. К показателям качества процесса нагрева можно отнести: перерегулирование; колебательность переходного процесса; длительность нагрева.

Зачастую применяется релейное управление, при котором нагревающий элемент либо включается, либо выключается. Это приводит к появлению автоколебаний около заданного значения в установившемся режиме. Колебательность обусловлена инерционной природой процесса нагрева, поэтому реакция на переключение управления происходит с некоторым временным запаздыванием. Повышение точности поддержания заданной температуры возможно за счёт перехода от дискретного управления к аналоговому. При этом реализация аналогового управления осуществляется за счёт широтно-импульсной модуляции управляющего сигнала.

II. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

Объектом управления является нагревательная установка. Нагрев осуществляется за счёт подачи напряжения на элемент сопротивления (рис. 1).

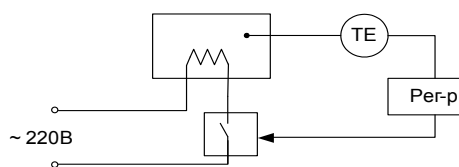


Рис. 1.

Для снятия экспериментальных данных объект был рассмотрен в режиме релейного управления, структурная схема представлена на рис. 2. На схеме приняты следующие обозначения: $r(t)$ – задающий сигнал; $e(t)$ – отклонение выходного сигнала от заданного на входе; $u(t)$ – управляющее воздействие; $y(t)$ – сигнал на выходе объекта. На рис. 3 представлен полученный график автоколебаний в установившемся режиме. Управляющий

сигнал принимает значения 0 или 1, на графике он смещён на 50 единиц вверх по оси ординат для наглядности.

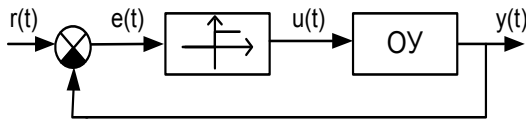


Рис. 2. структурная схема релейной системы

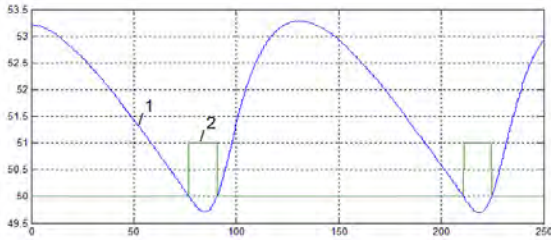


Рис. 3. 1 – выходной сигнал модели, 2 – управляющий сигнал

Структурная идентификация [1] была проведена путем анализа графического изображения переходной кривой и исходя из физических свойств процесса нагрева. В результате получено описание объекта в виде последовательного соединения двух апериодических звеньев первого порядка и звена запаздывания.

$$W_o = \frac{k \cdot e^{-\tau p}}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2) p + 1} \quad (1)$$

Методом параметрической идентификации [2] были определены численные параметры модели. В качестве критерия идентификации использован функционал качества, который представляет сумму абсолютных отклонений значений сигнала на выходе модели $y_M(t_j, q)$, $j=1,2,\dots,N$ от экспериментальных значений $y(t_j)$, $j=1,2,\dots,N$, полученных в те же моменты времени, N – размер выборки экспериментальных данных, q – параметры, подлежащие определению.

$$J(y, y_M, q) = \sum_{j=1}^N |e(t_j)| = \sum_{j=1}^N |y(t_j) - y_M(t_j, q)| \quad (2)$$

В результате идентификации получены следующие значения параметров: коэффициент усиления $k = 483,45$, постоянные времени $T_1 = 713,097$, $T_2 = 32,05$, время запаздывания $\tau = 4,2729$.

На рис. 4 представлен результат идентификации модели объекта. На графике цифрой 1 обозначен выходной сигнал объекта, цифрой 2 – выходной сигнал полученной модели.

Для преобразования найденной модели к виду пространства состояний необходима аппроксимация звена запаздывания. Одним из методов приближенной аппроксимации является представление звена запаздывания последовательным соединением n апериодических звеньев первого порядка с одинаковыми

постоянными времени $T = \frac{\tau}{n}$ [3]. С увеличением значения n точность возрастает.

$$W_3(p) = e^{-\tau p} \approx \left(\frac{\tau}{n} p + 1 \right)^{-n} \quad (3)$$

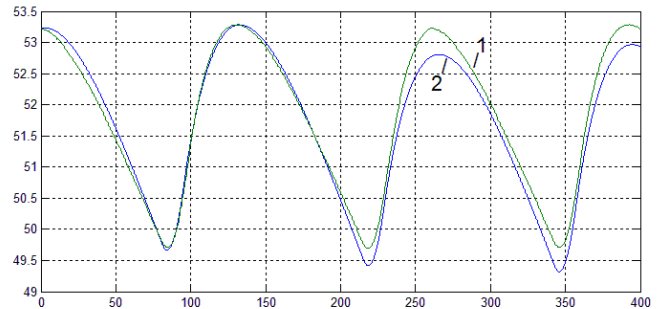


Рис. 4.

В работе рассмотрено $n=3$, апериодическое звено третьего порядка позволило с приемлемой точностью описать звено запаздывания.

$$W_3(p) = \frac{1}{0.6753 p^3 + 2.309 p^2 + 2.632 p + 1} \quad (4)$$

На рис. 5 представлена переходная характеристика (4).

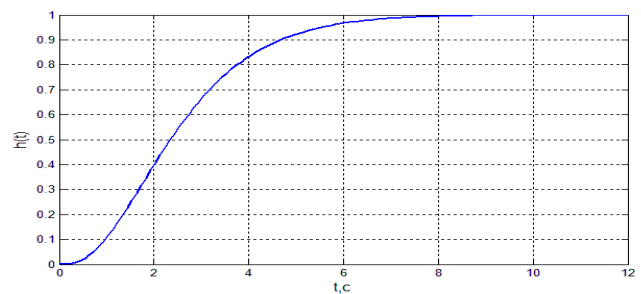


Рис. 5. Переходный процесс

В результате получена передаточная функция модели объекта пятого порядка.

$$W_o(p) = \frac{483.4}{6.604 e004 p^5 + 1.413 e005 p^4 + 1.022 e005 p^3 + 2.605 e004 p^2 + 749.4 p + 1} \quad (5)$$

С помощью пакета MatLab модель была преобразована к виду пространства состояний, предполагающему описание модели объекта в матричной форме [4].

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \\ y(t) = C \cdot x(t) \end{cases} \quad (6)$$

где A – матрица, определяющая динамические свойства объекта управления, размерности $n \times n$, n – порядок объекта; B – матрица входа задающих воздействий размерности $n \times m$, m – число входных воздействий; C –

матрица выхода размерности $l \times n$, l – число выходов объекта.

$$A = \begin{bmatrix} -2.139 & -0.7738 & -0.3944 & -0.09078 & -0.01551 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.007813 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 3.748 \end{bmatrix}.$$

Структурная схема приведена на рис. 6. На схеме $x(t)$ – вектор состояния.

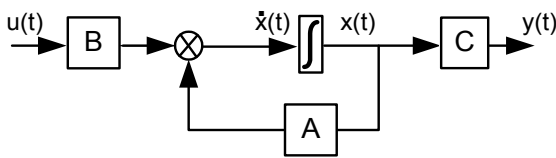


Рис. 6.

Проверка на наблюдаемость и управляемость показала, что объект полностью управляем и полностью наблюдаем.

III. НАБЛЮДАТЕЛЬ СОСТОЯНИЯ

Модальное управление [5] подразумевает наличие полной информации о векторе состояния, так как на объекте управления вектор состояния непосредственно неизмеряем, был синтезирован наблюдатель полного порядка – фильтр Калмана. Структурная схема приведена на рис. 7. На схеме приведены обозначения: $\hat{x}(k)$ – оценка вектора состояния; $\hat{y}(k)$ – оценка выходного сигнала; $v(k)$ – входная помеха; $n(k)$ – выходная помеха.

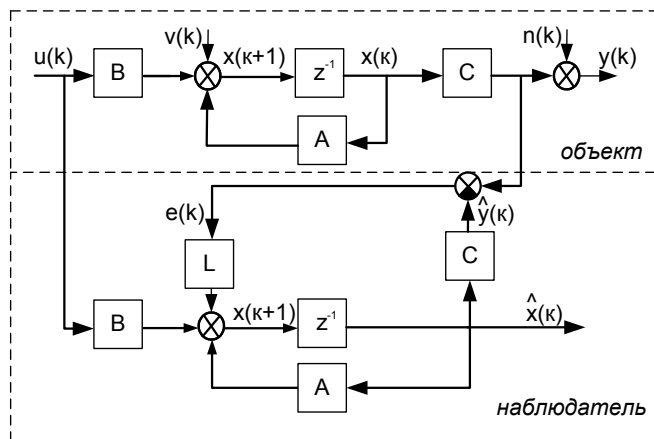


Рис. 7.

Алгоритм расчета оценки по фильтру Калмана:

$$\hat{x}(k+1) = A \cdot \hat{x}(k) + B \cdot u(k) + L(k+1) \cdot [y(k+1) - \hat{y}(k+1)] - A \cdot C \cdot \hat{x}(k) - C \cdot B \cdot u(k) \quad (7)$$

Коэффициент L может быть определен рекуррентно по следующим выражениям:

$$L(k+1) = Q(k+1) \cdot C^T \cdot (C \cdot Q(k+1) \cdot C^T + R)^{-1} = P(k+1) \cdot C^T \cdot R^{-1}$$

$$Q(k+1) = A \cdot P(k) \cdot A^T + V$$

$$P(k+1) = [Q(k+1) + C^T \cdot R^{-1} \cdot C]^{-1} = Q(k+1) - Q(k+1) \cdot C^T [C \cdot Q(k+1) \cdot C^T + R]^{-1} \cdot C \cdot Q(k+1)$$

где $Q(k+1)$ – априорное значение ковариационной матрицы погрешностей состояний x , основанное на k наблюдениях, $P(k+1)$ – апостериорное значение, основанное на $(k+1)$ наблюдениях, V – ковариационная матрица входной помехи, R – ковариационная матрица выходной помехи.

На рис. 8 представлен выходной сигнал объекта и его оценка, найденная с помощью синтезированного наблюдателя.

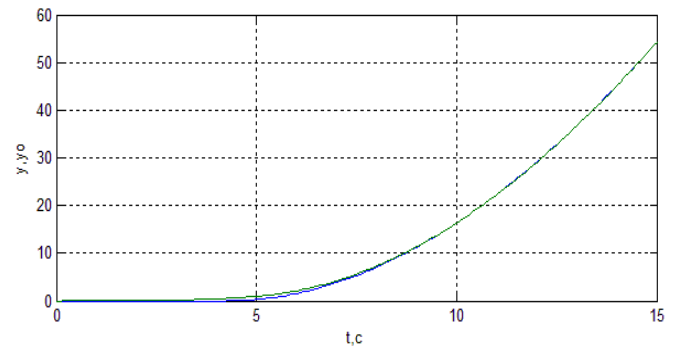


Рис. 8.

IV. МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Модальное управление предполагает нахождение такого вектора обратной связи по состоянию K , благодаря которому собственные числа замкнутой системы $(A - BK)$ будут равны собственным числам модели с желаемыми динамическими качествами A_M .

$$\dot{x} = (A - BK)x + Br = A_M x + Br \quad (8)$$

Для нахождения параметров модального регулятора в качестве эталонной модели был выбран стандартный полином Ньютона пятого порядка, позволяющий получить аperiodический переходный процесс [6]. Общий вид полинома Ньютона:

$$D(\lambda) = (\lambda + w_0)^m \quad (9)$$

Величина w_0 определяется через желаемое время переходного процесса t_n , m – порядок объекта.

$$w_0 = 7 / t_n \quad (10)$$

$$D(\lambda) = \lambda^5 + 0.4\lambda^4 + 0.064\lambda^3 + 0.0051\lambda^2 + 2.0480e - 04\lambda + 3.2768e - 06$$

Компоненты вектора обратной связи K определяются по формуле:

$$K_{n-i+1} = \gamma_i - \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

Где n – порядок объекта; α_i – коэффициенты характеристического многочлена матрицы A ; γ_i – коэффициенты желаемого характеристического многочлена.

Структурная схема системы с модальным регулятором представлена на рис. 9.

Управляющее воздействие ищется в виде

$$u(t) = -K \cdot x + r \quad (12)$$

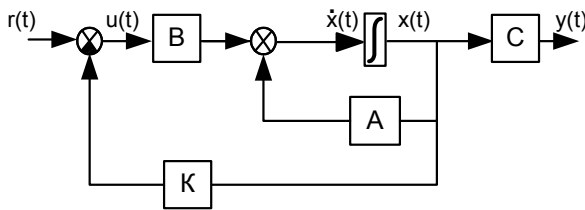


Рис. 9.

В результате был найден вектор значений регулятора, с помощью которого удалось получить замкнутую систему с желаемым расположением полюсов.

$$K = [-0.9946 \quad -0.3846 \quad -0.1971 \quad -0.0454 \quad -0.0077]$$

На рис. 10 представлена структурная схема синтезированной системы.

