

СЕКЦИЯ 14

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Председатель – к.т.н., доцент **Лебедев В.Д.**
Секретари – аспирант **Можжухина В.В.**,
магистрант **Филатова Г.А.**

*Г.А. Филатова, магистрант;
рук. В.А. Шуин, д.т.н., профессор,
В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

О ПОДХОДАХ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Введение. Постановка задачи. Принципы выполнения защит от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) зависят прежде всего от режима заземления нейтрали сети 6 – 10 кВ [1]. В сетях, работающих с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, основное применение получили токовые и токовые направленные защиты нулевой последовательности (ТЗНП и ТНЗНП), основанные на использовании токов и напряжений промышленной частоты. В компенсированных сетях 6 – 10 кВ применяются также защиты от ОЗЗ, основанные на использовании высших гармоник (ВГ) установившегося режима замыкания или электрических величин переходного процесса. Для защит, основанных на использовании различных составляющих тока установившегося режима ОЗЗ (токов промышленной частоты, высших гармоник), токи переходного процесса являются помехами, оказывающими влияние на динамическую устойчивость их функционирования (устойчивость в условиях влияния на работу релейной защиты электромагнитных переходных процессов [2]). Для защит, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, последние являются информационными сигналами.

Защиты от ОЗЗ в сетях 6 – 10 кВ по цепям тока подключаются к кабельным трансформаторам тока нулевой последовательности (ТТНП) ти-

па ТЗ, ТЗЛ, ТЗЛМ, ТЗРЛ и др., часто работающих с большими вторичными нагрузками. Работа указанных ТНП на высших гармониках и в переходных режимах, особенно при больших вторичных нагрузках, практически не исследована. Поэтому для разработки эффективных защит от ОЗЗ для сетей 6 – 10 кВ с различными режимами заземления нейтрали необходимы математические модели ТНП указанных выше типов, имитирующие их работу не только в установившихся, но и в переходных режимах.

В работе исследованы два подхода к построению математической модели ТНП, основанных, соответственно:

- 1) на использовании основной кривой намагничивания (ОКН) магнитопровода ТНП;
- 2) на использовании средней кривой намагничивания (СКН) магнитопровода ТНП.

Математическая модель ТНП на основе ОКН. В большинстве случаев для построения математической модели нелинейного электротехнического устройства, содержащего магнитопровод из электротехнической стали, принято использовать ОКН [3]. Точность такой математической модели существенно повышается, если использовать экспериментально снятую ОКН ТНП. С учетом этого в работе использовалась полученная экспериментально с применением программно-инструментального комплекса NI LabView и источника первичного синусоидального тока ОКН наиболее широко применяемого в защитах от ОЗЗ ТНП типа ТЗЛМ (рис. 1).

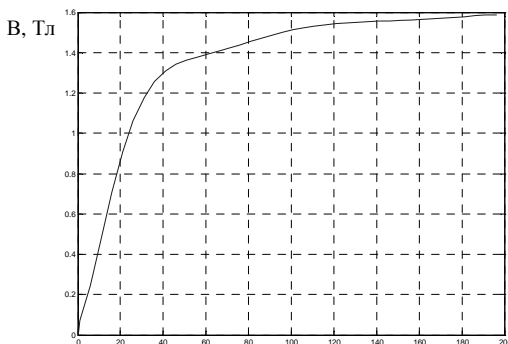


Рис. 1. ОКН магнитопровода ТНП типа ТЗЛМ

С использованием ОКН по рис. 1 в программном комплексе Matlab + Simulink с использованием стандартного блока трансформатора

с нелинейным магнитопроводом была разработана модель ТТНП. Схема модели ТТНП в системе Matlab для исследования различных режимов работы приведена на рис. 2.

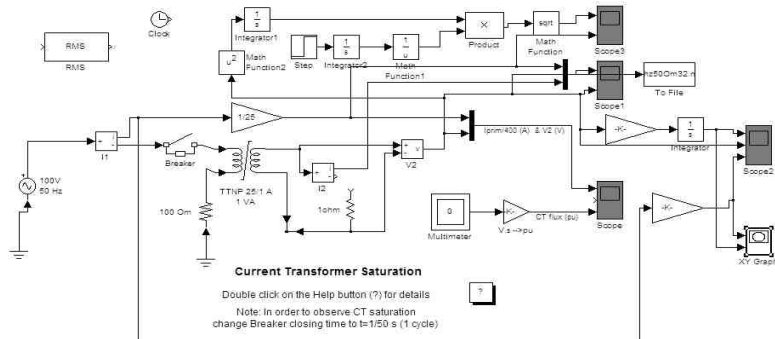


Рис. 2. Модель ТТНП в программном комплексе Matlab + Simulink

Для оценки точности модели ТТНП на основе ОКН в системе Matlab были сняты осциллограммы вторичных напряжений и зависимости среднеквадратичных значений вторичного напряжения от первичного тока ТТНП $U_{2ТТНП} = f(I_{1ТТНП})$ для при синусоидальном первичном токе в диапазоне от $I_{1ТТНП} = 1 \dots 30$ А и диапазоне частот $f = 50 \dots 500$ Гц в режиме холостого хода и при сопротивлении вторичной нагрузки $R_n = 1$ Ом.

Полученные на модели осциллограммы и зависимости сравнивались с аналогичными осциллограммами и зависимостями $U_{2ТТНП} = f(I_{1ТТНП})$, полученными экспериментально для реального образца ТТНП типа ТЗЛМ с использованием программно-аппаратного комплекса типа РЕТОМ (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные зависимости $U_{2ТТНП} = f(I_{1ТТНП})$ на частоте $f = 50$ Гц

$I_{1ТТНП}$, А	$U_{2ТТНП}$, В	$U_{2модель}$, В	Погрешность, %
3,00	1,09	1,87	-71,56
5,00	2,70	3,15	-16,67
7,00	4,20	4,15	1,19
9,00	5,20	4,92	5,38
11,00	5,64	5,66	-0,35
13,00	5,89	6,22	-5,60
15,00	6,03	6,68	-10,78
17,00	6,13	7,11	-15,99
19,00	6,20	7,48	-20,65

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные зависимости $U_{2ТНП} = f(I_{1ТНП})$ на частоте $f = 500$ Гц

$I_{1ТНП}, \text{А}$	$U_{2ТНП}, \text{В}$	$U_{2\text{модель}}, \text{В}$	Погрешность, %
3,00	3,08	3,80	-23,38
5,00	5,66	6,32	-11,59
7,00	8,68	8,82	-1,61
9,00	12,07	11,33	6,15
11,00	15,80	13,85	12,34
13,00	19,74	16,36	17,10
15,00	23,70	18,89	20,32
17,00	27,60	21,40	22,46
19,00	30,94	23,93	22,66

Анализ данных табл. 1 и 2 показывает, что модель ТНП на основе ОКН при работе ТНП в режиме холостого хода обеспечивает приемлемые погрешности (до $\sim 10\%$) по интегральным (среднеквадратичным) значениям вторичного напряжения только при работе на линейном участке ОКН ($I_{1ТНП} = 3 \dots 10$ А). При этом погрешности по мгновенным значениям могут значительно превышать 10% (например, рис. 3), что обуславливает возможность значительных искажений спектра высших гармоник вторичного напряжения.

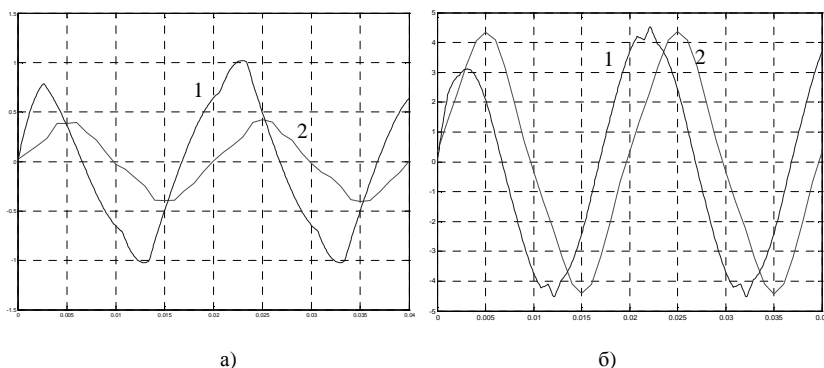


Рис. 3. Сравнение экспериментально полученных осциллограмм $U_{2ТНП}(t)$ (кривая 1) и осциллограмм, полученных для модели ТНП на основе ОКН (кривая 2): а – $I_{1ТНП} = 1$ А; б – $I_{1ТНП} = 5$ А

Поэтому модель ТНП на основе ОКН неприемлема для исследования режимов функционирования защит от ОЗЗ на основе ВГ или электрических величин переходного процесса.

При работе ТНП с нагрузкой $R_n \leq 1$ Ом токовая погрешность уменьшается до единиц процентов, т.е. модель ТНП на основе ОКН

обеспечивает приемлемую точность в рассмотренном выше диапазоне первичных токов.

Математическая модель ТТНП на основе СКН. В работах НПИ (в настоящее время ЮРГТУ) показано [4], что при необходимости максимально точного отображения не только интегральных, но и мгновенных значений вторичного тока при моделировании трансформаторов тока необходимо использовать СКН. Основным недостатком данного подхода – необходимость использования семейства СКН, соответствующих различным значениям тока намагничивания.

Для построения модели на основе СКН использовались петли гистерезиса магнитопровода ТТНП типа ТЗЛМ, полученные экспериментально с помощью программно-инструментального комплекса NI LabView и источника первичного синусоидального тока на частоте $f = 50$ Гц в режиме источника тока при значениях первичного тока $I_{1ТТНП} = 1, 3, \dots, 15$ А (рис. 4).