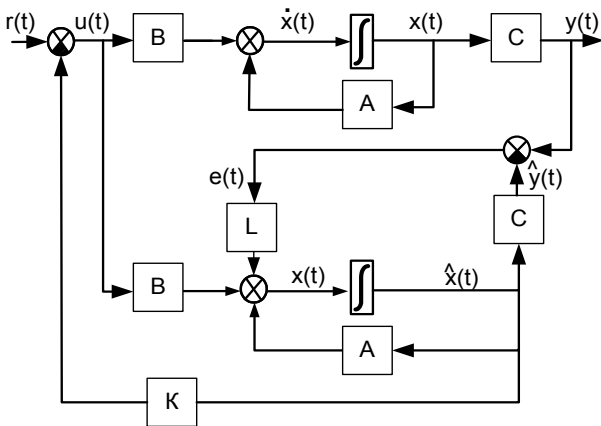


Рис. 10.

Полученный алгоритм был реализован на контроллере Fastwel I/0. На рис.11 представлен переходный процесс при задании на входе системы регулирования 50°C . На рис. 12 представлен соответствующий ему аналоговый сигнал управления и его реализация с помощью широтно-импульсной модуляции. Период квантования при широтно-импульсной модуляции составляет 5 секунд.

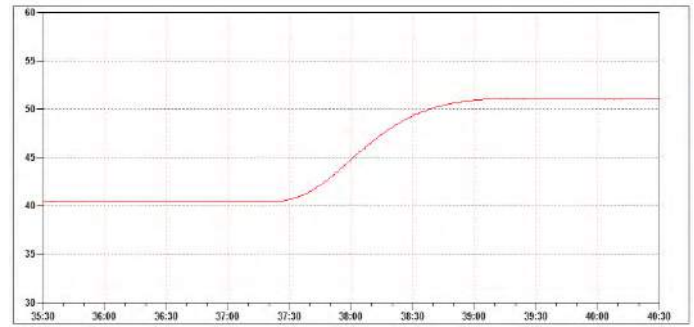


Рис. 11. переходный процесс

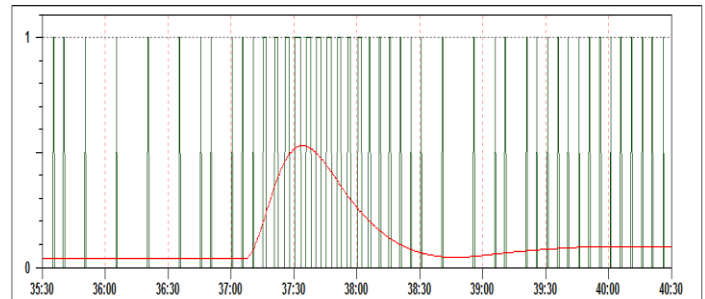


Рис. 12. управляющий сигнал

На графике переходного процесса (рис. 11) наблюдается статическая ошибка, которая обусловлена влиянием возмущений и нелинейностью объекта.

Список литературы

- [1] Гроп Д. Методы идентификации систем. - М.: Мир, 1979. – 302 с.
- [2] А.Н. Дилигенская Идентификация объектов управления. Учебное пособие. Изд. СамГТУ, 2009.- 136 с.
- [3] Янушевский Р.Т. Управление объектами с запаздыванием. – М.: Наука, 1978. – 416 с.
- [4] Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами. Главная редакция физико – математической литературы издательства «Наука», 1976, 424 с.
- [5] Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления/ Пер. с англ. Под ред. Я.З. Цыпкина. - М.: Наука. Главная редакция физико - математической литературы, 1985. - 296 с.
- [6] Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. – СПб.: Питер, 2006. – 272 с.: ил.

References

- [1] Grop D. Metody identifikacii sistem [Methods of identification of systems.], - М.: Mir, 1979. - 302 pp.
- [2] A.N. Diligenskaja Identifikacija ob#ektov upravlenija. [Identification of objects of management], Uchebnoe posobie. Izd. SamGTU, 2009.- 136 pp.
- [3] Janushevskij R.T. Upravlenie ob#ektami s zapazdyvaniem [Management of objects with delay], – М.: Nauka, 1978. – 416 pp.
- [4] Andreev Ju.N. Upravlenie konechnomernymi linejnymi ob#ektami [Management of finite-dimensional linear objects], Glavnaja redakcija fiziko – matematicheskoj literatury izdate'l'stva «Nauka», 1976, 424 pp.
- [5] Strejce V. Metod prostranstva sostojanij v teorii diskretnyh linejnyh sistem upravlenija [Method of space of states in the theory of discrete linear control systems],/ Per. s angl. Pod red. Ja.Z. Cypkina. - М.: Nauka. Glavnaja redakcija fiziko - matematicheskoj literatury, 1985. - 296 pp.
- [6] Miroshnik I.V. Teorija avtomaticheskogo upravlenija. Nelinejnye i optimal'nye sistemy [Theory of automatic control. Nonlinear and optimum systems], – SPb.: Piter, 2006. – 272 pp.: il.

Метод Монте-Карло, его распараллеливание и приложения

Д.С. Сенин, Г.Е. Веселов

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
Иваново, Россия

В данной работе рассмотрены теоретические основы метода Монте-Карло, основные модели и проблемы его распараллеливания, решения данных проблем, а также возможные направления применения этого метода. Теория проиллюстрирована примером решения практической задачи о нахождении оптимальной ширины стенки из некоторого материала, обеспечивающей защиту от нейтронного излучения.

Ключевые слова — метод Монте-Карло, параллельные вычисления, производительность, CUDA, C++ AMP

Monte Carlo method, parallel implementation and applications

D.S. Senin, G.E. Veselov

Ivanovo State Power University named by V. I. Lenin
Ivanovo, Russia

At this article are shown foundations of the Monte Carlo method, its base models and some troubles with its parallel realization. So we have found the solution of these problems and some possible implementation areas for this method. These parts were examined in the context of solving the task of finding optimal wall thickness which provides a full neutron radiation protection.

Keywords — Monte Carlo method, parallel computing, performance, CUDA, C++ AMP

I. ВВЕДЕНИЕ

Метод Монте-Карло — общее название группы численных методов, основанных на получении большого числа реализаций случайного процесса, который формируется таким образом, чтобы его вероятностные характеристики совпадали с аналогичными величинами решаемой задачи.

До появления ЭВМ этот метод не мог найти широкого применения в силу трудоемкости моделирования случайных величин вручную. Возникновение метода Монте-Карло как универсального численного метода стало возможным благодаря появлению ЭВМ.

Для использования метода Монте-Карло составляется программа для осуществления одного случайного испытания, затем испытание повторяется требуемое количество раз, причем каждый опыт не зависит от остальных, а результаты всех опытов усредняются. Поэтому метод Монте-Карло называют методом статистических испытаний.

Ошибка вычисления при использовании этого метода

пропорциональна числу $\sqrt{\frac{D}{N}}$, где D — некоторая постоянная и N — число испытаний. Поэтому для уменьшения ошибки в 10 раз, то есть, чтобы получить в

результате еще один верный десятичный знак, нужно увеличить число испытаний в 100 раз.

II. СХЕМЫ РАСПАРАЛЛЕИВАНИЯ

При рассмотрении общей схемы метода Монте-Карло может показаться, что при распараллеливании данного метода не должно возникнуть проблем. Это верно только отчасти. Сам ход вычислений распараллелить очень просто, но возникает проблема с корректной генерацией случайных чисел.

Для распараллеливания данного метода применяют две модели, которые выражены следующими схемами:



Рис. 1. Модель собственного генератора

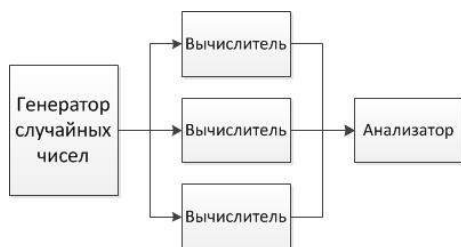


Рис. 2. Модель выделенного процесса-генератора

Обе схемы не лишены недостатков. При использовании схемы на Рис. 1. может возникнуть корреляция последовательностей генераторов случайных чисел, что приведет фактически к одному и тому же эксперименту на двух (и/или более разных) вычислителях. Недостатком схемы на Рис. 2. является необходимость вводить процесс, который будет последовательно генерировать случайные числа и посылать их «вычислителям», т.е. получаем уменьшение потенциальных «вычислителей» на 1 и замедление в виде последовательной генерации.

Как видно обе модели имеют как преимущества, так и недостатки. Однако, первая модель все же является выгодней, поэтому на сегодняшний день активно развиваются методы параллельной генерации случайных чисел.

III. ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

Если в расчете по методу Монте-Карло моделируются случайные величины, определяемые реальным содержанием явления, то расчет представляет собой прямое моделирование этого явления.

Разработано моделирование на ЭВМ:

1. Процессов переноса, рассеяния и размножения частиц: нейтронов, гамма-квантов, фотонов, электронов и т.д.
2. Эволюции ансамблей молекул для решения различных задач классической и квантовой статистической физики
3. Систем массового обслуживания и производственных процессов
4. Различных случайных процессов в технике, гидрологии, метеорологии, геологии, химии, биологии и т.д.

IV. ПОСТАВЛЕННАЯ ЗАДАЧА

Рассмотрим применение метода Монте-Карло на примере задачи из молекулярной физики.

Пусть на однородную стенку из некоторого материала падает поток нейтронов с определенной энергией. Угол падения 90° . При столкновении с атомами вещества, из которого состоит стенка, нейтроны могут либо упруго рассеиваться или поглощаться. Предположим, что энергия нейтрона при рассеянии не меняется и любое направление «отскока» равновероятно. Необходимо рассчитать оптимальный размер стенки, при котором не один нейтрон не пройдет сквозь неё.

Практическая ценность решения данной задачи очевидна, с помощью моделирования можно узнать размер стенки для защиты от радиации, более того вычисление оптимального размера позволит уменьшить

затраты на производство стенки, т.к. минимизируется количество используемого материала.

V. ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ

Решение поставленной задачи можно свести к двум циклически повторяющимся этапам:

1. Проведение эксперимента при определенной ширине
2. Анализ результатов эксперимента и изменение размера стенки

Первый этап связан с моделированием движения пучка нейтронов сквозь стенку с определенной шириной. Целью данного этапа является определить количество нейтронов, которые прошли сквозь стенку.

Второй этап – это анализ результатов первого. На данном этапе принимаются разные решения: прекращение эксперимента, если на первом этапе ни один нейтрон не прошел сквозь стенку; увеличение размера стенки; величина увеличения. Величина увеличения зависит от конкретной модели математического ускорения, которые будут рассмотрены ниже.

Стоит отметить, что даже если ни один нейтрон не прошел сквозь стенку, то текущий её размер не является решением задачи, т.к. он может являться не оптимальным. Очевидно также, что оптимальный размер стенки находится между текущим и предыдущим размером стенки. Для уточнения и оптимизации используется метод половинного деления между указанными размерами.

Ускорить можно оба этапа решения, но разными способами. Для первого этапа возможно только ускорение, за счет использования технологий распараллеливания вычислений. Для второго этапа — только ускорение за счет использования определенных математических моделей, которые обобщают результаты нескольких экспериментов.

VI. МЕТОДЫ АППАРТНОГО УСКОРЕНИЯ

Были использованы следующие технологии параллельного программирования: CUDA, C++ AMP, OpenMP. За счет использования этих технологий созданная программа позволяет ускорять вычисления на всех распространенных аппаратных платформах: видеокартах (CUDA, C++ AMP) и процессорах (OpenMP).

Для проведения эксперимента с использованием данных технологий требуются генераторы случайных чисел. Для OpenMP можно использовать стандартную библиотеку C++ и новые способы генерации случайных чисел, которые появились в стандарте C++ 11.

Для CUDA лучшим способом генерации является библиотека, предоставляемая вместе с CUDA SDK – cuRAND, которая позволяет параллельно генерировать массивы случайных чисел. Однако, данная библиотека не позволяет генерировать эти массивы во время вычислений на видеокарте, поэтому требуется останавливать вычисления и снова генерировать массив.

C++ AMP является довольно новой технологией, поэтому пока с ней не поставляется библиотека генерации случайных чисел. Однако она была найдена в виде свободно распространяемого программного обеспечения и полностью удовлетворяла потребностям. Данная библиотека называется C++ AMP RNG Library. Она

позволяет генерировать случайные числа во время вычислений, что устраняет недостаток при использовании cuRAND. Однако, она имеет недостаток в виде использования большого количества памяти, что не позволило запускать более 10000 нитей одновременно.

В случае отсутствия возможности использования всех вышеназванных технологий разработанная программа предоставляет возможность проведение эксперимента последовательно. Данный метод также является контрольным для проверки адекватности и корректности результатов при решении задачи с использованием технологий ускорения вычислений.

VII. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УСКОРЕНИЯ

Для ускорения второго этапа решения задачи были использованы следующие математические модели: гиперболическая регрессия, метод динамического шага и билинейная аппроксимация.

Метод гиперболической регрессии позволяет обобщить результаты нескольких экспериментов и спрогнозировать приблизительный искомый размер стенки.

Метод динамического шага определяет скорость изменения количества нейтронов, проходящих сквозь стенку, при изменении размера стенки. На основании этих данных этот метод определяет оптимальную величину изменения размера стенки.

Все эти методы позволяют спрогнозировать приблизительное решение по ходу работы, т.е. для использования необходимо провести ряд экспериментов, на что, очевидно, будет потрачено время. Поэтому было решено составить базу данных результатов расчета и использовать её так, чтобы в дальнейшем как-либо обобщить информацию и сделать прогноз ещё до начала расчетов, т.е. аппроксимировать, интерполировать или экстраполировать.

Было принято решение именно об аппроксимации информации из базы данных. Также был выдвинут ряд критериев для выбора метода аппроксимации:

1. Хорошая точность аппроксимации
2. Высокая скорость работы

Сочетание этих критериев позволит получить приемлемый прогноз в минимальный срок. Всем этим критериям полностью удовлетворяет метод билинейной аппроксимации.

Для использования метода билинейной аппроксимации была составлена таблица результатов сотен решений поставленной задачи с разными параметрами. Как очевидно из названия, метод позволяет аппроксимировать данные из таблицы и ещё до начала расчетов спрогнозировать искомый размер.

Существует и не ускоряющий метод решения, который был назван методом последовательного перебора. Суть данного метода заключается в последовательном увеличении размера стенки на определенную константу. И хотя в дальнейшем будет видно, что использование данного метода неэффективно, стоит отметить, что именно благодаря анализу хода решения с использованием данного метода было оправдано использование метода гиперболической регрессии.

VIII. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Далее представлены таблицы со временем решения задачи при различных значениях ширины искомой стенки.

В подзаголовке таблицы указана технология аппаратного ускорения, а каждая из колонок (кроме первой) обозначает определенную модель математического ускорения.

Ширина, м	Последовательный		
	Последовательный перебор, сек	Гиперб. регрессия, сек.	Динамический шаг, сек.
0,43	62	58,8	84,41
0,87	94,2	102,39	113,29
1,70	185,67	115,56	124,21
4,26	2163,97	1093,77	996,26

Ширина, м	CUDA		
	Последовательный перебор, сек	Гиперб. регрессия, сек.	Динамический шаг, сек.
0,43	18,19	17,87	35,31
0,87	27,51	25,74	34,7
1,70	41,26	26,23	29,91
4,26	376,1	209,26	171,58

Ширина, м	C++ AMP		
	Последовательный перебор, сек	Гиперб. регрессия, сек.	Динамический шаг, сек.
0,43	5,82	5,15	9,52
0,87	8,16	7,92	10,91
1,70	11,74	9,19	9,11
4,26	35,36	21,32	17,91

Ширина, м	OpenMP		
	Последовательный перебор, сек	Гиперб. регрессия, сек.	Динамический шаг, сек.
0,43	19,34	21,24	42,68
0,87	31,27	31,11	38,50
1,70	150,39	132,15	159,14
4,26	709,04	297,47	274,31

Ширина, м	Билинейная аппроксимация (C++ AMP)		
	Последовательный перебор, сек	Гиперб. регрессия, сек.	Динамический шаг, сек.
0,43	9,81	9,40	9,34
0,87	8,14	7,78	10,30
1,70	5,6	5,55	5,88
4,26	13,87	14,36	7,08

Ширина, м	Билинейная аппроксимация (OpenMP)		
	Последовательный перебор, сек	Гиперб. регрессия, сек.	Динамический шаг, сек.
0,43	27,84	25,98	29,05
0,87	31,41	33,96	45,45
1,70	27,04	26,91	24,04
4,26	210,47	210,04	216,59

Как видно из результатов, самой лучшей технологией ускорения является C++ AMP. Однако, данная технология была протестирована на GPU, поэтому однозначно порекомендовать её для использования нельзя.

Если разделить размеры стенок на маленькие (до 3 м.) и большие (более 3 м.), то можно заметить, что метод динамического шага является наиболее подходящим для нахождения именно больших размеров стенок, а метод гиперболической регрессии для нахождения маленьких.

Билинейная аппроксимация действительно может спрогнозировать приблизительную ширину, однако этот прогноз необходимо проверить и, если он окажется неудачным, скорректировать. Для ускорения проверки и корректировки использовались технология C++ AMP, которая показала лучшие результаты тестов, и технология OpenMP, т.к. её можно использовать на любой ЭВМ. Как видно, при хорошем качестве прогноза удалось добиться существенного ускорения. Однако, при неудачном прогнозе серьезного замедления не произошло. Неудачность прогноза можно оправдать небольшой выборкой для аппроксимации.

В итоге разница между самым медленным (последовательным расчетом и методом последовательного перебора) и самым быстрым (билинейной аппроксимацией с использованием технологии C++ AMP и методом динамического шага) расчетом для стенки шириной 4,26 метра составляет: 305 раз. Это означает, что старания по нахождению всевозможных ускоряющих методов прошли не зря.

Список литературы

- [1] Соболев, И.М. Метод Монте-Карло. Популярные лекции по математике выпуск №46 – Москва: Наука, 1968. – 66 с.

- [2] Фёрстер, Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Руководство для экономистов / Э. Фёрстер, Б. Рёндц; пер. с нем. и предисловие В.М. Макарова – Москва: Финансы и статистика, 1983. – 303 с.
- [3] CURAND LIBRARY. Programming Guide. [Электронный ресурс] Системные требования: программа для просмотра PDF-документов. http://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CURAND_Library.pdf
- [4] Лямаев, И. В. Метод Монте-Карло в параллельных вычислениях [Электронный ресурс] – Электрон. текст. дан. <http://www.ict.edu.ru/vconf/files/3613.doc>
- [5] Балаш, В.А. Имитационное моделирование и его приложения. [Электронный ресурс] - Электронн. текст. дан. http://nto.immpu.sgu.ru/sites/default/files/3/_12412.pdf
- [6] Билинейная интерполяция [Электронный ресурс] - https://ru.wikipedia.org/wiki/Билинейная_интерполяция
- [7] C++ AMP RNG Library [Электронный ресурс] - <http://amprng.codeplex.com>

References

- [1] Sobol, I.M. *Metod Monte-Karlo. Populjarnye lekci po matematike* [Monte Carlo method. Popular lectures in mathematics], Nauka, Moscow, 1968, issue 46, pp. 66
- [2] E. Ferster, B. Renc, *Metody korreljacionnogo i regressionnogo analiza. Rukovodstvo dlja jekonomistov* [Correlation and regressive analysis methods. Guidance for economists], *Finansy i statistika*, Moscow 1983, pp. 303.
- [3] CURAND LIBRARY. Programming Guide. (Electronic resource) System requirements: PDF files reader. http://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CURAND_Library.pdf
- [4] Ljamaev, I. V. Metod Monte-Karlo v parallel'nyh vychislenijah [Monte Carlo method for parallel computing] (Electronic resource) <http://www.ict.edu.ru/vconf/files/3613.doc>
- [5] Balash, V.A. Imitacionnoe modelirovanie i ego prilozhenija [Simulation modeling and applications] (Electronic resource) <http://www.ict.edu.ru/vconf/files/3613.doc>
- [6] Bilinear interpolation (Electronic resource) https://ru.wikipedia.org/wiki/Билинейная_интерполяция
- [7] C++ AMP RNG Library (Electronic resource) <http://amprng.codeplex.com>

Решение уравнений Навье-Стокса для течения вязкой несжимаемой жидкости в полости с действующей силой и увеличивающимся числом Рейнольдса в переменных «функция тока - завихрённость»

И.А. Закурин, Ф.Н. Ясинский, С.Г. Сидоров

ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина"
Иваново, Россия

Аннотация — Численные методы, применяющиеся при моделировании процессов, описываемых сложными уравнениями, являются дискретными, поэтому они могут вносить искажения в результаты вычислений. Показано, что при использовании различных математических моделей, успешно применяемых при моделировании ламинарных течений, при переходе к турбулентным течениям результаты значительно отличаются. Также результаты отличаются и при использовании различных схем дискретизации исходных непрерывных дифференциальных уравнений. В работе применялись различные методы численного моделирования течения вязкой несжимаемой жидкости, а так же инструменты параллельного программирования с использованием технологии NVidia CUDA.

Ключевые слова — гидродинамика, уравнения Навье-Стокса, неустойчивость, численные методы, математическое моделирование, параллельные вычисления, Qt, Nvidia CUDA

Navier-Stokes equations solution for viscous incompressible fluids in a cavern with growing Reynolds number in terms of vorticity and current

I.A. Zakurin, F.N. Yasinskiy, S.G. Sidorov

Ivanovo State Power University
Ivanovo, Russia

Abstract — As numerical methods used for solving complex non-linear equations are discrete they tend to influence the final solution. The fact shown that numerical methods and mathematical models for viscous incompressible fluid flows simulation can be successfully applied to simulation of non-turbulent flows but all have impact on the resulting numerical solution in case of turbulence. Several numerical methods and equations for viscous incompressible fluid flows simulation as well as the Qt C++ and NVidia CUDA platforms are being used.

Keywords — synchronized hydrodynamics, Navier-Stokes equations, instability, numerical methods, mathematical analysis, parallel computing, Qt, Nvidia CUDA

Переход ламинарного течения в турбулентное и развитие турбулентности является актуальной задачей современной гидродинамики, которая до сих пор полностью ещё не решена, несмотря на то, что существует множество исследований на эту тему[11], а также ряд исследований, связанных с моделированием затухания турбулентного течения и его перехода в ламинарное состояние[12][13]. В данной и предыдущих работах делается попытка исследовать этот переход, используя для моделирования систему вихрей. Ввиду большого объёма вычислений, в частности, при решении уравнения Пуассона[10], применяется распараллеливание и

использование графических ускорителей на платформе Nvidia CUDA.

В предыдущих исследованиях [14][15] рассматривались вычисления с использованием математической модели, составленной из уравнения Навье-Стокса, уравнения неразрывности и уравнения плоского вихря в переменных Эйлера. По данной модели были составлены разностные схемы и проведены вычисления. В результате была обозначена проблема отделения вычислительной неустойчивости от физической, а также проблема чрезмерной устойчивости разностной схемы при использовании некоторых вычислительных приёмов, таких как использование

противоточных производных при составлении разностных схем [14]. В рамках дальнейших исследований предпринимается попытка моделирования течения вязкой несжимаемой жидкости с использованием математической модели, основанной на уравнениях Навье-Стокса в переменных «функция тока — завихренность». Расчётная область имеет вид прямоугольной полости, противоположные границы которой замкнуты. Вдоль горизонтальной оси в противоположных относительно средней линии направлениях действует некоторая возмущающая сила (рис. 1).

При решении задачи с использованием платформы NVidia CUDA пространство и время делаются дискретными. Вводится численный шаг по времени τ и шаг по пространству h , уравнение Пуассона для вычисления поля функции тока вычисляется при помощи «шахматного» метода.

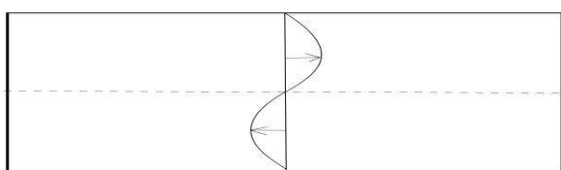


Рис. 1. Расчётная область

Список литературы

- [1] Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Механика жидкости и газа. – М.:Физматлит, 1963.
- [2] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.:Наука, 1970.
- [3] Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.:Наука, 1977.
- [4] Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.:Наука, 1978.
- [5] Самарский А.А. Введение в численные методы. – М.:Наука, 1978.
- [6] Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.:Мир, 1980.
- [7] Ясинский Ф.Н., Кокорин А.С. Математическое моделирование процессов вентиляции и отопления в больших производственных, культурных и спортивных помещениях // Вестник ИГЭУ. – 2010. - №3. – С.90-92.
- [8] Боресков А.В., Харламов А.А. Основы работы с технологией CUDA. – М.:ДМК Пресс, 2011.
- [9] Ясинский Ф.Н., Закурин И.А. Реализация математической модели вычисления поля скоростей в замкнутом двумерном объёме на MVC // Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ИГЭУ. – 2011. – Том 5. – С.49-54.
- [10] Балаев Э.Ф., Нуждин Н.В., Пекунов В.В., Сидоров С.Г., Чернышева Л.П., Ясинской И.Ф., Ясинский Ф.Н. Численные методы и параллельные вычисления для задач механики жидкости, газа и плазмы. Учебное пособие. – ИГЭУ, 2003.

- [11] Белоцерковский С.М., Гиневский А.С. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей. – М.:Физматлит, 1995.
- [12] Ugliano S. Coherent structures and turbulence in two-dimensional hydrodynamics. – University of Warwick, 2011.
- [13] Matthaeus W.H., Stribling W.T., Martinez D., Oughton S., Montgomery D. Decaying, two-dimensional, Navier-Stokes turbulence at very long times. // Physica D. – North-Holland, 1991, С.531-538.
- [14] Ясинский Ф.Н., Сидоров С.Г., Закурин И.А. Решение уравнений Навье-Стокса с помощью платформы Nvidia CUDA для течения вязкой несжимаемой жидкости в полости // Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ИГЭУ. – 2013. – Том 5., Часть 1 – С.329-330.
- [15] Ясинский Ф.Н., Сидоров С.Г., Закурин И.А. Численное моделирование течения вязкой несжимаемой жидкости в подшиппике // Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ИГЭУ. – 2014. – Том 5. – С.274-277.