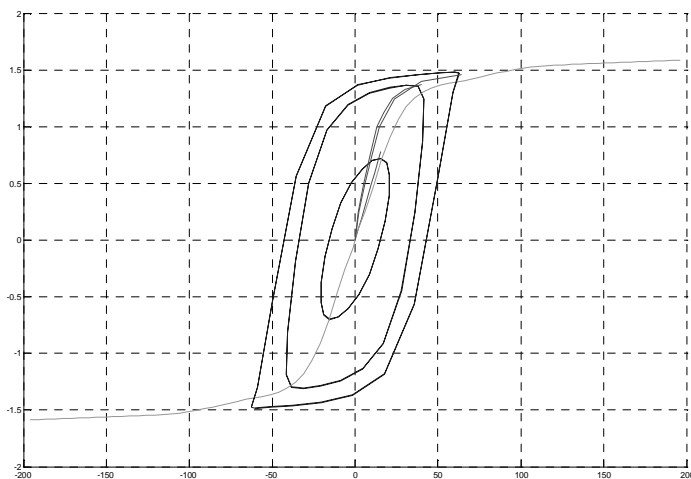


Рис. 4. Средние кривые намагничивания ТТНП типа ТЗЛМ при различных значениях первичного тока

Математические модели ТТНП на основе СКН в системе моделирования Matlab аналогичны модели на основе ОКН (рис. 2).

Точность полученных моделей ТТНП на основе СКН оценивалась сравнением осциллограмм вторичных напряжений $U_{2ТТНП}(t)$, полученных экспериментально и на моделях для различных значений первичного тока $I_{1ТТНП}$ в режиме холостого хода трансформатора тока (например, рис. 5).

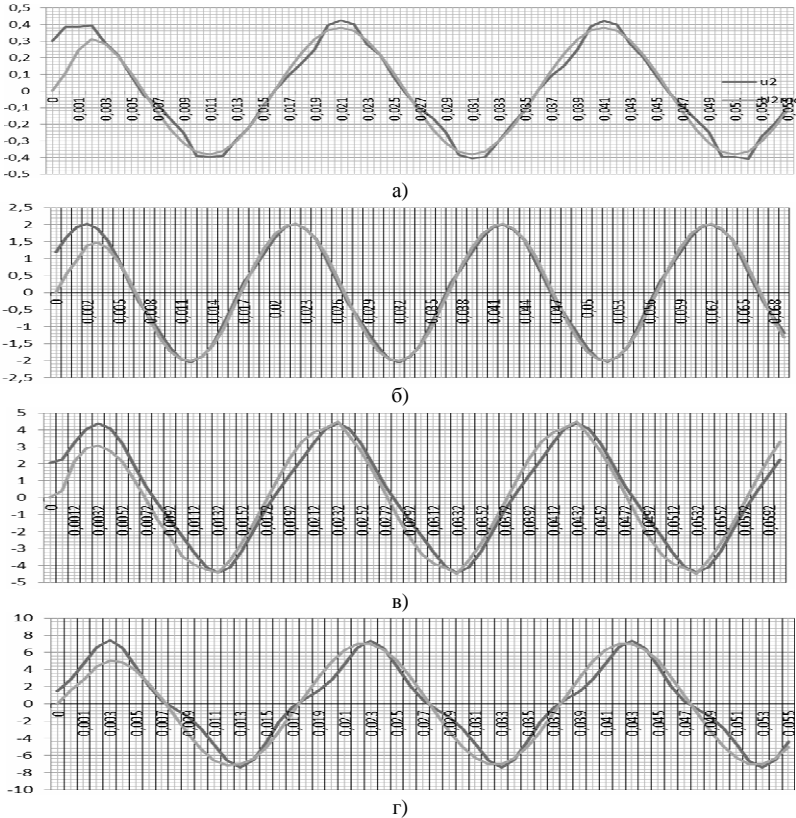


Рис. 5. Сравнение экспериментально полученных осциллограмм $U_{2ТТП}(t)$ и осциллограмм, полученных для моделей ТТП на основе СКН (кривая 2): а – $I_{1ТТП} = 1$ А; б – $I_{1ТТП} = 3$ А; в – $I_{1ТТП} = 5$ А; г – $I_{1ТТП} = 7$ А

Анализ полученных данных показал, что модели ТТП на основе СКН обеспечивают значительное уменьшение как токовых, так и угловых погрешностей по сравнению с моделью на основе ОКН. Следует отметить, что с насыщением магнитопровода ТТП погрешности модели на основе ОКН возрастают. Как и для модели на основе ОКН, уменьшение вторичной нагрузки ТТП обеспечивает существенное снижение токовой и угловых погрешностей.

Заключение

1. Модель ТТП на основе ОКН в режиме холостого хода дает приемлемые погрешности (до ~10 %) для интегральных (среднеквадра-

точных) значений вторичного напряжения только на линейном участке кривой намагничивания.

2. При работе ТТНП с нагрузкой $R_H \leq 1$ Ом токовая погрешность модели на основе ОКН уменьшается до единиц процентов.

3. Погрешности модели по п. 1 по мгновенным значениям могут значительно превышать 10 % (например, рис. 3), что обуславливает возможность значительных искажений спектра высших гармоник вторичного напряжения.

4. Модели ТТНП на основе СКН обеспечивают снижение токовой и угловой погрешностей как по интегральным, так и по мгновенным значениям вторичного напряжения в режиме холостого хода до 10 % и обеспечивают существенное уменьшение погрешностей по мгновенным значениям в диапазоне первичных токов ТТНП от 1 до 15 А.

5. При работе ТТНП с вторичной нагрузкой $R_H \leq 1$ Ом погрешности моделей на основе СКН не превышают единиц процентов.

Библиографический список

1. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001.
2. Шнейерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. шк., 1996.
4. Подгорный Э.В., Хлебников С.Д. О выборе расчетной характеристики трансформаторов тока в переходных режимах // Электричество. – 1966. – № 9. – С. 87 – 90.

*Т.Ю. Винокурова, магистрант;
рук. В.А. Шуин, д.т.н., профессор,
Е.С. Шагурина, ассистент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МОДЕЛЬ КОМПЕНСИРОВАННОЙ СЕТИ 6 – 10 кВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ НА ОСНОВЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Введение. В компенсированных электрических сетях 6 – 10 кВ получили широкое применение защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) на основе высших гармоник (ВГ).

Классификация таких защит приведена на рис. 1. Наиболее широкое применение в компенсированных сетях получили токовые защиты абсо-

лютного замера (например, УСЗ-2/2 и его аналоги [1]) и токовые защиты относительного замера, основанные на сравнении значений ВГ в диапазоне частот 150 – 650 Гц в токах $3I_0$ всех присоединений защищаемого объекта (например, УСЗ-3М и его аналоги [1]). Значительно меньшее применение получили защиты относительного замера, основанные на сравнении ВГ в фазах защищаемого объекта (ЗЗО).

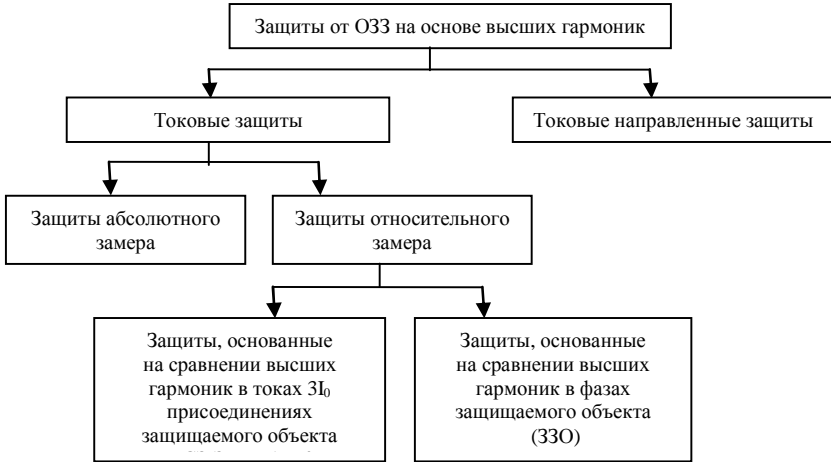


Рис. 1. Классификация защит от ОЗЗ, основанных на использовании ВГ

Постановка задачи. На устойчивость функционирования указанных защит от ОЗЗ, прежде всего, токовых защит абсолютного замера ВГ, оказывают влияние максимальный и минимальный уровни высших гармоник в токах $3I_0$ и их отношение.

Условия применимости токовой защиты абсолютного замера уровня ВГ в токах $3I_0$ определяются условиями отстроенности от внешних ОЗЗ и чувствительности при внутренних повреждениях. С достаточной точностью можно принять, что при ОЗЗ распределение высших гармоник в диапазоне 150 – 650 Гц в токах нулевой последовательности соответствует распределению емкостных токов промышленной частоты в сети с изолированной нейтралью [2, 3]. С учетом этого для обеспечения несрабатываний защиты при внешних ОЗЗ и максимальном уровне ВГ в сети ток срабатывания защиты на i -м присоединении должен выбираться из условия:

$$I_{0с.з.i} \geq K_{отс} \alpha_{макс} I_{с.i}, \quad (1)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки; I_{ci} – собственный емкостный ток i -го присоединения; $\alpha_{макс}$ – максимально возможный уровень ВГ в I_{ci} .

Коэффициент чувствительности защиты при внутреннем ОЗЗ на i -м присоединении

$$K_{ci} = \frac{\alpha_{мин} (I_{c\Sigma} - I_{ci})}{I_{0c.з.i}} \geq K_{ч.мин.доп}, \quad (2)$$

где $I_{c\Sigma}$ – суммарный емкостный ток сети; $\alpha_{мин}$ – минимальный уровень высших гармоник в токах $I_{c\Sigma}$ и I_{ci} ; $K_{ч.мин.доп}$ – минимально допустимый коэффициент чувствительности защиты.

Из (1) и (2) получим условие применимости указанной защиты:

$$I_{ci}^* = \frac{I_{ci}}{I_{c\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{макс}}{\alpha_{мин}} K_{отс} K_{ч.мин.доп}} = \frac{1}{1 + z K_{отс} K_{ч.мин.доп}}. \quad (3)$$

Принимая $K_{отс} = 1,2$; $K_{ч.мин.доп} = 1,5$; $z \approx 4$ [3], из (3) получим $I_{ci}^* \leq 0,12$. С учетом этого в [3] рекомендуется применять устройства типа УСЗ-2/2 (и его аналоги) на присоединениях с собственным емкостным током $I_{c\text{собс}}$, не превышающим $0,1I_{c\Sigma}$.