References

- [1] Kochin N.E., Kibel' I.A., Roze N.V. Mekhanika zhidkosti i gaza. – M.:Fizmatlit, 1963.
- [2] Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza. – M.:Nauka, 1970.
- [3] Marchuk G.I. Metody vychislitel'noj matematiki. – M.:Nauka, 1977.
- [4] Kalitkin N.N. Chislennye metody. – M.:Nauka, 1978.
- [5] Samarskiy A.A. Vvedenie v chislennye metody. – M.:Nauka, 1978.
- [6] Rouch P. Vychislitel'naja gidrodinamika. M.:Mir, 1980.
- [7] Jasinskiy F.N., Kokorin A.S. Matematicheskoe modelirovanie processov ventiljacji i otoplenija v bol'shix proizvodstvennyh, kul'turnyh i sportivnyh pomeshhenijah // Vestnik IGJeU. – 2010. - №3. – S.90-92.
- [8] Borekov A.V., Harlamov A.A. Osnovy raboty s tehnologiej CUDA. – M.:DMK Press, 2011.
- [9] Jasinskiy F.N., Zakurin I.A. Realizacija matematicheskoj modeli vychislenija polja skorostej v zamknutom dvumernom ob#jome na MVS // Materialy regional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov i aspirantov / IGJeU. – 2011. – Tom 5. – S.49-54.
- [10] Balaev Je.F., Nuzhdin N.V., Pekunov V.V., Sidorov S.G., Chernysheva L.P., Jasinskoj I.F., Jasinskiy F.N. Chislennye metody i parallel'nye vychislenija dlja zadach mehaniki zhidkosti, gaza i plazmy. Uchebnoe posobie. – IGJeU, 2003.
- [11] Belocerkovskij S.M., Ginevskij A.S. Modelirovanie turbulentnyh struj i sledov na osnove metoda diskretnyh vihrej. – M.:Fizmatlit, 1995.
- [12] Ugliano S. Coherent structures and turbulence in two-dimensional hydrodynamics. – University of Warwick, 2011.
- [13] Matthaeus W.H., Stribling W.T., Martinez D., Oughton S., Montgomery D. Decaying, two-dimensional, Navier-Stokes turbulence at very long times. // Physica D. – North-Holland, 1991, S.531-538.
- [14] Jasinskiy F.N., Sidorov S.G., Zakurin I.A. Reshenie uravnenij Nav'e-Stoksa s pomoshh'ju platformy Nvidia CUDA dlja techenija vjazkoj neszhimaemoj zhidkosti v polosti // Materialy regional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov i aspirantov / IGJeU. – 2013. – Tom 5., Chast' 1 – S.329-330.
- [15] Jasinskiy F.N., Sidorov S.G., Zakurin I.A. Chislennoe modelirovanie techenija vjazkoj neszhimaemoj zhidkosti v podshipnike // Materialy regional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov i aspirantov / IGJeU. – 2014. – Tom 5. – S.274-277.

Разработка симулятора работы компьютерной сети на канальном уровне модели OSI

А.Б. Гадалов, К.Ю. Пospelов
ИГЭУ
Иваново, Россия
gadalovab@gmail.com, kupospelov@gmail.com

Аннотация — данная работа посвящена описанию приложения, созданного для визуализации процесса передачи кадров в сети на канальном уровне модели OSI. Описана проблема избыточности соединений в таких сетях и используемый для ее решения алгоритм связующего дерева, лежащий в основе протоколов семейства STP.

Ключевые слова — коммутация; симулятор; разработка

Creation of OSI data link layer computer network simulator

Alexander Gadalov, Konstantin Pospelov
Ivanovo State Power University
Ivanovo, Russia
gadalovab@gmail.com, kupospelov@gmail.com

Abstract — this article describes the application developed for visualization of frame transmission in OSI data link layer networks. It also explains the redundant connection problem in such networks and spanning tree algorithm which underlies the spanning tree protocols family.

Keywords — switching; simulator; development

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных проблем, возникающих как перед начинающими, так и уже достаточно опытными сетевыми инженерами и администраторами, является понимание принципов работы компьютерных сетей на нижних уровнях модели OSI. Только поняв правила и принципы взаимодействия сетевых устройств на канальном уровне можно правильно спроектировать схему сети и приобрести необходимое оборудование. Разработанное приложение предназначено для моделирования работы сетей второго уровня модели OSI и основных ее узлов: коммутаторов и конечных устройств – компьютеров, серверов и т.п.

II. ОСНОВЫ КОММУТАЦИИ

Основным используемым в локальных вычислительных сетях устройством является коммутатор. Он, в отличие от сетевого концентратора, не постоянно ретранслирует входящий сигнал на все подключенные интерфейсы, а по возможности использует только порт, к которому подключено устройство-приемник кадра данных, тем самым обеспечивая более высокую

пропускную способность сети. Коммутатор использует внутреннюю таблицу коммутации: он анализирует данные, которые через него передаются, ставя в соответствие MAC-адреса устройств и интерфейсы, к которым они подключены. Кадр данных ретранслируется на все порты лишь в том случае, когда в таблице коммутации отсутствует информация о его адресе назначения.

Однако при наличии избыточных связей между коммутаторами может возникнуть так называемый «широковещательный шторм» (broadcast storm): ситуация, когда коммутаторы непрерывно дублируют один и тот же кадр данных, что в конце концов парализует работу всей сети.

III. ПРОТОКОЛЫ СЕМЕЙСТВА STP

Для решения этой проблемы в 1985 году Радьей Перлман, работавшей в то время в компании Digital Equipment Corporation, был создан протокол STP (spanning tree protocol, протокол связующего дерева) [3]. Принцип работы STP – выбор корневого коммутатора и блокирование избыточных соединений таким образом, чтобы от каждого сегмента сети был ровно один путь до

корневого коммутатора, причем его пропускная способность должна быть самой большой из возможных.

Работа протокола описана в спецификации 802.1D. Каждый порт коммутатора обладает некоторым состоянием, которое определяет, должен ли он перенаправлять кадры данных, поступающие на этот порт, и нужно ли запоминать адрес отправителя кадра [1].

Протокол STP в настоящее время вытесняется своей модификацией RSTP, описанной в спецификации 802.1w. Однако данный протокол нужно рассматривать скорее как развитие 802.1D, а не как его революционное изменение [4]. В таблице 1 показаны состояния портов, используемые в протоколах STP и RSTP.

У портов существует роли. В STP каждый порт может быть корневым (root port) и назначенным (designated port), неназначенным (nondesignated port) и отключенным (disabled port) (в RSTP список ролей несколько отличен [4]). Корневым портом называется порт, который имеет кратчайший путь к корневому коммутатору, и он может быть только одним для каждого некорневого коммутатора. Назначенным называется порт, через который проходит кратчайший путь до корневого коммутатора для другого сегмента сети. Таких портов и у корневого, и у некорневых коммутаторов может быть множество. Только корневым и назначенным портам разрешается передавать кадры данных, таким образом, избыточные соединения блокируются.

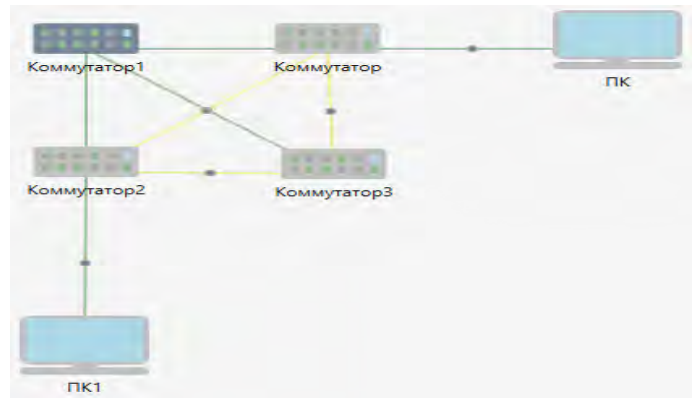
Таблица 1. Состояния портов

Состояние порта STP (802.1D)	Состояние порта RSTP (802.1w)	Порт включен в активную топологию?	Порт запоминает MAC-адреса?
Отключен	Сбрасывание	Нет	Нет
Блокирование	Сбрасывание	Нет	Нет
Прослушивание	Сбрасывание	Да	Нет
Обучение	Обучение	Да	Да
Пересылка	Пересылка	Да	Да

IV. РЕАЛИЗАЦИЯ STP В ПРИЛОЖЕНИИ

В программе моделируется процесс выбора корневого коммутатора (root bridge election), а также блокирования соединений, образующих циклы. Корневой коммутатор выбирается на основе приоритета, либо же наименьшего MAC-адреса в случае равенства приоритетов. В программе корневой коммутатор обозначается более темным цветом (Рис. 1). У всех некорневых коммутаторов определяется единственный корневой порт – порт, через который наилучшим образом обеспечивается связь с корневым коммутатором. Коммутаторы обмениваются друг с другом информацией посредством периодической отправки BPDU-пакетов (Bridge Protocol Data Unit) [3]. Кроме того, используются TCN (Topology change notification) и TCA (Topology change acknowledgment) BPDU-пакеты для уведомления об изменении топологии сети и подтверждения принятия сообщения об изменении соответственно [5]. Все BPDU-пакеты отображаются в виде небольших «шариков», идущих от одного устройства к другому. Соединения, включенные в активную топологию, отображаются зеленым цветом. Соединения, заблокированные одним из устройств, - помечаются

желтым. Есть возможность динамически изменить активную топологию: пользователь может изменить приоритет любого из коммутаторов, что, в свою очередь, может привести к выбору нового корневого коммутатора



и активных соединений.

Рис. 1. Результат работы STP

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный симулятор может быть использован для самых различных целей: от обучения сетевых администраторов и студентов основам компьютерных сетей, до проектирования сложных сетевых топологий.

Приложение может быть использовано для наглядного представления основ работы компьютерных сетей на канальном уровне и функционирования STP-протокола в частности. Возможно моделирование конкретных состояний компьютерной сети: в частности, широковещательного шторма.

Список литературы

- [1] 802.1D Standart [Электронный ресурс]. URL: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.1D-2004.pdf> (дата обращения: 20.05.2015).
- [2] MacDonald M. Pro WPF 4.5 in C#. Windows Presentation Foundation in .NET 4.5 – 4th Edition. – Apress, 2012
- [3] STP [Электронный ресурс]. URL: <http://xgu.ru/wiki/STP> (дата обращения: 20.05.2015).
- [4] Understanding Rapid Spanning Tree Protocol (802.1w) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/spanning-tree-protocol/24062-146.html> (дата обращения: 20.05.2015).
- [5] Understanding Spanning-Tree Protocol Topology Changes [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/spanning-tree-protocol/12013-17.html> (дата обращения: 20.05.2015).

References

- [1] 802.1D Standart, <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.1D-2004.pdf> (May 20, 2015).
- [2] MacDonald M. Pro WPF 4.5 in C#. Windows Presentation Foundation in .NET 4.5 – 4th Edition. – Apress, 2012.
- [3] STP, <http://xgu.ru/wiki/STP> (May 20, 2015).
- [4] Understanding Rapid Spanning Tree Protocol (802.1w), <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/spanning-tree-protocol/24062-146.html> (May 20, 2015).
- [5] Understanding Spanning-Tree Protocol Topology Changes, <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/spanning-tree-protocol/12013-17.html> (May 20, 2015).

Особенности интеграции информационного портала в образовательной деятельности

А.А. Белов, М.А. Николаев

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
Иваново, Россия

E-mail: belov@it.ispu.ru, maks113nik@gmail.com

Аннотация — представлена структура информационного портала образовательной деятельности. Показаны особенности программно-аппаратных решений

Ключевые слова — информационный портал, база данных, web - технология.

Features of informational web-portal integration in educational process

Alexandr Belov, Maksim Nikolaev

Ivanovo State Power University
Ivanovo, Russia

E-mail: belov@it.ispu.ru, maks113nik@gmail.com

Abstract — in the article the structure of informational web-portal of educational process is presented. Features of hardware and software decisions are presented.

Keywords — informational web-portal, database, web-technology

Информационный портал рассматривается как интегрированная система, применимая для информационной поддержки любого вида деятельности. В данной работе представлен информационный портал в образовательной деятельности, ограниченный деятельностью отдельной выпускающей кафедры. Применительно к выпускающей кафедре информационный портал имеет тройственное назначение:

- Информационная поддержка организации и управления учебным процессом по соответствующей основной образовательной программе;
- Комплекс для проведения лабораторных работ по целому ряду дисциплин;
- Полигон для научно-исследовательской деятельности студентов и молодых ученых в области прикладной информатики.

Как в целом, так и по отдельным приложениям разработанный комплекс может быть использован в целях информационного обеспечения решения различного рода задач: производственных, коммерческих, научных и т.д.

Основными требованиями к portalу являются: легкая расширяемость и простота добавления функций, кроссплатформенность и защищенность. Аналогичные требования предъявляются к системам, средой работы которых является интернет, что делает web-технологии наиболее пригодными для использования при реализации портала.

В портал кафедры входит 9 подсистем: актуализации знаний, обеспечения кадровым ресурсом, обеспечения материально-техническим ресурсом, обеспечения методическим ресурсом, оценки состояния студента, управления нормативным ресурсом, формирования проблемного пространства, формирования рабочих программ дисциплин (РПД), хранилище знаний. Часть подсистем имеет общий характер и может использоваться как для процесса обучения на кафедре, так и для использования на производстве. Каждая подсистема может работать отдельно от других приложений портала, но, в таком случае, большую часть данных подсистемы приходится вводить вручную.

Выбор средств реализации осуществляется на основании вышеуказанных требований с учетом популярности, наличия поддержки и документации.

Выбор был сделан в пользу двух платформ: фреймворка PHP Yii2, и фреймворка Python Django.

В процессе проектирования возникла проблема интеграции этих подсистем, так как используемые данные для многих из них совпадают. Общие цели организации взаимодействия приложений можно сформулировать следующим образом:

- Уменьшить стоимость эксплуатации совокупности приложений;
- Увеличить скорость выполнения типизированных задач или гарантировать сроки их выполнения;
- Поднять качество выполнения задач за счет минимизации человеческого фактора, как основного источника ошибок.