Из (1) – (3) можно видеть, что для выбора уставок токовых защит абсолютного замера ВГ и оценки возможности их применения необходимо знать значения величин $\alpha_{макс}$, $\alpha_{мин}$ и их отношения z . Оценить указанные величины на основе эксплуатации или экспериментов в действующих сетях практически трудно. Поэтому разработка математической модели компенсированной сети 6 – 10 кВ для оценки указанных величин, исследования условий устойчивости функционирования защит на основе ВГ и уточнения методики выбора уставок их срабатывания является актуальной задачей.

Целью работы является разработка математической модели компенсированной сети 6 – 10 кВ для решения следующих задач:

1) оценки минимального и максимального уровня ВГ в фазных напряжениях и токах $3I_0$ поврежденного и неповрежденных присоединений;

2) оценки отношения максимального уровня ВГ к минимальному уровню ВГ в компенсированных сетях 6 – 10 кВ;

3) анализа соотношений уровней ВГ в токах $3I_0$ поврежденном и неповрежденном присоединениях.

Схема модели компенсированной сети 6 – 10 кВ. При построении модели необходимо учитывать источники высших гармоник в компенсированных сетях 6 – 10 кВ. К ним относятся:

- 1) силовые трансформаторы электрических станций (ЭС) и подстанций (ПС), имеющие нелинейную кривую намагничивания магнитопровода;
- 2) генераторы электрических станций;
- 3) дугогасящие реакторы;
- 4) различного рода нелинейные устройства у потребителей.

Однолинейная схема сети 6 – 10 кВ, включающая названные элементы, приведена на рис. 2.

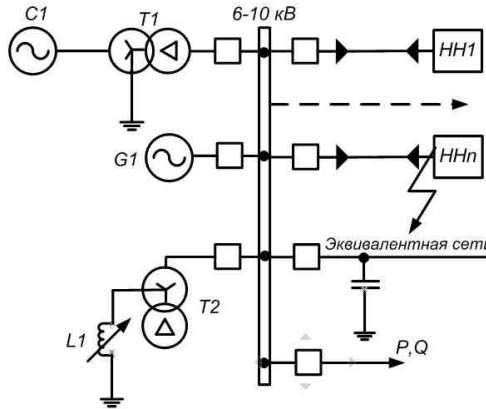


Рис. 2. Однолинейная схема компенсированной сети 6 – 10 кВ для исследования режимов функционирования защит от ОЗЗ на основе ВГ

Модель включает систему $C1$, подключенную к шинам 6 – 10 кВ через силовой трансформатор $T1$ с нелинейной кривой намагничивания, генератор, в котором кроме первой гармоники учтены ВГ, дугогасящую катушку $L1$, подключенную через трансформатор $T2$, нелинейные нагрузки у потребителей $НН1... ННn$, эквивалентную сеть.

В большинстве компенсированных сетей 6 – 10 кВ, центрами питания которых являются шины 6 – 10 кВ понизительных ПС, основным источником ВГ являются силовые трансформаторы, имеющие нелинейную кривую намагничивания. Поэтому при разработке модели компенсированной сети для решения указанных выше задач необходима модель силового трансформатора с нелинейной кривой намагничивания магнитопровода. Модель такого трансформатора, как и модель сети 6 – 10 кВ в целом, удобно создавать в системе моделирования Matlab с расширением Simulink.

Модель силового трансформатора с нелинейной кривой намагничивания в системе Matlab. При моделировании модели силового трансформатора с нелинейной кривой намагничивания был использован подход, предложенный В.М. Кискачи [2]. В [2] показано, что кривая намагничивания силового трансформатора с магнитопроводом, выполненным из горячекатаной или холоднокатаной стали с приемлемой точностью может быть аппроксимирована полиномом пятого порядка в относительных единицах. Вид этой кривой представлен на рис. 3.

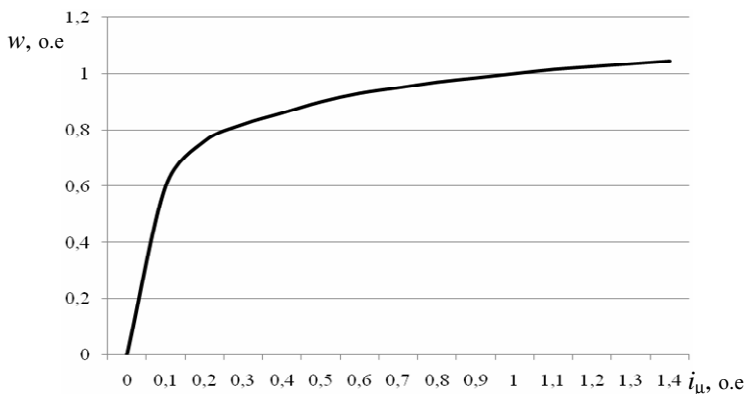


Рис. 3. Аппроксимация кривой намагничивания полиномом пятой степени

На рис. 3: $w = \Psi^* = \Psi / \omega U_{t\text{ном}}$ – мгновенное значение потокосцепления в о.е.; $i_\mu = i_\mu / \sqrt{2} I_{xx}$ – мгновенное значение тока намагничивания в о.е.; $U_{t\text{ном}}$ – амплитуда фазного номинального напряжения; I_{xx} – ток холостого хода трансформатора; $\omega = 2\pi 50$.

На основе этой кривой и технических данных силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторов 110/6 кВ мощностью 6,3 ÷ 80 МВА в системе моделирования Matlab были разработаны их нелинейные модели. Для проверки адекватности и оценки достоверности получаемых результатов модели были протестированы в нагрузочных режимах, режимах холостого хода, трехфазного и двухфазного КЗ на стороне НН, однофазного КЗ на стороне ВН трансформатора. На рис. 4 в качестве примера приведена осциллограмма тока намагничивания (тока холостого хода) для модели трансформатора мощностью 16 МВА. В установившемся режиме значение тока намагничивания трансформатора с приемлемой точностью совпадает с техническими данными.

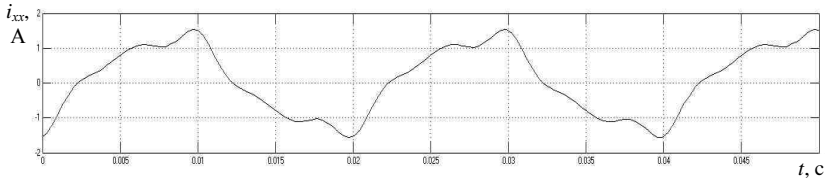


Рис. 4. Кривая тока холостого хода во времени и нелинейной модели силового трансформатора

Оценка минимального уровня ВГ в компенсированных сетях 6 – 10 кВ. С использованием разработанных моделей силовых трансформаторов был оценен минимальный уровень ВГ в фазных напряжениях компенсированных сетей 6 – 10 кВ, в которых основным и единственным источником является силовой трансформатор (рис. 5).

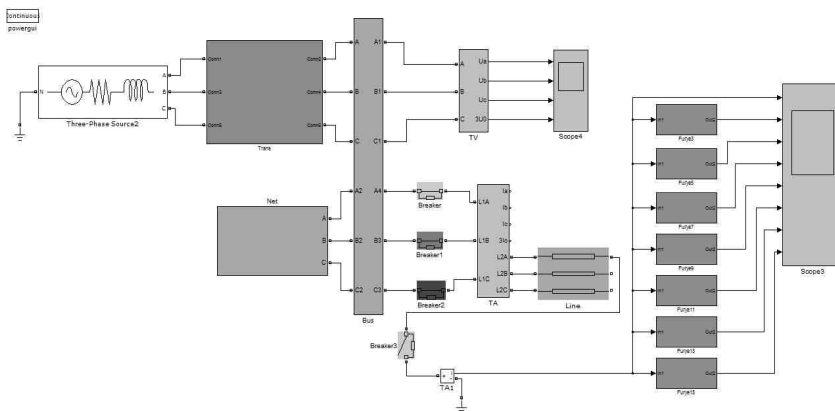


Рис. 5. Схема модели компенсированной сети 6 – 10 кВ в системе Matlab для оценки минимального уровня ВГ в фазных напряжениях

Были измерены значения ВГ фазных напряжений с 3-й по 15-ю при номинальном (115 кВ) и повышенном на 20 % напряжении питающей системы (табл. 1, 2). На рис. 6 показан спектр ВГ фазных напряжений в нормальном режиме сети (без ОЗЗ) при мощности питающего трансформатора $S_H = 16$ МВА и $U_c = 115$ кВ.

Таблица 1. Относительные уровни высших гармоник напряжения на стороне НН трансформатора $S_H = 16$ МВА при $U_c = 115$ кВ

N гармоники ν	1	3	5	7	9	11	13	15
$U_\nu/U_1 \cdot 100, \%$	100	0,0033	0,03	0,0082	0,0002	0,0023	0,0017	0,001

Таблица 2. Относительные уровни высших гармоник напряжения на стороне НН трансформатора $S_n = 16$ МВА при $U_c = 138$ кВ

N гармоники ν	1	3	5	7	9	11	13	15
$U_\nu/U_1 \cdot 100, \%$	100	0,0034	0,063	0,0102	0,0006	0,0097	0,0039	0,002

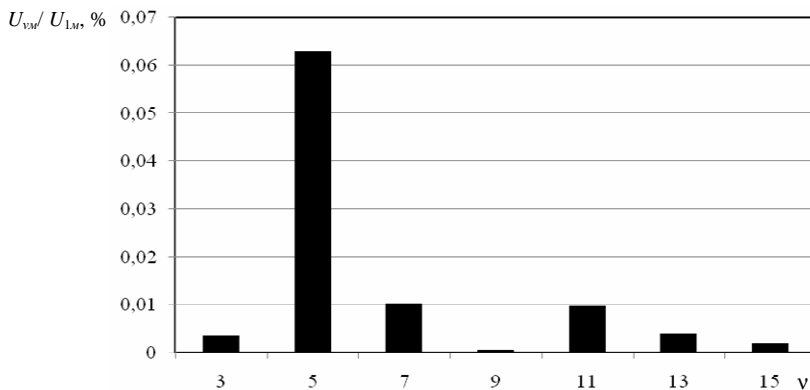


Рис. 6. Спектр ВГ фазных напряжений сети 6 кВ

Спектральный состав тока ОЗЗ и токов нулевой последовательности при ОЗЗ определяется спектром напряжения поврежденной фазы в режиме, предшествующим ОЗЗ [2, 3].