Учитывая специфику подсистем было рассмотрено несколько способов взаимодействия, а именно: обмен файлами, асинхронный обмен сообщениями, удаленный вызов процедур (CORBA, DCOM, RMI, SOAP), общая база данных (БД) [2]. Данные способы позволяют взаимодействовать приложениям как напрямую, используя определенный формат данных, так и с использованием временного хранилища. Было решено использовать для взаимодействия приложений общую базу данных так как ее использование позволяет предъявить явные требования к формату данных, а также поддерживать их семантическую целостность на уровне БД, в отличие от метода обмена файлами, и избавиться от излишней степени связывания приложений, характерной для методов удаленного вызова процедур и обмена сообщениями.

Использование общей базы данных позволило:

- Обеспечить доступ к данным при отсутствии одной или нескольких подсистем;
- Обеспечить гибкость добавления новых подсистем;
- Обеспечить доступ к данным при отказе одной или нескольких подсистем;
- Классифицировать информацию по типу;
- Повысить скорость актуализации данных.

Однако, при использовании данного метода появляются некоторые трудности:

- Разработка общей схемы данных, удовлетворяющей требованиям нескольких различных приложений;
- Возрастание числа запросов к общей базе данных, при котором последняя может стать узким местом интеграционного решения, что приведет к снижению производительности приложений и увеличит вероятность блокировки данных;
- Использование коммерческого программного обеспечения, в котором часто есть ограничения на использование сторонних баз данных.
- Распределение прав пользователей и создание единой системы авторизации.

В данном проекте эти проблемы решаются созданным регламентом ведения общей базы данных, оптимизацией

количества обращений к общей базе данных и неиспользованием коммерческих решений для реализации подсистем портала. Проблема распределения доступа решается созданием отдельного сервера авторизации, на который возложена задача управления профилями пользователей и контроля доступа к функциям подсистем.

В качестве системы управления базами данных была выбрана система MySQL, так как она является популярным и бесплатным решением. Для формирования структуры данных общей базы данных используется атрибутивная модель системы. Данная структура подразумевает деление данных из подсистем на ресурсы (R), продукты (P), проблемы (W), цели (Z), сырьевые ресурсы (Rp) и функции (F) (технологии решения проблемы), также добавляются служебные таблицы профилей пользователей, групп, истории изменений [1]. Поддержка разнообразности данных от подсистем реализуется за счет поля, содержащего строку в текстовом формате обмена данными JSON и наличия регламента на формат данных. Причиной выбора формата JSON является его распространенность, удобочитаемость, краткость и кроссплатформенность. При использовании MySQL максимальная длина строки составляет 4 294 967 295 символов, что является достаточным в подавляющем большинстве случаев.

Данная структура взаимодействия приложений соответствует требованиям к portalу кафедры, обеспечивает высокую скорость взаимодействия между приложениями и обеспечивает повторное использование данных, что исключает вероятность ошибки со стороны человека. Поскольку использовался системный принцип формирования portalа, он может использоваться при непрерывном образовательном процессе любой организации.

Список литературы

- [1] Белов А.А. Информационно-синергетическая концепция управления сложными системами: методология, теория, практика/ ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 424 с.
- [2] Шаблоны интеграции корпоративных приложений. : Пер. с англ. – М. : ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 672 с. : ил. – Парал.тит.англ.

References

- [1] Belov A.A. Informacionno-sinergeticheskaja koncepcija upravlenija slozhnymi sistemami: metodologija, teorija, praktika/ GOUVPO «Ivanovskij gosudarstvennyj jenergeticheskij universitet im. V.I. Lenina». – Ivanovo, 2009. – 424 s.
- [2] Shablony integracii korporativnyh prilozhenij. : Per. s angl. – M. : ООО «I.D. Vil'jams», 2007. – 672 s. : il. – Paral.tit.angl.

A Comparative Study of Basic Education investment Between different regions (In China)

Luo Jin
Wuhan Textile University
WuHan HuBei China
luojin@wtu.edu.cn

Abstract — The capital investment in basic education is closely related to the regional economic development, it is clearly that, the economically developed regions can invest much more in basic education due to have adequate funding, so the basic education is better than the economically developing regions. Comparative analysis of the different levels of education investment in different region to economically development, it can better help the rational use of the limited funding for education in poor areas, making funding in a more rational way and structures investments in education, in order to achieve better education results. In this article, a comparative study about the education investment among six different regions in China. These regions are selected according to the different levels of economic development. Through the comparative and analysis, we can provide reasonable suggestions for the basic education investment in Hubei Province.

I. INTRODUCTION

The investments in basic education have a significant impact on the development level of basic education. The capital investment in basic education is closely related to the regional economic development, it is clearly that, the economically developed regions can invest much more in basic education due to have adequate funding, so the basic education is better than the economically developing regions. Comparative analysis of the different levels of education investment in different region to economically development, it can better help the rational use of the limited funding for education in poor areas, making funding in a more rational way and structures investments in education, in order to achieve better education results.

Educational evaluation is to make recommendation and suggestion for education reform. There are many methods for it. R.W. Tayler, the professor in the Institute of Educational Sciences at Ohio State University, has said that evaluation is the extent to which the curriculum and teaching programs achieve goals in the process of teaching a measure. L.D.Stufflebeam proposed CIPP evaluation model(context, input, process and production evaluation). In China, Professor Liu ZhiJun pointed out that education should be evaluated in accordance with the goals and objectives of education, and the goals of basic education are services for all school-age children, and provide the basic necessarily knowledge for the next stage of learning.

HuBei Province is located in the central of China, compared with developed areas such as BeiJing and ShangHai, the economic development is lagging behind. But it has some advantages compared with some other inland provinces too. So, the investment in basic education in HuBei is also in an intermediate state. Through comparative and analysis the different investment in different province, we can provide reasonable suggestions for the basic education investment in Hubei Province.

II. THE STUDY OBJECT, DATA AND METHODS

In this article, we choose three types of six regions based on different economic development. The first class is BeiJing and ShangHai, their economy developed and can invest more in education, so they have high quality of basic education. Such as ShangHai, which obtain an absolute score in PISA in 2012. The PISA (Program for International Student Assessment) is a coordinator for international student assessment program by OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). The second class is HuBei and JiangXi Province, which are located in the centre of China and have a developing economic, huge population and education population. The third class is GuiZhou and YunNan, which are relatively backward economic development and less investment in basic education.

Investment in basic education consists of two parts, respectively come from government departments and private consumption. In China main part of basic education investment is the local education government, it is closely related to the degree of regional economic development. Comparative analysis among different region of investment in education must take into account the differences in regional economic development. At the same time, the basic education is services for all school-age children, it also has a relationship with the population and the number of illiterate adults. So, these two indicators must also be taken into account.

The number of teachers and teachers' quality is closely related to the level of basic education. But in the actual study, we found that due to the level of quality of teachers on behalf of the teachers grade (regular teachers and senior teachers) is to decide by the regional educational governments. That means the proportion of senior teachers the relevant provisions of educational administration, it is based on the decision in accordance with the existing number of teachers in the region. So the comparison between the number of senior teachers in different regions is not practical significance, or that this number represents only the administrative capacity of each

provincial education government. Therefore, in this article process just only consider the absolute number of teachers and the ratio of teachers number in the total population (abled-bodied).

We selected nine objective variables, in Table 1, all the data came from each province Statistical Yearbook in the same year (2013).

	Beijing	ShangHai	HuBei	JiangXi	GuiZhou	YunNan
Population (10 thousand)	1510	1681	5086	3919	3378	4046
Adult literacy rate (15 and above)	0.0275	0.0381	0.0781	0.0496	0.1321	0.1374
Per capita GDP (100 thousand)	0.8050	0.8950	0.2550	0.1950	0.1160	0.1525
Education funds (100 million Yuan)	236.285	235.013	310.548	224.257	200.998	295.683
Per capita funds (thousand Yuan)	20.3416	18.1326	4.3901	3.2038	2.8342	4.189
Pro. of spending on education	0.0887	0.0678	0.1236	0.1275	0.1355	0.1435
personal consumption	0.0517	0.0567	0.061	0.0435	0.0481	0.0273
Pro. of full-time teachers	0.7616	0.7796	0.894	0.9388	0.9389	0.9277
Educators per thousand population	84.4176	73.2247	93.2527	100.6316	107.3283	106.1775

Table 1: The data about investment in basic education

The data in Table 1 as the data matrix X , units of each index are not the same, therefore cannot be directly calculated and compared. In this article, we study the differences between the various regions content data, or it can be expressed as the distance between the different region. So, use the Formula (1), we get computing matrix Y .

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_{\bullet j}}{\max x_{\bullet j} - \min x_{\bullet j}} \quad (1)$$

Assuming that the evaluation index has established a reasonable weight matrix P , it means the right of the first evaluation indexes weights. It is obviously that after complete and normalization, the matrix P should satisfy the condition $\sum p_j = 1$ and $p_j \geq 0$. Now, we construct a function H to

calculate the weights. This Function H must have the following properties.

1. Symmetry: when the order of evaluation index change, the same evaluation index weight should remain unchanged, that means any two lines in calculating matrix changes the function value should remain unchanged.
2. Monotonic: the evaluating indicators more importantly, the resulting of function value should be greater.
3. Continuity: when the data of indicators are determined, the function must continuity in order of the final weight coefficient has a good calculated nature.
4. Additive property. If the evaluation object is divided into two parts can be added, then the weights for these must can be added too (It is obviously not need to satisfy linear). That, when $x_2 = y_1 + y_2$, it has

$$H(x_1, y_1, y_2) = H(x_1, x_2) + x_2 H\left(\frac{y_1}{x_2}, \frac{y_2}{x_2}\right).$$

According to the above analysis, we calculate the weight using Equation (2). This equation was called information entropy too.

$$H_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n a_{ij} \ln a_{ij} \quad (2)$$

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^m H_j} \quad (3)$$

Use this function, calculate the matrix Y , and results have to be normalization with Equation (3), we get the weight for indicator as Table 2, and use weight can get the of the score evaluation target as Table 3.

0.0068	0.0006	0.1916	0.1152	0.2015	0.1242	0.2033	0.1463	0.0105
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Table 2: The weight for indicator

III. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The main source of China's investment in basic education is to rely on the local (provincial) governments. When a region within the more developed economies, higher GDP, the investment in education is greater, so the evaluation of the third term heavily weighted. The Government's emphasis on basic education also determines the index weight major small factor in this regard is reflected in the per capita education investment, rather than the total investment in education large absolute amount of this point, so the right item 4 indicators major in item 3 indicators weights. While personal spending on education within the region indicates that the degree of attention to the education of the individual, and therefore a major item 7 Indexes.

According to the analysis, we give the following recommendations to Hubei Provincial Government.

1. Improve the efficiency of investment in education. The Per capita fund in HuBei is higher than economically underdeveloped areas, but the efficiency is not enough.

2. In HuBei province, the personal consumption is highest, even more the developed region.

Yunnan	Guizhou	Jiangxi	Hubei	Shanghai	Beijing
27.5128	22.9704	26.6492	34.5848	11.4308	10.268
0.00008244	0.00007926	0.00002976	0.00004686	0.00002286	0.0000165
0.029219	0.0222256	0.037362	0.048858	0.171482	0.154238
34.06268	23.15497	25.83441	35.77513	27.0735	27.22003
0.844084	0.571091	0.645566	0.884605	3.653719	4.098832
0.017823	0.016829	0.015836	0.015351	0.008421	0.011017
0.00555	0.009779	0.008844	0.012401	0.011527	0.010511
0.135723	0.137361	0.137346	0.130792	0.114055	0.111422
1.114864	1.126947	1.056632	0.979153	0.768859	0.886385
63.72283	48.00968	54.38552	72.43114	43.23238	42.76045

Table 3 score of basic education investment in different region

The Government must take the necessary measures to mitigate the personal investment in education. It does not significantly reduce the overall effect of education.

3. Relatively speaking, the economically developed regions will reduce the number of per capita teachers. That shows the efficiency of teachers is improving. The government should strengthen the training of teachers, improve teacher quality. This will not only reduce investment in education, but also can improve the quality of education. So that in particular, it should be taken seriously.

References

- [1] Luo Jin. Principles and examples of using information entropy to calculate weight[J]. Journal of WuHan Textile University. 6-2014:86-89.
- [2] Zhao YaLi. Research entropy method for a class of complex systems[D]. Chinese Academy of Sciences Institute of Automation. 2005:64-65.
- [3] Liu JinSheng, Wei YiQiang and Wang XuZhu. Re-establish its authority calculation interval number judgment matrix [J]. Systems engineering. 11(3)-1993:42-52.
- [4] Liu WenJun. A property right in a row Domain Decision Table weight determination method [J]. Fuzzy Systems and Mathematics. 22(3)-2008:161-166.

A Comparative Analysis of the Results IDSEI Modeling in China

Xiang Xiao Gang
Wuhan Textile University
Wuhan, Hubei, China
xiangxg81@163.com

Abstract — Based on the recent four years statistical data of China, the paper analyses the index of development of social and economic infrastructure (IDSEI) of china. The paper makes the conclusion that the eastern coastal provinces have the developed economy and the western frontier provinces have much land and few people. These can form a relatively high IDSEI. While in the west the economy is underdeveloped and the environmental pollution is serious, which forms a low IDSEI.