Для оценки значений α_{\max} , α_{\min} и их отношения z модель сети по рис. 5 должны быть дополнена моделями генератора, ДГР и нелинейных устройств потребителей. Разработка указанных моделей должна составить предмет дальнейших исследований и разработок.

Заключение

1. Для выбора уставок токовых защит от ОЗЗ, основанных на принципе абсолютного замера ВГ, и оценки области их применения актуальной задачей является разработка математической модели компенсированной сети 6 – 10 кВ, позволяющая оценить максимальный α_{\max} и минимальный α_{\min} уровни ВГ и их отношение z .

2. Минимальный уровень ВГ в компенсированной сети 6 – 10 кВ определяется гармониками, генерируемыми силовыми трансформаторами за счет нелинейности кривой намагничивания их магнитопроводов.

3. В системе Matlab разработана математическая модель компенсированной сети 6 – 10 кВ и модели силовых трансформаторов, учитывающих нелинейность кривых намагничивания их магнитопроводов, позво-

ляющая оценить минимальный уровень ВГ в фазных напряжениях и токах нулевой последовательности при ОЗЗ.

4. Для оценки максимального уровня ВГ и соотношений максимального и минимального уровня ВГ модель сети по п. 3 должна быть дополнена моделями генератора, ДГР и нелинейных устройств потребителей. Разработка указанных моделей должна составить предмет дальнейших исследований и разработок.

Библиографический список

1. Шунн В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001.
2. Кискачи В.М. Расчет минимального уровня высших гармоник при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью: Тр. ВНИИЭ. Вып. 26. Работы в области релейной защиты и автоматики. – М.: «Энергия», 1966. – С. 89 – 105.
3. Кискачи В.М. Условия селективной работы сигнализации однофазных замыканий с использованием высших гармоник тока нулевой последовательности: Тр. ВНИИЭ. Вып. 26. Работы в области релейной защиты и автоматики. – М.: «Энергия», 1966, 1966. – С. 80 – 88.

И.Е. Иванов, асп.;
рук. А.Ю. Мурзин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА НОВОГО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО СИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРА С СЕТЬЮ И УПРАВЛЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЕМ НА ВЫВОДАХ ГЕНЕРАТОРА

Целью работы является создание нового лабораторного практикума, направленного на исследование процесса синхронизации генератора с сетью и алгоритма регулирования напряжения на выводах синхронного генератора с применением современных аппаратных и программных средств.

Физико-математическое моделирование является, по мнению авторов, наиболее эффективным способом организации лабораторных исследований. Специалисты-электроэнергетики обслуживают реальные электроэнергетические объекты и настраивают устройства защиты и автоматики, поэтому значимость физического моделирования очень велика. Математическое моделирование предоставляет мощные инструменты обработки аналоговых и цифровых данных физического эксперимента, а также алгоритмы управления физическими моделями, делая эксперименты на порядок более качественными с точки зрения анализа данных.

Созданный лабораторный практикум позволяет проводить эксперименты по синхронизации генератора с сетью следующими способами: 1) полуавтоматическая самосинхронизация; 2) автоматическая самосинхронизация; 3) точная автоматическая синхронизация с постоянным временем опережения. Теоретические основы данных методов подробно изложены в [1, 2]. После успешного подключения генератора к сети в каждом случае имеется возможность управления линейным напряжением на его выводах, что является одним из способов решения задачи автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности в энергетической системе.

Эксперименты проводятся с использованием современного лабораторного стенда и компьютера со специальным программным обеспечением, оснащенного платой сбора данных NI PCI-6024E производства корпорации National Instruments (США). На рис. 1 представлена обобщенная структурно-функциональная схема, используемая для проведения экспериментов. Эта схема отражает реальную схему электрических соединений, собираемую на стенде, а также логику приема необходимых сигналов и выдачи сигналов управления. Прямоугольники, выделенные пунктиром на рис. 1, представляют собой отдельные блоки лабораторного стенда, выполняющие строго определенные функции. Эти функции подробно описаны в [2]. Автоматический синхронизатор и автоматический регулятор напряжения – это виртуальные устройства, имеющиеся в разработанной компьютерной программе. Следует подчеркнуть, что эти устройства не выполняют какую-либо эмуляцию, а обрабатывают реальные поступающие аналоговые и дискретные сигналы и выдают сигналы управления в соответствии с запрограммированным алгоритмом, т.е. вовлечены в реальный физический процесс в силовой электрической цепи.

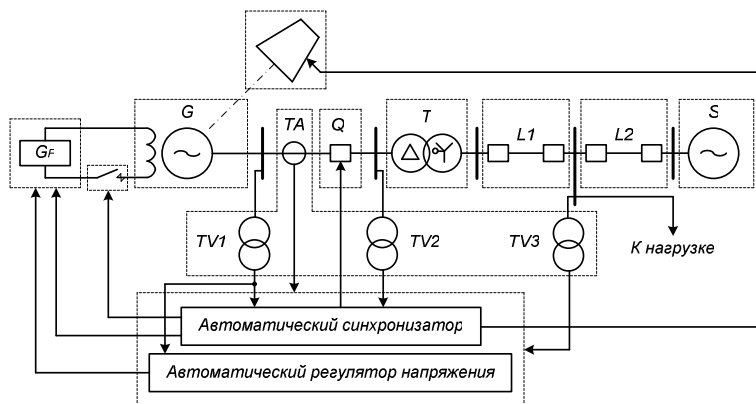


Рис. 1. Структурно-функциональная схема, используемая для проведения экспериментов

На рис. 2 представлен пользовательский интерфейс разработанной в среде LabVIEW компьютерной программы. Он изменяется в зависимости от выбранного типа синхронизации и стадии эксперимента. Этапы разработки программы на автономном компьютере (не имеющем, в отличие от лабораторного компьютера, встроенной платы NI PCI-6024E) можно описать следующим образом:

- 1) создание виртуальной платы NI PCI-6024E с помощью программы Measurement & Automation Explorer;
- 2) создание задач аналогового и цифрового ввода и вывода (со своими каналами и масштабами) с целью их последующего использования в LabVIEW;
- 3) реализация кода программы в среде LabVIEW;
- 4) конвертация готовой программы в автономный exe-файл (таким образом, наличие LabVIEW на компьютере в лаборатории не требуется).

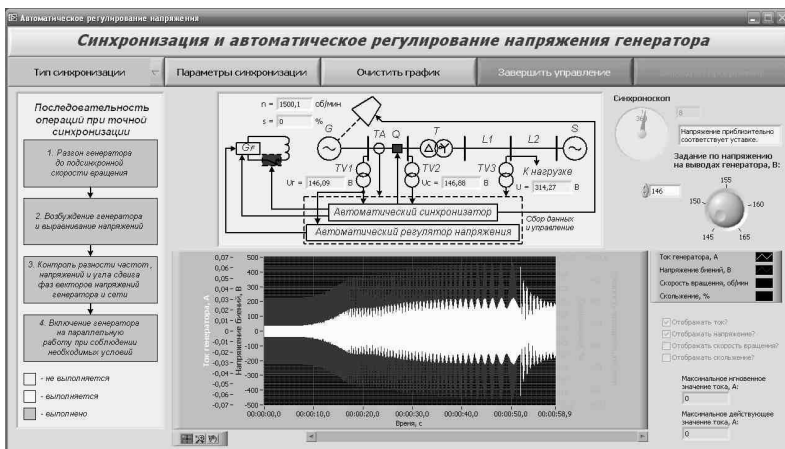


Рис. 2. Пользовательский интерфейс разработанной компьютерной программы

Имеющиеся в окне программы блок-схемы, а также мнемосхема (соответствующая изображенной на рис. 1) являются интерактивными. Так, блок-схема в левой части окна программы окрашивается разным цветом в зависимости от стадии эксперимента. На мнемосхеме отображаются состояния выключателей силовой цепи, а также непрерывно обновляются значения пяти аналоговых величин. Виртуальный синхроскоп активен при выборе точной автоматической синхронизации (после успешного ее осуществления он сохраняет значение угла, при котором подавалась команда на включение выключателя). Кривые изменения то-

ка, напряжения, скорости вращения и скольжения, выводимые на график, можно детально анализировать с помощью инструментов масштабирования во всевозможных направлениях, перетаскивания и т.п. Программой определяется максимальное значение тока статора генератора (как действующее, так и мгновенное), зафиксированное во время синхронизации.

В программу встроено достаточно много блокировок, что необходимо для того, чтобы избежать повреждения блоков стенда. В частности, пользователь не может выйти из программы в произвольный момент времени, оставив эксперимент незавершенным, а вместе с тем и блоки стенда в неопределенном состоянии. Диапазоны изменения задаваемых уставок виртуального синхронизатора ограничены реальными величинами, которые могут использоваться на практике. Программой контролируются значения выдаваемых аналоговых величин (в частности, исключено превышение некоторого порога тока возбуждения генератора).

Разработанный лабораторный практикум успешно внедрен в образовательный процесс студентов электроэнергетического факультета ИГЭУ. Схема электрических соединений и все используемые алгоритмы являются оригинальной авторской разработкой и не имеют аналогов.

Библиографический список

1. **Овчаренко Н.И.** Автоматика энергосистем: учеб. для вузов; под ред. А.Ф. Дьякова. – 3-е изд., испр. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
2. **Мурзин А.Ю., Иванов И.Е.** Синхронизация генераторов и регулирование напряжения на выводах синхронного генератора изменением его возбуждения: метод. ук.; под ред. А.Е. Аржанниковой; Министерство образования и науки РФ, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2011.
3. **Трэвис Дж., Кринг Дж.** LabVIEW для всех: пер. с англ. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2008.

И.Е. Иванов, асп.;
рук. А.Ю. Мурзин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТУАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП ПО ДАННЫМ ДВУСТОРОННЕГО ЗАМЕРА ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Воздушные линии электропередачи (ЛЭП) вследствие их большой протяженности – наиболее габаритные электроэнергетические объекты.

Параметры воздушных ЛЭП являются распределенными, поэтому обычно говорят об удельных параметрах, т.е. рассчитанных на единицу длины ЛЭП. Классические подходы к определению удельных параметров основаны на наличии следующих данных: геометрические размеры ЛЭП, физические свойства проводников системы, в т.ч. и грунта, а также предполагаемые атмосферные условия. Здесь можно выделить два подхода в отношении вычисления продольных параметров ЛЭП (активное и индуктивное сопротивление). Первый основан на формулах Карсона и хорошо освещен в отечественной литературе (в частности, [1]), второй – на альтернативной методике, изложенной в основном в зарубежных источниках (например, [2]).

Данные, используемые указанными классическими методами определения параметров воздушных ЛЭП, являются в известной степени усредненными и не отражающими реального состояния конкретной линии в интересующий момент времени. Это приводит к тому, что уставки устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) воздушных ЛЭП также могут существенно отличаться от тех, которые должны быть заданы. Вариации параметров ЛЭП особенно критичны для алгоритмов устройств дистанционной защиты и определения мест повреждений (ОМП). Необходимость более точного учета реального состояния воздушных ЛЭП для обеспечения правильного функционирования указанных устройств неоднократно отмечалась в технической литературе, в частности, [3, 4]. В [5] приведены конкретные цифры, свидетельствующие о резком изменении удельного сопротивления различных типов грунта в зависимости от объемного содержания влаги. В [4] изложены результаты, согласно которым актуальное удельное индуктивное сопротивление отличается от предполагаемого более чем на 7 %. Абсолютная ошибка, очевидно, определяется длиной ЛЭП и возрастает с увеличением последней.

В настоящее время созданы объективные предпосылки для оценки актуальных параметров воздушных ЛЭП и адаптации соответствующих уставок терминалов РЗА. В электрических сетях по всему миру, в т.ч. и в Российской Федерации, устанавливаются устройства синхронизированных векторных измерений – PMU (Phasor Measurement Units), объединяемые в системы мониторинга параметров WAMS (Wide Area Measurement Systems). Устройства PMU обрабатывают поступающие осциллограммы токов и напряжений и выдают значения этих электрических величин в комплексной форме, т.е. действующие значения и углы соответствующих комплексных векторов. Все сигналы измеряются относительно общей точки отсчета времени, задаваемой при помощи системы глобального позиционирования GPS (Global Positioning System). Теоретические аспекты концепции векторных измерений подробным об-

разом описаны в [6]. Выходные сигналы РМУ передаются на устройство более высокого уровня.

В настоящей работе концепция синхронизированных векторных измерений по концам ЛЭП применена для оценки актуальных параметров ЛЭП. Уравнения длинной линии в комплексной форме, разрешенные относительно тока и напряжения в конце ЛЭП, хорошо известны и выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) - \dot{I}_1 \cdot Z \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l); \\ \dot{I}_2 &= -\frac{\dot{U}_1}{Z} \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l) + \dot{I}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l). \end{aligned} \quad (1)$$

Обозначения, входящие в данные уравнения, стандартны и не нуждаются в расшифровке. Для вычисления удельных параметров ЛЭП необходимо систему уравнений (1) решить относительно постоянной распространения γ и характеристического сопротивления Z , в результате чего комплексные сопротивление z и проводимость y могут быть определены по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} z &= r + j \cdot \omega \cdot L = \gamma \cdot Z; \\ y &= g + j \cdot \omega \cdot C = \frac{\gamma}{Z}. \end{aligned} \quad (2)$$

Следует сразу оговориться, что система уравнений (1) справедлива для однофазной ЛЭП, а также для отдельной модальной составляющей ЛЭП с произвольным числом фаз и параллельных цепей. В случае транспонированных ЛЭП можно также вести речь о симметричных составляющих прямой и нулевой последовательностей. В этом случае система (1) может быть применена к параметрам интересующей последовательности.

Полученное обобщенное решение системы (1), т.е. не выражающее один из искомым параметров – постоянную распространения – в явном виде, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) &= \frac{\dot{U}_1 \cdot \dot{I}_1 + \dot{U}_2 \cdot \dot{I}_2}{\dot{U}_1 \cdot \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \cdot \dot{I}_1}; \\ Z &= \frac{\dot{U}_1 \cdot \operatorname{ch}(\gamma \cdot l) - \dot{U}_2}{\dot{I}_1 \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot l)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Первое из уравнений полученной системы подразумевает вычисление гиперболического арккосинуса комплексного числа (обозначим его

$A + j \cdot B$), поэтому решение, удовлетворяющее условиям задачи, совершенно неочевидно. Обозначив $\gamma = \alpha + j \cdot \beta$, первое из уравнений системы (3) можно свести к следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} \cos(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{ch}(\alpha \cdot l) &= A; \\ \sin(\beta \cdot l) \cdot \operatorname{sh}(\alpha \cdot l) &= B. \end{aligned} \quad (4)$$

Авторами получено достаточно строгое аналитическое решение системы (4) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2 \cdot l} \cdot \ln(t + \sqrt{t^2 - 1}); \\ \beta &= \frac{1}{l} \cdot \arcsin\left(\frac{B}{\operatorname{sh}(\alpha \cdot l)}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

где параметр t определяется как

$$t = A^2 + B^2 + \sqrt{A^4 + B^4 + 2 \cdot A^2 \cdot B^2 - 2 \cdot A^2 + 2 \cdot B^2 + 1}. \quad (6)$$

Для оценки работоспособности предлагаемого алгоритма в графическом препроцессоре ATPDraw программного комплекса ATP была собрана схема сети, состоящая из эквивалентированной системы, трехфазной одноцепной транспонированной ЛЭП длиной 150 км и активно-индуктивной нагрузки. В результате были определены токи и напряжения прямой последовательности (в комплексной форме) на частоте 50 Гц по концам ЛЭП. Предлагаемый алгоритм был реализован в комплексе Mathcad. В табл. 1 представлены результаты моделирования, из которых очевидно, что вычисленные в Mathcad параметры линии абсолютно идентичны заданным в ATPDraw.

Таблица 1. Сравнение результатов вычисления параметров прямой последовательности ЛЭП по предлагаемому алгоритму с истинными значениями

Параметр	Истинное значение	Результат моделирования
R_1 , Ом/м	0,000132	0,000132
L_1 , мГн/м	0,001382	0,001382
C_1 , мкФ/м	$8,800 \cdot 10^{-6}$	$8,815 \cdot 10^{-6}$

На практике требуется получить актуальные параметры не только прямой, но и нулевой последовательности. Иными словами, необходимо определить полные матрицы собственных и взаимных сопротивлений и

проводимостей. В случае транспонированной ЛЭП оптимальным вариантом для этого представляются фазово-модальные преобразования. Объем публикации не позволяет рассмотреть данную концепцию (ее основы изложены, например, в [7]). В табл. 2 сведены результаты моделирования.

Таблица 2. Сравнение результатов вычисления параметров прямой и нулевой последовательностей ЛЭП по предлагаемому алгоритму с истинными значениями

Параметр	Истинное значение	Результат моделирования
R_1 , Ом/м	0,000132	0,000132
L_1 , мГн/м	0,001382	0,001382
C_1 , мкФ/м	$8,800 \cdot 10^{-6}$	$8,816 \cdot 10^{-6}$
R_0 , Ом/м	0,00045	0,00045
L_0 , мГн/м	0,004447	0,004449
C_0 , мкФ/м	$5,28 \cdot 10^{-6}$	$4,11 \cdot 10^{-6}$

Из табл. 2 видно, что единственным параметром, вычисленным некорректно, является емкость нулевой последовательности. Дело в том, что для корректного определения параметров нулевой последовательности, очевидно, необходима некоторая несимметрия в сети (например, небаланс нагрузки). Необходимый «порог» несимметрии требует дальнейших исследований. Результаты моделирования, приведенные в табл. 2, соответствуют небалансу нагрузки, при котором токи обратной и нулевой последовательностей не превосходят 3,3 % тока прямой последовательности.

Таким образом, авторами предложен алгоритм определения актуальных удельных параметров транспонированных воздушных ЛЭП на основе концепции синхронизированных векторных измерений – одного из актуальных направлений в электроэнергетике. Результаты моделирования с использованием программных комплексов АТР и Mathcad убеждают, что алгоритм работоспособен и заслуживает дальнейших исследований с целью его совершенствования.

Библиографический список

4. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110 – 750 кВ. – М.: Энергия, 1979.
5. **Power** system transients: parameter determination / edited by Juan A. Martinez-Velasco. – CRC Press, 2009.
6. **Liao Y., Kezunovic M.** Online optimal transmission line parameter estimation for relaying applications // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 24. – No. 1, January 2009. – Pp. 96 – 102.
7. **Kim I., Aggarwal R.K.** A study on the on-line measurement of transmission line impedances for improved relaying protection // Electrical Power and Energy Systems. – Vol. 28. – No. 6, July 2006. – Pp. 359 – 366.

8. **Тарасов А., Цилько В.** Гамма-съемка. Новый метод оценки коррозионных свойств грунта на трассах ВЛ // Новости электротехники. – 2005. – № 2 (32).

9. **Phadke A.G., Thorp J.S.** Synchronized phasor measurements and their applications. – Springer, 2008.

10. **Dommel H.W.** Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book. – Bonneville Power Administration, 1986.