Keywords — regional economy; socio-economic infrastructure; IDSEI; underdevelopment; information management software

I. INTRODUCTION

The Chinese economy has got a great achievement. During the past more than 30 years, the Chinese economy scale has increased from about 260 billion dollar in 1978 to more than 10000 billion dollar in 2014. It increased about 38 times.

In 2014 the APEC ended in November. It announced to accelerate the economic development in Beijing, in the Asia Pacific region's infrastructure projects, through the integration of the implementation process, at the national and international levels.

In the development of national conditions, the infrastructure should catch up with the development of national economic policy. This can be the key basis of accelerating economic growth and people's quality of life. The realization of the strategic transformation of national infrastructure priority areas (territory) rating for infrastructure projects focuses on the resources of the preferential attachment.

Now Chinese economy is in the key time of the transformation. China initiates the Asia Infrastructure Investment Bank (AIIB) and the "One Belt and One Road" project. The amount of capital will reach hundreds of billions of dollars. Although the scale of the AIIB is smaller than the World Bank (WB) and the Asian Development Bank (ADB), the establishment of AIIB is seen as a challenge initiated by the emerging countries to the traditional world economic order. The Founding member of the AIIB has reached to 57 countries in May of 2015 all over the world, and it may lead a new development to the world economy. It means that there is a huge demand for the investment in the construction of infrastructure in the Asia Pacific Region and other continents.

In the central region of china the IDSEI has been analyzed [2]. So in this paper it is planned to make the same research in the whole China.

II. IDSEI MODEL

First of all, there should be some explanation. According to the Statistical Yearbook of China from 2009 to 2013 and the Chinese economy situation [3], there are some assumptions as follows.

In the model of IDSEI, it contains the index of the social factors I_{soc} and the industrial factors I_{ter} . $0 < IDSEI < 1$. And

$$IDSEI = \frac{1}{3} I_{soc} + \frac{2}{3} I_{ter} \quad (1)$$

The I_{soc} is the socially demographic factor. It contains four factors, and they are defined as I_k , the index of the economically active population; I_p , the index of the regional GDP per capita; I_h , the index of the per capita housing area and I_c , the index of the education and medical treatment. The value of I_{soc} is between 0 and 1.

$$I_{soc} = \frac{1}{4} (I_k + I_p + I_h + I_c) \quad (2)$$

I_c is contained by I_{c1} , the index of the number of teachers per thousand people and I_{c2} , the index of the number of doctors per thousand people.

$$I_c = \frac{1}{2} (I_{c1} + I_{c2}) \quad (3)$$

The I_{ter} is the industrial factor. It is composed by three factors, and they are defined as I_{tr} , the index of the transportation network; I_z , the index of the ecological environment and I_w , the index of the freshwater supply. The value of I_{ter} is between 0 and 1.

$$I_{ter} = \frac{1}{3} (I_{tr} + I_z + I_w) \quad (4)$$

I_{tr} is contained by I_{tr1} , the index of the length of highway per ten thousand people and I_{tr2} , the index of the length of railway per ten thousand people.

$$I_{tr} = \frac{1}{2} (I_{tr1} + I_{tr2}) \quad (5)$$

I_z is contained by I_{z1} , the index of the amount of exhaust gas emissions of sulfur dioxide per capita and I_{z2} , the index of the amount of wastewater discharged per capita.

$$Iz = 1 - \frac{1}{2}(Iz1 + Iz2). \quad (6)$$

In the whole, it is considered that industrial index is more important than the socially demographic index. $0 < IDSEI < 1$, The fact that of the value of IDSEI approaches 1 will demonstrate a more socialized and more industrialized region.

According to the assumptions above, it is necessary to standardize the data. The min-max method is used to normalize the data. It is assumed as follows.

$$IX = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (7)$$

And x can be replaced by variables of $I_k, I_p, I_h, Ic1, Ic2, Itr1, Itr2, Iz1, Iz2$ and Iw .

III. DATA AND FIGURES

In China there are 31 provinces including 4 Municipalities. The data could be computed and processed by using the formulas (1)-(7) mentioned above. During the process it should be illustrated that some province data is missing such as the Inner Mongolia province, Jilin province and Yunnan province. So the data of these provinces are not included in the computation and the result of the IDSEI also does not contain these provinces.

It gets the result of IDSEI in table 1.

year	province	I_{sqc}	I_{tr}	IDSEI
2,012	Hainan	0.41	0.47	0.45
2,012	Hebei	0.52	0.40	0.44
2,012	Heilongjiang	0.39	0.55	0.50
2,012	Henan	0.68	0.40	0.49
2,012	Hubei	0.53	0.47	0.49
2,012	Hunan	0.56	0.46	0.49
2,012	Jiangsu	0.64	0.50	0.55
2,012	Jiangxi	0.54	0.45	0.48
2,012	Jilin	0.45	0.48	0.47
2,012	Liaoning	0.43	0.43	0.43
2,012	Ningxia	0.43	0.49	0.47
2,012	Qinghai	0.31	0.58	0.49
2,012	Shaanxi	0.41	0.40	0.40
2,012	Shandong	0.68	0.39	0.49
2,012	Shanghai	0.27	0.50	0.42
2,012	Shanxi	0.53	0.36	0.42
2,012	Sichuan	0.50	0.41	0.44
2,012	Tianjin	0.56	0.40	0.45
2,012	Tibet	0.44	0.68	0.60
2,012	Xinjiang	0.49	0.77	0.68
2,012	Zhejiang	0.59	0.47	0.51

Table 1: data of the $IDSEI$ of China from 2009 to2012

The $IDSEI$ data can be transformed to the figure 1 to figure 4 as follows by information management software of SPSS.

year	province	I_{sqc}	I_{tr}	IDSEI
2,011	Liaoning	0.41	0.41	0.41
2,011	Ningxia	0.40	0.49	0.46
2,011	Qinghai	0.30	0.59	0.49
2,011	Shaanxi	0.40	0.39	0.39
2,011	Shandong	0.66	0.38	0.48
2,011	Shanghai	0.26	0.49	0.41
2,011	Shanxi	0.52	0.34	0.40
2,011	Sichuan	0.49	0.40	0.43
2,011	Tianjin	0.52	0.38	0.43
2,011	Tibet	0.44	0.71	0.62
2,011	Xinjiang	0.47	0.73	0.64
2,011	Yunnan	0.48	0.40	0.43
2,011	Zhejiang	0.57	0.47	0.50
2,012	Anhui	0.50	0.45	0.47
2,012	Beijing	0.49	0.45	0.46
2,012	Chongqing	0.43	0.40	0.41
2,012	Fujian	0.58	0.49	0.52
2,012	Gansu	0.43	0.42	0.42
2,012	Guangdong	0.66	0.48	0.54
2,012	Guangxi	0.41	0.48	0.46
2,012	Guizhou	0.40	0.35	0.37

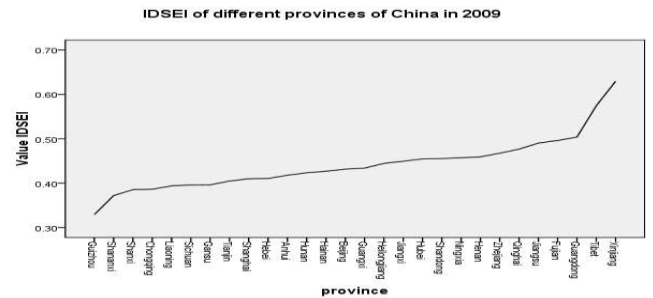


Figure 1: figure of the $IDSEI$ of China in 2009

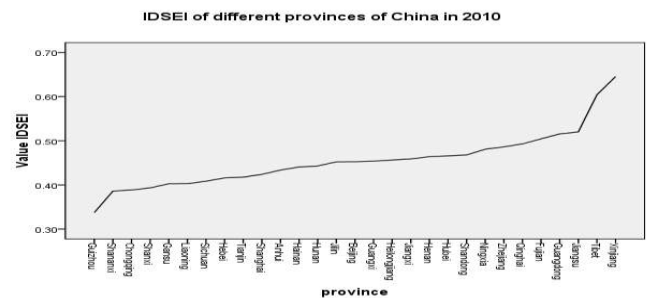


Figure 2: figure of the $IDSEI$ of China in 2010

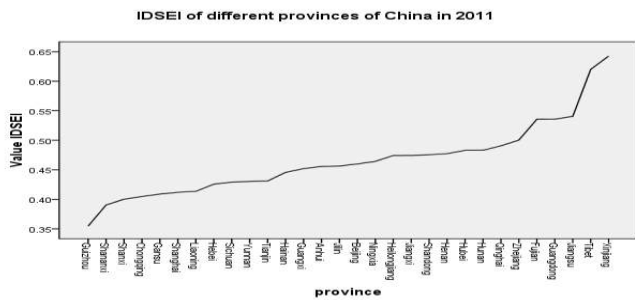


Figure 3: figure of the *IDSEI* of China in 2011

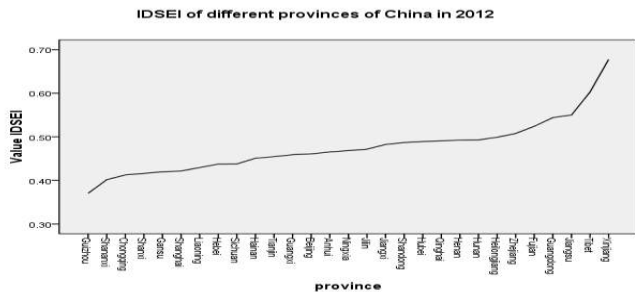


Figure 4: figure of the *IDSEI* of China in 2012

IV. DATA AND FIGURES ANALYSIS

Figure 1 shows that the top five IDSEI provinces in 2009 are Xinjiang of 0.63, Tibet of 0.57, Guangdong of 0.50, Fujian of 0.50 and Jiangsu of 0.49. The after five provinces are Guizhou of 0.33, Shaanxi of 0.37, Shanxi of 0.39, Chongqing of 0.39 and Liaoning of 0.39. And the capital Beijing IDSEI is 0.43.

Figure 2 shows that the top five IDSEI provinces in 2010 are Xinjiang of 0.65, Tibet of 0.60, Jiangsu of 0.52, Guangdong of 0.52 and Fujian of 0.50. The after five provinces are Guizhou of 0.34, Shaanxi of 0.39, Chongqing of 0.39, Shanxi of 0.39 and Gansu of 0.40. And the capital Beijing IDSEI is 0.45.

Figure 3 shows that the top five IDSEI provinces in 2011 are Xinjiang of 0.64, Tibet of 0.62, Jiangsu of 0.54, Guangdong of 0.54 and Fujian of 0.54. The after five provinces are Guizhou of 0.35, Shaanxi of 0.39, Shanxi of 0.40, Chongqing of 0.40 and Gansu of 0.41. And the capital Beijing IDSEI is 0.46.

Figure 4 shows that the top five IDSEI provinces in 2012 are Xinjiang of 0.68, Tibet of 0.60, Jiangsu of 0.55, Guangdong of 0.54 and Fujian of 0.52. The after five provinces are Guizhou of 0.37, Shaanxi of 0.40, Chongqing of 0.41, Shanxi of 0.42 and Gansu of 0.42. And the capital Beijing IDSEI is 0.46.

Taken together, in the past 4 years, the provinces of the higher IDSEI are Xinjiang, Tibet, Jiangsu, Guangdong and Fujian. A high index means that, for these provinces, the overall level of social population environment factor and industrial factor are high. Xinjiang and Tibet are in the western frontier region of China, they have much land, few people, rich resources, less industries and less pollution. A good social environment population factor leads to a higher IDSEI. At the same time, Jiangsu, Guangdong and Fujian are in coastal zone of China and they have a high level of economic development and a good socio-economic infrastructure. The higher industrial development factor leads to a higher IDSEI.

However, the provinces of the lower IDSEI are Guizhou, Shaanxi, Chongqing, Shaanxi, Gansu and Liaoning. A lower index means that, for these provinces, the overall level of social population environment factor and industrial factor are low. These provinces generally are in the western part of China, Belonging to the underdeveloped economy regions. And in these areas, environment is relatively bad with more population and serious pollution. So the social population environment factor and the industry factor are not high.

V. CONCLUSIONS

The result basically introduces the status of Chinese IDSEI: the eastern coastal provinces have the developed economy and the western frontier provinces have much land and few people. These can form a relatively high IDSEI. While in the west the economy is in the state of underdevelopment and the environmental pollution is serious, which forms a low IDSEI.

The government can make a relatively more infrastructure investment and social-environmental governance in the underdeveloped region to improve the economy level and the social population environment level.

References

- [1] A. Ilchenko, Ma Jun. Integrated Estimation of the Level of Development of the Social and Economic Infrastructure of Region [J].Modern High Technologies. Regional Application. 2012(4) : 37-42.
- [2] Xiang Xiao Gang, Luo Jin, Luo Juan. The Analysis of the Index of Development of Social and Economic Infrastructure of Central Region of China. Modern high technologies regional application[J].2014, 39(3) : 84-88.
- [3] National Bureau of Statistic of China. China Statistical Yearbook [M].Beijing: China Statistic Press, 2009-2013.
- [4] Zhang Wen Tong. SPSS Statistical Classification Advanced Tutorial [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.