Е.А. Мурзина, студ.;
рук. В.А. Шуин, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, Иваново)

РАСЧЕТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6 – 10 кВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Введение. Известно, что большая часть однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях 6 – 10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, имеет дуговой перемежающийся характер [1, 2 и др.]. При интервалах между гашениями и повторными зажиганиями заземляющей дуги, не превышающими 2 – 3 периодов промышленной частоты, дуговые перемежающиеся ОЗЗ сопровождаются опасными перенапряжениями на неповрежденных фазах, охватывающими всю электрически связанную сеть. Поэтому оценка максимальных перенапряжений при дуговых ОЗЗ перемежающихся представляет актуальную задачу для разработки способов их ограничения.

Основные теории дуговых перемежающихся ОЗЗ. Существуют три основные теории возникновения максимальных перенапряжений при дуговых перемежающихся ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью: В. Петерсена, Дж. Петерса и Х. Слепяна и Н.Н. Белякова [1, 2 и др.]. Согласно теории В. Петерсена, предложенной в 1916 г., зажигания дуги происходят каждый полупериод промышленной частоты при максимальном значении восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе, а гашения дуги – при первом прохождении переходного тока замыкания через нулевые значения (рис. 1).

По теории Дж. Петерса и Х. Слепяна, разработанной в 1923 г., зажигания дуги происходят каждый период промышленной частоты при максимальных напряжениях на поврежденной фазе, а гашения – при прохождении через нулевые значения емкостного тока промышленной частоты (рис. 2).

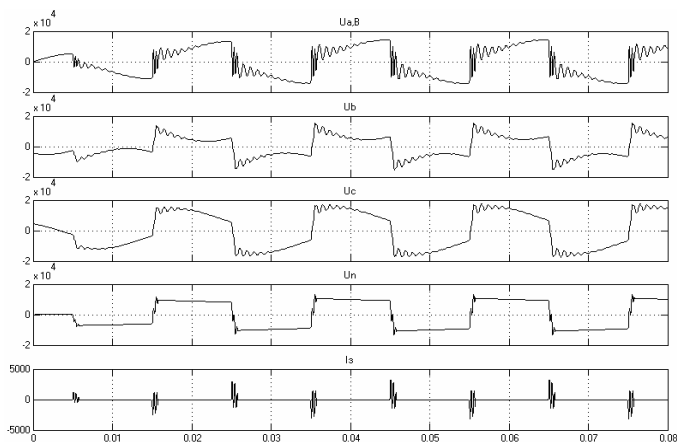


Рис. 1. Дуговое перемежающееся ОЗЗ по теории Петерсена в кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью: U_a , U_b , U_c – напряжения на шинах; U_n – напряжение на нейтрали сети; I_a – ток в месте ОЗЗ

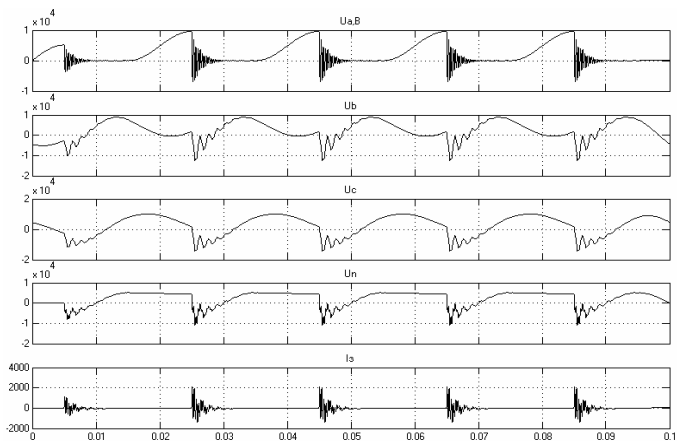


Рис. 2. Дуговое перемежающееся ОЗЗ по теории Петерса и Сляпяна в кабельной сети 6 кВ: U_a , U_b , U_c , U_n , I_a – то же, что и на рис. 1

В настоящее время наиболее точно отражающей физической характер процессов при дуговых перемежающихся ОЗЗ и дающей наиболее точные оценки максимальных перенапряжений считается теория Н.Н. Белякова [3].

Согласно этой теории, дуга может погаснуть как при первом, так как любым последующем переходе через нуль свободной составляющей тока замыкания. Попытка гашения заканчивается удачно, если первый высокочастотный максимум восстанавливающегося напряжения – пик гашения $U_{n,г}$ (рис. 3) не превышает определенного критического значения:

$$U_{n,г} \leq U_{кр}, \quad (1)$$

где величина $U_{кр}$ характеризует диэлектрическую прочность промежутка для момента времени, равного полупериоду колебаний гашения.

Установленная Н.Н. Беляковым при экспериментальных исследованиях максимальная величина $U_{n,г}$ равна ~ 1800 В, что составляет для сетей 6 кВ $0,37U_{ф,ном}$, для сетей 10 кВ – $0,22U_{ф,ном}$. При несоблюдении условия (1) гашение не завершается, т.е. дуга восстанавливается вновь.

Значение $U_{n,г}$ определяет в свою очередь величину напряжения смещения нейтрали сети $U_{см}$, а следовательно, и максимальную величину перенапряжений при повторных пробоях.

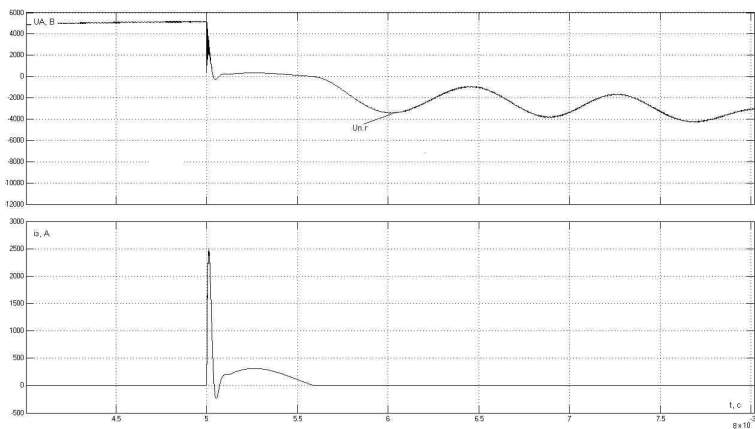


Рис. 3. Пик гашения при однократном пробое изоляции на фазе «А» сети с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{сз} = 20$ А

В соответствии с теорией Н.Н. Белякова для возникновения максимальных перенапряжений не требуется повторных зажиганий дуги, поэтому достаточно рассмотреть один цикл «гашение – зажигание». В этом цикле гашение должно происходить в момент максимума ЭДС поврежденной фазы и при максимально допустимой для гашения крутизне тока, а последующее зажигание должно несколько опережать

максимум восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе (угол зажигания $\psi \approx 68^\circ$ [3]).

На основе изложенных положений Беляковым была предложена следующая формула для оценки максимальных перенапряжений:

$$U_{пер} = \sqrt{3}U_m \sin(\varphi + 30^\circ) + (U_m \sin \varphi - U_{см}) \frac{C_{0\Sigma}}{C_{0\Sigma} + C_{м\Sigma}} (1 - d); \quad (2)$$

$$U_{см} = U_m + \frac{U_{н.э}}{2} \leq 1,2U_m, \quad (3)$$

где U_m – амплитуда фазного напряжения сети; φ – угол (фаза) зажигания заземляющей дуги; $U_{см} = U_N(\varphi)$ – напряжение на нейтрали сети в момент зажигания дуги (напряжение смещения нейтрали); $C_{0\Sigma}$ и $C_{м\Sigma}$ – суммарные емкости сети соответственно между фазой и землей и между фазами; d – коэффициент, учитывающий затухание свободных колебаний вследствие потерь в контуре нулевой последовательности; $\frac{C_{0\Sigma}}{C_{0\Sigma} + C_{м\Sigma}} (1 - d)$ – коэффициент, учитывающий уменьшение колебаний из-за междофазных емкостей и затухания.

Максимальные перенапряжения возникают при угле зажигания φ , равном:

$$\varphi = \arctg \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{C_{0\Sigma}}{C_{0\Sigma} + C_{м\Sigma}} (1 - d) + \sqrt{3} \right]. \quad (4)$$

При характерных для кабельных сетей соотношений $C_{0\Sigma} / C_{м\Sigma} \approx 3$ и $(1 - d) \approx 0,9$ максимальные перенапряжения возникают на отстающей фазе (фазе «В» при ОЗЗ на фазе «А») при угле зажигания $\varphi \approx 68^\circ$ и имеют максимальное значение

$$U_{пер.макс} \approx 3,2U_m. \quad (5)$$

Недостаток решения, предложенный Беляковым, заключается в том, что оно не учитывает реальный характер изменения напряжения на нейтрали сети и реальную частоту свободных колебаний напряжений переходного процесса. Поэтому по теории Белякова по существу предполагается, что напряжение на нейтрали сети за четверть периода свободных колебаний напряжения не изменяется, оставаясь постоянным, и при про-

бое в момент максимума напряжения на «больной» фазе ($\phi = 90^\circ$) перенапряжения на обеих неповрежденных фазах будут одинаковы. Практически, из-за конечной частоты колебаний (частота зарядных колебаний, связанных с дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз в зависимости от параметров сети, источника питания, удаленности места ОЗЗ от шин может изменяться от сотен герц до нескольких килогерц), при $\phi = 90^\circ$ перенапряжения на отстающей фазе «В» будут всегда меньше перенапряжений на опережающей фазе «С» (например, рис. 4). Поэтому представляет интерес более точная аналитическая оценка перенапряжений при дуговых ОЗЗ с учетом реального характера переходных процессов при ОЗЗ.

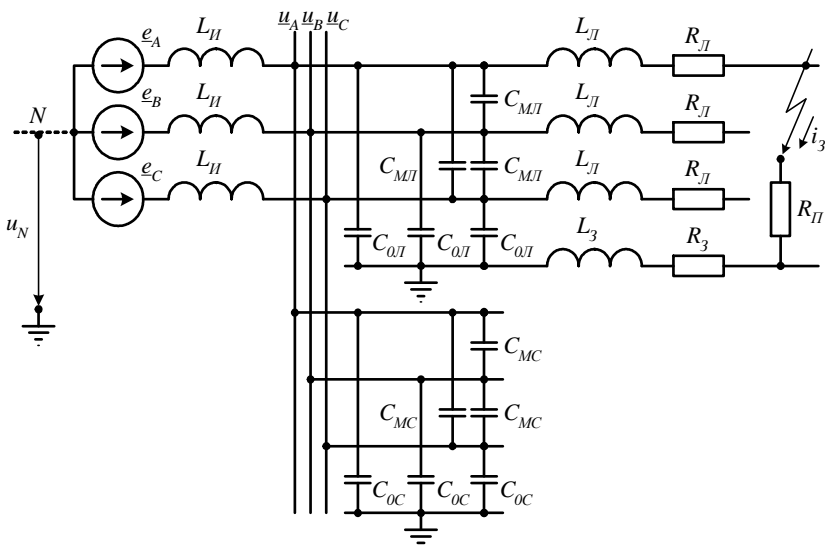


Рис. 4. Схема замещения электрической сети 6 – 10 кВ для исследования переходных процессов при ОЗЗ

Аналитическая оценка перенапряжений при дуговых перемежающихся ОЗЗ. Для уточнения условий возникновения и оценки максимальных перенапряжений по теории Беякова Н.Н. воспользуемся решением уравнений переходного процесса при ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью, полученным в [4] для составляющих нулевой последовательности по схеме замещения сети 6 – 10 кВ по рис. 4:

$$u_0(t) = u_N(t) \approx U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_{mp} e^{-\delta_p t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi \cos \omega_p t - \\ - U_{m3} e^{-\delta_3 t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi \cos \omega_3 t. \quad (6)$$

В уравнении (6) U_{mp} , U_{m3} , ω_p , ω_3 , δ_p , δ_3 – соответственно амплитуды, частоты и постоянные затухания разрядной и зарядной свободных составляющих напряжения и тока переходного процесса при ОЗЗ, определяемые по параметрам элементов схемы замещения на рис. 4 [4]; $u_N(0)$ – смещение нейтрали сети в момент возникновения ОЗЗ.

Ток нулевой последовательности и его составляющие: принужденная, разрядная и зарядная находятся из уравнения:

Решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ для составляющих нулевой последовательности для схемы рис. 4 имеет вид [4]:

$$i_{03} = -C_{0\Sigma} \frac{dU_0}{dt} = -(i_{0np} + i_{0p} + i_{03}) = -C_{0\Sigma} U_m \omega \cos(\omega t + \varphi) - \\ - C_{0\Sigma} U_{mp} e^{-\delta_p t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi \left[-\delta_p \cos \omega_p t + \omega_p \sin \omega_p t \right] - \\ - C_{0\Sigma} U_{m3} e^{-\delta_3 t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi \left[-\delta_3 \cos \omega_3 t + \sin \omega_3 t \right] \approx \\ \approx -C_{0\Sigma} U_m \omega \cos(\omega t + \varphi) - C_{0\Sigma} \omega_p U_{mp} e^{-\delta_p t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi \sin \omega_3 t - \\ - C_{0\Sigma} \omega_3 U_{m3} e^{-\delta_3 t} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi \sin \omega_3 t = \\ \approx -I_{mnp} \cos(\omega t + \varphi) - I_{mp} e^{-\delta_p t} \sin \omega_p t - I_{m3} e^{-\delta_3 t} \sin \omega_3 t, \quad (7)$$

где $I_{mnp} = \sqrt{2} I_{c\Sigma}$ – амплитуда принужденной составляющей переходного

тока i_0 ; $I_{mp} \approx C_{0\Sigma} \omega_p U_{mp} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi$ – амплитуда разрядной со-

ставляющей тока i_0 ; $I_{m3} \approx C_{0\Sigma} \omega_3 U_{m3} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin \varphi$ – амплитуда за-

рядной составляющей тока i_0 .

В индуктивностях источника питания L_u протекают только принужденная и зарядная составляющие тока i_0 . Пренебрегая падением напряжения на индуктивностях L_H от составляющих промышленной частоты и учитывая, что токи зарядной составляющей в неповрежденных фазах «В» и «С» одинаковы и равны $3i_{03}/2$, а в поврежденной фазе «А» их сумме, из трехфазной схемы замещения сети (рис. 4) для фазных напряжений получим:

$$u_a \approx u_N + e_a - L_u \frac{d(3i_{03})}{dt}; \quad (8)$$

$$u_b \approx u_N + e_b - \frac{L_u}{2} \frac{d(3i_{03})}{dt}; \quad (9)$$

$$u_c \approx u_N + e_c - \frac{L_u}{2} \frac{d(3i_{03})}{dt}, \quad (10)$$

где

$$e_a = U_m \sin(\omega t + \varphi); \quad (11)$$

$$e_b = U_m \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right); \quad (12)$$

$$e_c = U_m \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right). \quad (13)$$

Подставляя в выражения (8), (9) и (10) u_N из выражения (3) и i_{03} из (7), получим аналитическое решение для напряжения на поврежденной и неповрежденных фазах. При определении максимальных перенапряжений на неповрежденных фазах значение принимается равным максимальному напряжению смещения по u_{cm} выражению (3). Перенапряжения на неповрежденных фазах достигают максимального значения в момент, когда производная зарядной составляющей тока $i_{03}(t)$ достигает максимума, т.е. при $t = t_m = 2\pi/4\omega$. Из этого следует, что максимальные значения максимум перенапряжений на неповрежденных фазах зависят от частоты зарядных колебаний при ОЗЗ.

Проверка адекватности и достоверности полученного аналитического решения была выполнена посредством сравнения расчетов по выражениям (6) – (13) и результатов моделирования на ЭВМ в программном комплексе MATLAB переходного процесса при ОЗЗ по схеме замещения рис. 4.

На рис. 5 – 8 приведены расчетные зависимости напряжения на нейтрале $u_N(t)$, тока в месте ОЗЗ $i_s(t)$, напряжений неповрежденных фаз $u_b(t)$, $u_c(t)$, полученные на математической модели в системе Matlab и на основе предложенного аналитического решения.

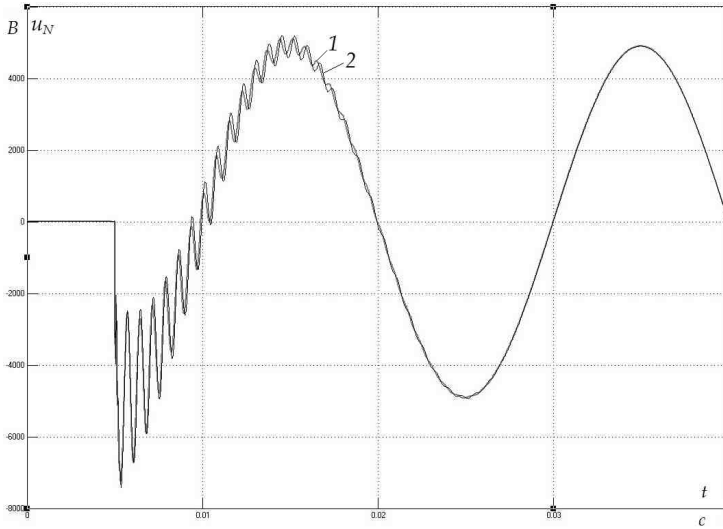


Рис. 5. Зависимости напряжения на нейтрали сети $u_N(t)$: 1 – моделирование на ЭВМ в системе Matlab; 2 – аналитическое решение

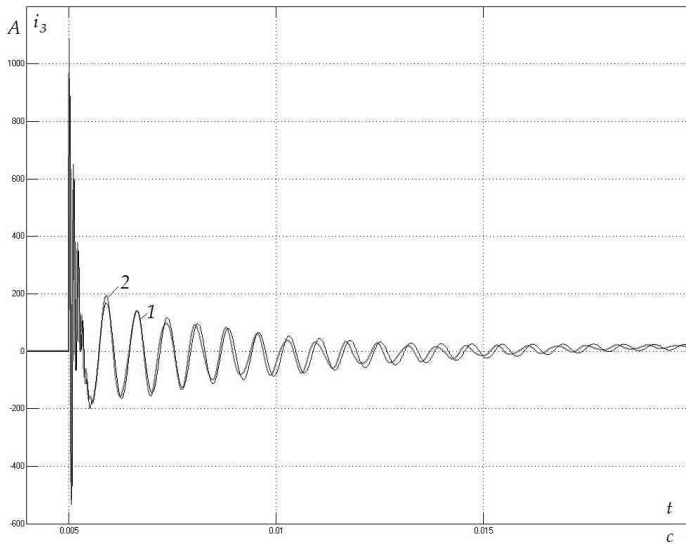


Рис. 6. Зависимости тока в месте ОЗЗ $i_3(t)$: 1 – моделирование на ЭВМ в системе Matlab; 2 – аналитическое решение

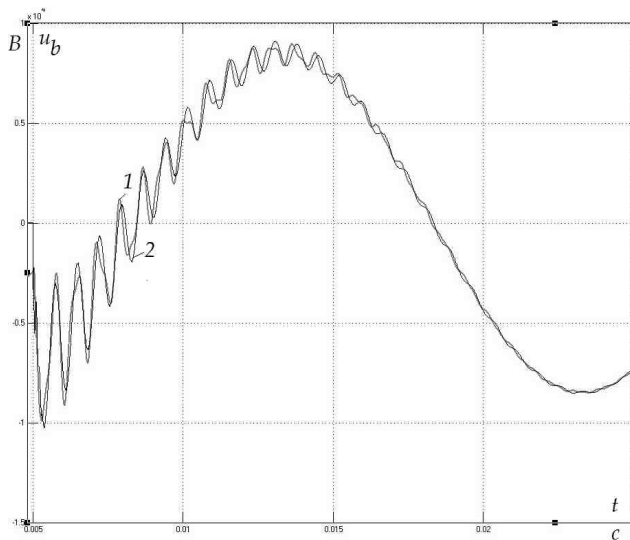


Рис. 7. Зависимости напряжения на неповрежденной отстающей фазе $u_b(t)$: 1 – моделирование на ЭВМ в системе Matlab; 2 – аналитическое решение

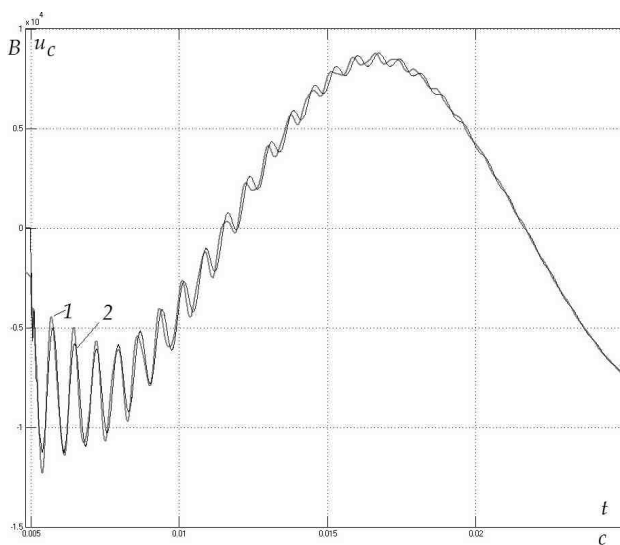


Рис. 8. Зависимости напряжения на неповрежденной опережающей фазе $u_c(t)$: 1 – моделирование на ЭВМ в системе Matlab; 2 – аналитическое решение

Сравнение результатов моделирования на ЭВМ в системе Matlab и аналитических расчетов по двухчастотной схеме замещения (рис. 4) показало, что погрешности последних не превышают 10 – 15 %, что приемлемо для инженерных расчетов.