Алгоритм сегментации бинарного изображения

В.Д. Филимонова
ИГЭУ
Иваново, Россия

В данной статье рассмотрен алгоритм выделения сегментов на бинарном изображении, разработанный с целью максимально эффективной сегментации больших изображений без потери их качества. Помимо предложенного алгоритма будут кратко описаны традиционные подходы к сегментации: исчерпывающий поиск, последовательное сканирование. Сравнение с другими подходами покажет целесообразность использования данного алгоритма.

Ключевые слова — сегментация, бинарное изображение, эффективность.

Binary image sermentation algorithm

Valeriia Filimonova
ISPU
Ivanovo, Russian Federation

In the present article the algorithm of binary picture region selection is presented. This algorithm was created to segment large images as smoothly as possible without loss of quality. Besides the suggested algorithm conventional approaches will be described briefly: exhaustive search, batch scanning. Comparison with other approaches will prove the reasonability of using that method.

Keywords — segmentation, binary image, efficiency.

I. ВВЕДЕНИЕ

Пусть имеем некоторую нейрокомпьютерную сеть, которая распознает буквы некоторого алфавита. В качестве образа сеть принимает бинаризованное изображение некоторого символа. Пользователь имеет возможность загрузить изображение из файловой системы или сделать снимок с использованием веб камеры, если таковая имеется. Ограничение на количество букв, содержащихся на пользовательском изображении, не накладывается. А поскольку сеть распознает буквы по отдельности, сначала необходимо решить задачу выделения отдельных символов.

Традиционно выделяют два подхода к выделению объектов на бинарном изображении: рекурсивный и итеративный. Каждый из этих методов потребует много памяти и времени выполнения, особенно если речь пойдет об изображениях больших размеров, которые как раз и будут получены при использовании веб камеры. А пользователь вряд ли захочет ждать. Соответственно, больше пары секунд на обработку миллионов пикселей у нас нет.

Может встать вопрос о том, а почему бы нам не сжать изображение перед выделением сегментов, чтобы снизить количество обрабатываемых пикселей. Ответ будет таков:

при сжатии не только потеряется часть качества изображения (которое может быть и так плохим), но и некоторые мелкие детали, которые могут оказаться решающими при определении образа к тому или иному классу.

Таким образом, встает задача о том, как оптимальным образом выделить не сегменты на бинарном изображении, не жертвуя его качеством и не требуя больших затрат ресурсов от вычислительной машины.

II. ОНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Прежде чем перейти к описанию алгоритмов введем необходимые понятия, которые будут встречать на протяжении всей статьи.

Сегментация – процесс разделения цифрового изображения на сегменты с целью упрощения или изменения представления изображения. На практике сегментация применяется для выделения объектов на спутниковых снимках, для обнаружения патологий на медицинских изображениях, для распознавания лиц, отпечатков пальцев и т.д.[1]

Бинарное изображение – изображение, содержащее пиксели только черного и белого цветов.

Связная область - множество пикселей, у каждого из которых есть хотя бы один сосед, принадлежащий данному множеству. Виды связности:

- 4-х связность – соседями для пикселя считаются 4 пикселя: сверху, слева, справа, снизу;
- 8-ми связность – соседями для пикселя считаются 8 пикселей: все к нему прилежащие, в том числе и по диагонали.[2]

III. КРАТКИЙ ОБЗОР ТРАДИЦИОННЫХ ПОДХОДОВ

A. Исчерпывающий поиск

Данный алгоритм также называют методом перебора. Он заключается в рекурсивном обходе всех пикселей. Находится первый черный пиксель и помечается некоторым числом. Далее рассматривается один из его соседей (в зависимости от того, какой тип связности используется), если он – черный, ему присваивается та же метка, что и первому. Затем рассматривается его сосед и т.д., до тех пор, пока не будет найден пиксель, у которого нет непомеченных «черных» соседей. Как только он найден, возвращаемся к пикселю, который рассматривали до этого и перебираем остальные непомеченные черные пиксели, соседние к нему. В общем, алгоритм может быть описан следующим псевдокодом: [2]

```
void Labeling(BIT* img[], int* labels[]) {
    L=1;
    for(y = 0; y < H; y++){
        for(x = 0; x < W; x++){
            Fill(img, labels, x, y, L++);
        }
    }
    void Fill(BIT* img[], int* labels[], int x, int y, int L){
        if(labels[x][y] == 0 && img[x][y] == 1){
            labels[x][y] = L;
            if(x > 0)
                Fill(img, labels, x-1, y, L);
            if(x < W-1)
                Fill(img, labels, x+1, y, L);
            if(y > 0)
                Fill(img, labels, x, y-1, L);
            if(y < H-1)
                Fill(img, labels, x, y+1, L);
        }
    }
}
```

Недостатки метода на лицо. Он не практичен, т.к. требуется большое количество памяти для хранения помеченных пикселей. Кроме того, по мере увеличения поля, будет значительно расти и время выполнения алгоритма. В конечном итоге для достаточно больших изображений может быть получена слишком глубокая рекурсия, ведущая к ошибкам работы системы.

B. Последовательное сканирование

Как и предыдущий данный алгоритм требует обхода всех пикселей, лишь с той разницей, что рассматриваются они последовательно друг за другом, а не рекурсивно. Начинается обход изображения, из левого верхнего угла сверху вниз, справа налево. Понятно, что при таком порядке обхода у текущего рассматриваемого пикселя верхний и левый сосед уже должны быть размечены.

Просматриваем пиксель А (Рис.1), если он белый, то не делаем ничего. Если он черный, а пиксели В и С не помечены (т.е. являются белыми), то увеличиваем последнюю использованную метку на 1 и присваиваем новую метку пикселю А. Если же один из пикселей (или оба) В и С помечены, то пикселю А присваивается любая из меток.

После того как мы обошли всю картинку, нам нужно совершить ещё один обход и произвести переразметку с учётом эквивалентности областей.[2] Таким образом, сразу отметим, что обходятся и помечаются все пиксели, причем дважды. Для больших изображений затраты на хранение меток и время на обход всех пикселей будут чрезмерными.

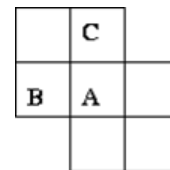


Рис. 1 Метод последовательного сканирования

В общем, алгоритм может быть описан следующим псевдокодом:[2]

```
if A = 0
    do nothing
else if (not B labeled) and (not C labeled)
    increment label numbering and label A
else if B xor C labeled
    copy label to A
else if B and C labeled
    if B label = C label
        copy label to A
    else
        copy either B label or C label to A
record equivalence of labels
```

C. Выделение контуров

Данный метод был искусственно получен в процессе решения поставленной задачи и нигде больше не использовался. В основе данного метода лежит нахождение контуров фигур с помощью оператора Собеля. Для хранения контура нужно меньшее количество памяти, и, соответственно, выделение области будет более быстрым за счет уменьшения числа пикселей, которые придется проверять на соседство.

Оператор Собеля вычисляет градиент яркости изображения в каждой точке. Так находится направление

наибольшего увеличения яркости и величина её изменения в этом направлении. Результат показывает, насколько «резко» или «плавно» меняется яркость изображения в каждой точке, а значит, вероятность нахождения точки на грани, а также ориентацию границы.[3]

Поскольку наша задача выделить сегменты, а не контуры изображения, мы используем данное преобразование для получения меньшего числа смежных точек для последующей обработки. Поскольку некоторые сегменты могут состоять из нескольких несвязанных контуров (например, буква О), нужно добавить проверку на вложенность областей, содержащих контуры.

Несмотря на два вложенных цикла, путем не сложных заключений и по результатам экспериментов можно сделать вывод, что данный метод даст результаты более близкие к желаемым, чем первые два метода.

IV. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

В данном методе будем рассматривать восьмисвязные пиксели, а также пиксели, связанные непрерывным вертикальным (Рис.2) или горизонтальным (Рис.3) рядом.

Сам алгоритм разобьем на несколько процедур. Процедура «обхода» заключается в поиске самых «верхних» и самых «левых» черных пикселей на заданном участке изображения. Т.е. проходя во всей ширине заданного участка, мы спускаемся вниз до первого черного пикселя, а затем идем по высоте, отмечая первый черный пиксель в ряду. Отмеченные пиксели будем сразу же объединять в области, исходя из введенных понятий связности. Сюда же включим процедуру «проверки на объединяющий пиксель», которая проверяет принадлежность найденного пикселя к нескольким областям.

Процедура «поиска границ» заключается в нахождении левой верхней и нижней правой точек в рамках одной области. Эта процедура позволяет хранить лишь границы области и впоследствии отказаться от хранения ненужной информации.

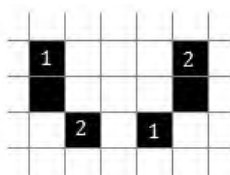


Рис. 2 Вертикальная связность



Рис. 3 Горизонтальная связность

После того, как мы совершили первый обход, из сформированных областей выбираем ту, которая ближе всех к верхнему левому углу изображения. На Рис.4

цифрами от 1 до 4 помечены четыре области, найденные после первого прогона алгоритма, причем первая будет выделена в сегмент, как самая близкая к левому верхнему углу.

Следующие действия повторяются до тех пор, пока при процедуре обхода не найдутся новые черные пиксели:

- 1) Совершаем обход, но теперь уже не по всей ширине и высоте изображения, а строго под сегментом, выбранным на предыдущем шаге, и справа от него. На Рис.4 серым отмечены области, в которых будет осуществляться поиск новых черных пикселей. После второго обхода к третьей области добавятся точки, помеченные как 5, а точка с маркером 6 объединит вторую и четвертую области.
- 2) Выбираем область, ближайшую до пикселя с координатами (0,0). Поскольку $b^2 + l^2 < 2^2 + 6^2$, следующим сегментом станет область 3.
- 3) Найденный сегмент проверяем на связность с уже выделенными. Связными будем считать сегменты, которые имеют общие точки или связные пиксели на смежных границах. Данная процедура необходима, т.к. при сегментации больших изображений сегменты дробятся из-за шумов, получаемых при бинаризации. По этой же причине сегменты шириной (высотой) в 1 пиксель просто исключаются из дальнейшего рассмотрения. В случае если последний выбранный сегмент был исключен, обход не совершается до тех пор, пока не будет выбран новый сегмент.

Прежде чем укажем недостатки и достоинства этого метода, сравним его работу с работой рассмотренных ранее подходов.

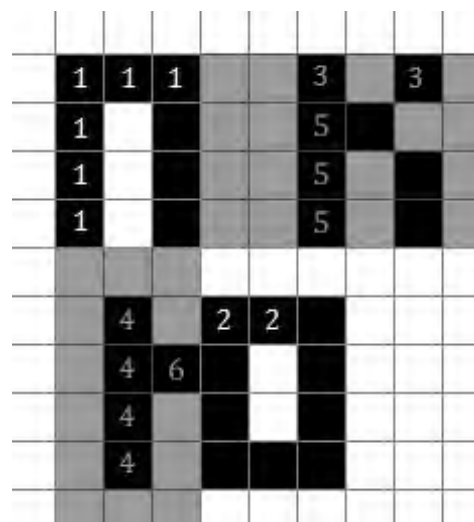


Рис. 4 Иллюстрация работы алгоритма

V. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Чтобы сравнить приведенные выше алгоритмы, применим их к изображениям разных размеров, разного качества и с разным количеством сегментов. Оценивать алгоритмы будем в зависимости от времени поиска сегментов и правильности их нахождения. Анализ был проведен на большом количестве различных данных,

поэтому приведем лишь часть (см. Таблицу 1). Прочерк в колонке Время таблицы означает, что данный алгоритм не смог выделить сегменты на данном изображении.

Таблица 1. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ

Размер изображения	Кол-во сегментов	Алгоритм	Время (сек)
220x182 пикселей	8	Исчерпывающий поиск	3,078
		Последоват.сканирование	0,851
		Выделение контуров	1,504
		Предложенный алгоритм	0,093
317x239 пикселей	44	Исчерпывающий поиск	3,148
		Последоват.сканирование	0,082
		Выделение контуров	4,999
		Предложенный алгоритм	0,349
234x276 пикселей	23	Исчерпывающий поиск	8,947
		Последоват.сканирование	0,088
		Выделение контуров	2,672
		Предложенный алгоритм	0,109
945x1265 пикселей	1	Исчерпывающий поиск	-
		Последоват.сканирование	70,13
		Выделение контуров	15,646
		Предложенный алгоритм	0,784
1249x1098 пикселей	7	Исчерпывающий поиск	-
		Последоват.сканирование	46,613
		Выделение контуров	50,939
		Предложенный алгоритм	6,894
1344x1725 пикселей	4	Исчерпывающий поиск	-
		Последоват.сканирование	>300
		Выделение контуров	54,261
		Предложенный алгоритм	4,646
1190x2174 пикселей	6	Исчерпывающий поиск	-
		Последоват.сканирование	-
		Выделение контуров	130,122
		Предложенный алгоритм	5,61

По результатам эксперимента было выяснено, что рекурсивный метод окажется бесполезным в случае, если буква представлена большим количеством пикселей (400x500), т.к. рекурсия окажется слишком глубокой. А время выполнения двух других методов существенно вырастет с размерностью изображения. При всем при этом на изображениях с большим количеством сегментов, как в

изображении второго теста, ни один из алгоритмов не выделил все сегменты, т.к. они были представлены не более чем 10 пикселями.

Таким образом, к достоинствам предложенного алгоритма можно отнести:

- быстрее традиционных методов
- не требует большого объема памяти
- устойчив к шумам

Но как у любого подхода у него есть и недостатки:

- буквы, области которых пересекаются, относятся к одному сегменту
- точность выделения зависит от количества образов и числа пикселей, которыми данный образ представлен

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как мы видим, предложенный метод полностью решает поставленную задачу, с которой обычные методы не справились: эффективен по времени, не требует выделения большого числа ресурсов, не влияет на качество изображения или выделенных сегментов. Но кроме того данный подход накладывает определенный ограничения на расположения сегментов между собой.

Поскольку точность выделения будет зависеть от количества образов и числа пикселей, которыми образ представлен, алгоритм будет хорош при выделении крупных образов, когда требуется точность выделяемых образов наряду со временем выделения, но не точен при распознавании текста, представленного мелкими буквами и знаками, например, лист А4 формата, заполненный стандартным печатным текстом.

Список литературы

- [1] Википедия – Сегментация (обработка изображений) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз.рус.
- [2] Вежневцев А. Выделение связанных областей в цветных и полутоновых изображениях [Электронный ресурс]/ Сетевой журнал. Компьютерная графика и мультимедиа. – Режим доступа: <http://cgm.computergraphics.ru/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз.рус.
- [3] Хабрахабр – Метод нахождения границ изображения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://habrahabr.ru/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз.рус.

References

- [1] Wikipedia – Segmentation (Image processing) [Digital resource]. – Access mode: <https://ru.wikipedia.org/>, free. – Russian language.
- [2] Vezhnevcev A. Selection of connecting regions on color and halftone pictures [Digital resource]/ Network log. Computer graphics and multimedia. – Access mode: <http://cgm.computergraphics.ru/>, free. – Russian language.
- [3] Habrahabr – Method of finding image borders [Digital resource]. – Access mode: <http://habrahabr.ru/>, free. – Russian language.

Система семантического анализа научных коммуникаций

С.В. Путилов, А.А. Белов

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

Иваново, Россия

E-mail: ceregaputilov@gmail.com

Аннотация - представлена система обеспечения актуальной научной информацией инновационного образовательного процесса, построенная на базе разработанных методических и программных инструментариев.

Ключевые слова – знания, инновация, понятие, семантический системный анализ, коммуникации.

A semantic analysis of scientific communication's system

Sergey Putilov, Alexandr Belov

Ivanovo State Power Engineering University

Ivanovo, Russia

E-mail: ceregaputilov@gmail.com

Abstract – this article presents a system providing actual scientific information about innovative education process. The system is developed on methodical and program tools.

Key words – knowledge's, innovation, terms, semantics system analysis, communication

В процессе познания (непрерывный образовательный процесс) у человека возникает проблема, связанная с получением актуальных знаний по определенной предметной области, на понятном ему «языке». Философией и когнитивной психологией было доказано, что данная проблема решается в процессе коммуникации между экспертом и человеком, который нуждается в знаниях.

Видов коммуникаций огромное количество, мы рассматриваем основные из них – это коммуникация в виде обмена знаниями посредством печатных изданий (периодическая литература, учебные пособия и пр.) и диалог, а точнее его разновидность, представленная в Internet пространстве в виде специализированного форума, в рамках которого люди находят решение возникшей проблеме, путем непосредственного обмена сообщениями.

Исследованию научных коммуникаций посвящено множество работ, результаты которых, в основном, затрагивают синтаксические проблемы общения, в частности интенсивность, топологию коммуникаций и т.п. В данной работе рассматриваются возможности использования компьютерных средств для семантического анализа научных коммуникаций, в основе которых лежит информационная триада «термин» – «понятие» – «смысл», представленная на рисунке 1.

Любая информация, независимо от формы её представления, имеет идентичную структуру, в состав которой входят слова, в нашей интерпретации термины, соответствующие определенным понятиям, которые рождают в «голове человека» смысл.

Основным компонентом, входящим в состав системы семантического анализа научных коммуникаций, представленной на рисунке 2, является текстовый анализатор, позволяющий в

автоматическом режиме, при обработке любого объема текста получить терминологическое множество по проблеме. В отличие от существующих текстовых анализаторов, разработанный позволяет решать требуемые для целевого анализа задачи: подбор параметров анализа (например, выбор необходимых частей речи, и др.), удаление незначимых словоформ и концентрации основных терминов, отражающих главный смысл научных текстов. Полученное терминологическое множество передается эксперту для его необходимого редактирования и дополнения, на основе собственного понимания предметной области. Затем с использованием разработанных на основе законов инфометрии мощностных ограничений (мощность множества КС составляет 10-15 терминов, а мощность множества ИПС 250- 270 терминов, с учетом редактирования) и алгоритмов системой автоматически формируется множество ключевых слов ($M_{КС}$), необходимое для поиска актуальных источников знаний по проблеме, и понятийное множество ($M_{ИПС}$), используемое для создания иерархической понятийной структуры (ИПС), необходимой для контроля знаний по рассматриваемой предметной области, с использованием программного инструментария IntellectPro 3 [1].

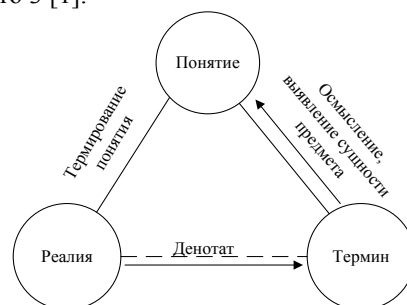


Рисунок 1 – «информационная» триада

Содержание

I. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

<i>А.С. Семенов, И.М. Чухин</i> Отладка и ввод в эксплуатацию двухцелевого лабораторного стенда по определению области применения уравнения Ван-дер-Ваальса и изучению эффекта Джоуля-Томсона	5
<i>В.И. Игонин, Н.В. Мнушкин</i> Особенности системного анализа энергетической установки через её удельные характеристики	8
<i>Д.А.Кругликов, Г.Н. Щербакова, В.В. Бухмиров</i> Расчет пластинчатого теплообменного аппарата	10
<i>Н.В. Власов</i> Разработка и внедрение лабораторного стенда «Установка обратного осмоса и химического обессоливания»	14
<i>Е.С. Егорова, И.М. Чухин</i> Отладка и ввод в эксплуатацию двух лабораторных стендов по определению изобарной теплоемкости воздуха	16
<i>В.М. Захаров, Н.Н. Смирнов, Е.С. Румянцев, А.С.Сафронов</i> Анализ энергоэффективности установки теплоотражающих экранов и приточных клапанов	19
<i>Н.А. Зуев, М.С Смирнов, И.В. Тетеревков</i> Идентификация объектов управления с помощью генетических алгоритмов	24
<i>В.О. Шатских, И.В. Тетеревков</i> Расчет показателей надежности систем автоматизации с применением полумарковских процессов	29
<i>Ю.Ю. Кольчугина</i> Актуальность модернизации автоматики теплового пункта ИвТЭЦ-3	33

II. ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ

<i>В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков, В.А. Дунаев</i> Повышение эффективности турбопитательных насосов АЭС с использованием нейросетевых технологий	37
<i>А.В. Дмуховская, М.Ф. Фадеева, Г.А. Шмелева</i> Моделирование магнитных полей однородно намагниченных тел	41
<i>Д.А. Долинин, Н.В. Кувшинов</i> Моделирование систем теплоснабжения с помощью программного модуля ANSYS FLUENT	45

III. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

<i>Г.В. Власов, Ю.А. Лавров</i> К вопросу о грозоупорности ультракомпактных воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ	50
<i>Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, И.А. Липужин, А.А Смирнов</i> Исследование устойчивости ветро-дизельной электростанции	54
<i>А.М. Захаров</i> Разработка программного интерфейса к лабораторной работе «Методы оперативного контроля короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя»	56
<i>А.Д. Бачурина, Т.Е. Шадриков, А.М.Соколов</i> К оценке КПД полупроводникового преобразователя напряжения повышенной частоты	60
<i>Е.Н. Соснина, Р.Ш. Бедретдинов, Д.С. Асташев</i> Исследование режимов работы и электромагнитной совместимости цифровой трансформаторной подстанции	64
<i>А.А. Дьячков, Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов</i> К вопросу о распределении напряжения по высоковольтной обмотке трансформаторов повышенной частоты	66
<i>А.Б. Лоскутов, А.А. Лоскутов, Д.В. Зырин, И.А. Лукичева</i> Алгоритм управления универсального узла нагрузки гексагональной распределительной сети	70
<i>А.О.Редькин, Н.Ю.Шевченко</i> Разработка концепции повышения надежности воздушных линий электропередачи в сложных метеорологических	73
<i>С.А. Словесный, Н.А. Фоменко, Н.В. Сялов</i> Оптимизация мостовой схемы регистрации частичных разрядов	75
<i>С.А. Занкович</i> Подавление высокочастотных перенапряжений, воздействующих на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена	81

<i>Ю.А. Секретарев, Я.В. Панова</i> Превентивное управление на ГЭС с позиции применения системы поддержки принятия решений	85
<i>Е.Н. Соснина, Е.В. Крюков, А.П. Шашкин, Л.Е. Веселов</i> Гибридный источник электроэнергии на твердооксидных топливных элементах	89
<i>Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов</i> Перспективы использования высоковольтных кабельных электропередач повышенной частоты в специальных электрических сетях	91
<i>Д.Е. Титов, С.А. Петренко, И.С. Шандриков</i> Устройство индикации пробоя изоляторов	93

IV. ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>С.Н. Удалов, А.А. Ачитаев, М.С. Юманов</i> Повышение запаса динамической устойчивости распределенных источников энергии с малой постоянной времени	96
<i>А.А. Муравьева</i> Исследование методов синтеза цифровых фильтров частотной коррекции электроприводов постоянного тока. Синтез режекторного фильтра	102
<i>А.А. Анисимов, В.И. Левин</i> Автоматическая настройка регуляторов состояния с использованием искусственной нейронной сети	106
<i>И.А. Кравале, Д.А. Сапига</i> Виртуальная лаборатория исследования колебаний	108
<i>А.А. Голяс, А.М. Власов, В.А. Полетаев</i> Применение программы ANSYS для теплового анализа магнитожидкостных герметизаторов	110
<i>А.В. Федорова, А.М. Власов, В.А. Полетаев</i> Визуализация поверхности деталей узлов трения	113
<i>М.А. Ноздрин, К.П. Бондарев</i> Нейтральная поверхность детали при сложном нагружении	116
<i>К.Н. Панченко, Т.Ю. Степанова</i> Расчет на износ металлической нити	118
<i>А.А. Коровкин, И.И. Ведерникова</i> Исследование коррозионной стойкости упрочненной поверхности	121
<i>Ю.Б. Казаков, Ю.И. Бондаренко</i> Влияние несинусоидальности питающего напряжения на виброшумовые характеристики асинхронных двигателей	123
<i>Я.А. Зверев, Ю.Б. Казаков</i> Анализ теплового состояния тягового асинхронного двигателя гибридного транспорта	127
<i>В.Н. Караулов, С.В. Жуков</i> Параметрическая модель для расчета электромагнитных процессов в гибридном шаговом двигателе	129
<i>И.В. Вершинин, В.В. Тютиков</i> Синтез параметрически грубых систем модального управления.	135

V. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>К.О. Егорова, А.В. Голубев</i> Особенности реализации сложных функций АСУТП с использованием тренажеров	140
<i>А.М. Садыков, Д.Д. Кайзер</i> Разработка интернет-ресурса для анализа мест размещения объектов торговли в городе Иваново	142
<i>А.М. Садыков, М.Д. Кайзер</i> Разработка веб-приложения для выбора мест проживания в городе Иваново с учетом пространственных критериев	146
<i>С.С. Бокарев</i> Параллельное моделирование смешивания газовых потоков при поперечном взаимодействии	150
<i>А.А. Гудухина</i> Поиск безусловного экстремума функции методом тяжелого шарика с использованием параллельных технологий	154
<i>М.А. Лобанов</i> Особенности реализации модифицированного топологического метода для определения показателей надежности технических систем	158
<i>О.В. Мозговая, И.А. Данилушкин</i> Разработка системы автоматической стабилизации температуры в нагревательной печи	162
<i>Д.С. Сенин, Г.Е. Веселов</i> Метод Монте-Карло, его распараллеливание и приложения	166
<i>И.А. Закурин, Ф.Н. Ясинский, С.Г. Сидоров</i> Решение уравнений Навье-Стокса для течения вязкой несжимаемой жидкости в полости с действующей силой и увеличивающимся числом Рейнольдса в переменных «функция тока - завихренность»	170

<i>А.Б. Гадалов, К.Ю. Поспелов</i> Разработка симулятора работы компьютерной сети на канальном уровне модели OSI	172
<i>А.А. Белов, М.А. Николаев</i> Особенности интеграции информационного портала в образовательной деятельности	174
<i>Luo Jin</i> A Comparative Study of Basic Education investment Between different regions (In China)	176
<i>Xiang Xiao Gang</i> A Comparative Analysis of the Results IDSEI Modeling in China	179
<i>В.Д. Филимонова</i> Алгоритм сегментации бинарного изображения	182
<i>С.В. Путилов, А.А. Белов</i> Система семантического анализа научных коммуникаций	186

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

«ЭНЕРГИЯ-2015»

ДЕСЯТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

Сборник конкурсных докладов

Печатается в авторской редакции

Ответственный за выпуск Макаров А.В.
Технический редактор Вольман М.А.
Компьютерная верстка – Фомичева А.В.
Дизайн – Смирнов Н.Н.

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Печать плоская. Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 12,3.
Тираж экз. Заказ № .
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И. Ленина»
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