Выводы

1. Для двухчастотной схемы замещения сети 6 – 10 кВ с изолированной нейтралью получено аналитическое решение уравнений переходного процесса при однофазном замыкании на землю, позволяющее оценить максимальные перенапряжения по теории Беякова с учетом влияния различных факторов: индуктивности источника питания, суммарного емкостного тока, удаленности до точки замыкания и т.п.

2. Сравнение результатов моделирования на ЭВМ в системе Matlab и аналитических расчетов по двухчастотной схеме замещения показало, что погрешности аналитического решения не превышают 10 – 15 %, что приемлемо для инженерных расчетов.

Библиографический список

1. **Лихачев Ф.А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971.
2. **Сиротинский Л.И.** Техника высоких напряжений. Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах. – М.: Госэнергоиздат, 1959.
3. **Беяков Н.Н.** Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ // Электрические станции. – 1957. – № 5. – С. 31 – 36.
4. **Шуин В.А.** Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 3 – 10 кВ // Электричество. – 1991. – № 10. – С. 58 – 61.

РАЗРАБОТКА ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА ПРИСУТСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА АВТОМАТИКИ ОСВЕЩЕНИЯ

А.А. Семушкин, студ.;
рук. А.А. Фомичев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

В настоящее время в России и других странах приобрел большую актуальность вопрос энергосбережения, в частности решаемый автоматизацией освещения по присутствию человека. Как известно сейчас широ-

кое распространение получили инфракрасные (тепловые) датчики движения, но они имеют ряд недостатков связанных с принципом их работы – ложные срабатывания на потоки теплого воздуха, невозможность применения при близком расположении систем отопления, горячего водоснабжения, каких либо других теплых тел (например горячие поверхности и емкости на кухне).

Ниже рассматривается возможность создания емкостных датчиков (реле) как альтернативы ИК датчикам, для целей автоматизации бытового и промышленного освещения, а следовательно и эффективного энергосбережения. Принцип действия – слежение за изменением электрической емкости в контролируемой зоне. Так как действие реле основано на присутствие человека, животного или определенного объема жидкости или диэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью возможно и другое применение датчика.

Основными достоинствами емкостных реле являются:

1) правильная работа датчика не зависит от локализации источников тепла в контролируемой зоне, потоков воздуха, температуры и влажности в помещении;

2) неважен факт движения человека, достаточно его присутствия;

3) низкая стоимость – отпускная оптовая цена по предварительным расчетам равна 250 – 500 руб. в зависимости от комплектации;

4) надежность.

Принцип действия датчика заключается в следующем (рис. 1). Имеем два электрода, установленные на определенном расстоянии друг от друга, между ними есть некоторая геометрическая емкость, прямо пропорционально зависящая от диэлектрической проницаемости среды, где находятся электроды в режиме ожидания (в основном воздух). При вхождении в контролируемую зону реле человека, который на 60 – 80 % состоит из воды (диэлектрическая проницаемость при 20 °С равняется 81), происходит заметное изменение емкости между электродами. Для упрощения последующих расчетов примем, что это емкость некоторого эквивалентного переменного конденсатора.

Если с данным конденсатором последовательно включить резистор, и подключить эту цепь к источнику переменного напряжения, значение которого $U_{И}$, получим на резисторе следующее значение измеряемого напряжения $U_{ИЗМ}$, как функцию от емкости эквивалентного конденсатора:

$$I_{Д} = \frac{U_{Д}}{R + X_{С.ЭКВ}},$$

$$\text{где } X_{С.ЭКВ} = \frac{1}{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_{ЭКВ}}.$$

Тогда

$$U_{ИЗМ.} = \frac{U_D \cdot R}{R + \frac{1}{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_{ЭКВ}}}$$

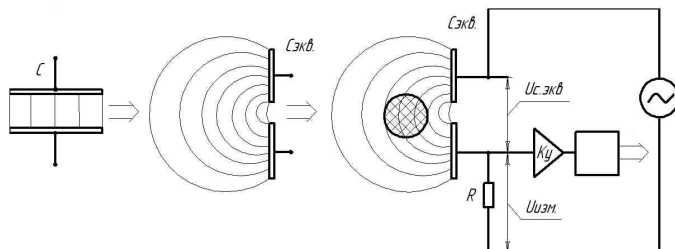


Рис. 1. Принцип действия емкостного датчика

Далее необходимо преобразовать $U_{ИЗМ.}$ до удобных рабочих величин, путем усиления.

Такой датчик может использоваться в помещениях без естественного освещения – санузлы, кладовки и др. Принципиальная схема емкостного датчика приведена на рис. 2.

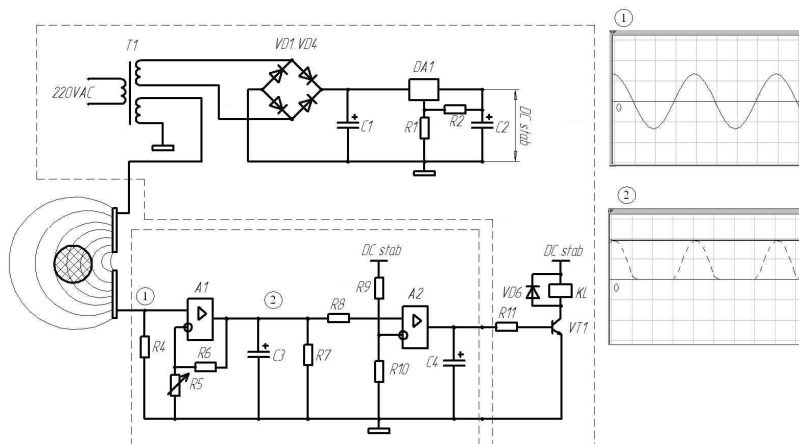


Рис. 2. Принципиальная схема и осциллограммы напряжений в узлах

Конструкция основана на интегральной микросхеме LM358, представляющей собой двухканальный операционный усилитель общего назначения. Данная микросхема широко распространена и имеет низкую

стоимость. На первом канале выполнен неинвертирующий усилитель, коэффициент усиления которого $K_u = 200 - 20000$. Настройка K_u производится подстроечным резистором $R5$. Выход первого канала нагружен на резистор $R7$, параллельно которому включен емкостный фильтр $C3$, т.к. микросхема включена на униполярное стабилизированное питание, то усиливается лишь положительные полупериоды снятого с $R4$ напряжения, а фильтр сглаживает их до постоянного напряжения с незначительным уровнем пульсаций (осциллограммы 1 и 2 соответственно на рис. 2). Данное напряжение подается на неинвертирующий вход второго канала, включенного по схеме компаратора, и таким образом сравнивается с опорным напряжением на инвертирующем входе второго канала. Если уровень напряжения на неинвертирующем входе становится выше опорного, то на выходе второго канала появляется напряжение, которое открывает транзистор $VT1$, что ведет к срабатыванию выходного реле $KL1$. Реле коммутирует осветительную нагрузку в сети переменного напряжения 220 В.

В результате моделирования и опытных испытаний был создан прототип емкостного реле, показавший хорошую чувствительность, стабильность работы, надежность и универсальность. Устройство может эффективно применяться для автоматизации местного освещения, при условии отсутствия необходимости контроля освещенности.

Объем и геометрия контролируемой датчиком зоны зависит от размера и формы электродов, что может стать предметом дальнейших исследований.

*Е.М. Вотякова, Б.А. Гнатюк, студенты;
рук. О.В. Фролова, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ СИМПЛЕКС-МЕТОДОМ»

В процессе своей деятельности инженеру приходится решать задачи, связанные с процессом обработки данных и принятия решений. Данные процессы требуют привлечения математических методов. Одним из таких математических методов является линейное программирование.

Для решения задач линейного программирования применяется симплекс-метод. В целях изучения алгоритма метода разработана программа лабораторной работы.

Целью лабораторной работы является изучение студентами принципов составления математической модели задачи линейного программирования, алгоритма симплекс-метода, решение задачи с помощью программы, реализующей симплекс-метод.

В исходных данных к лабораторной работе задана функция цели и система ограничений в графическом виде.

Необходимо найти неотрицательные значения переменных, удовлетворяющие многоугольнику допустимых решений и придающие минимальное значение целевой функции

$$F = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n. \quad (1)$$

Данная лабораторная работа является обучающей, поэтому полностью автоматизированное решение симплекс-методом неэффективно. Чтобы обучающийся разобрался в основах симплекс-метода и узнал его основные принципы, автоматизируется только часть программы. С помощью программы, реализующей симплекс-метод, определяется минимальное значение функции цели при наличии ограничений и значения переменных в каноническом виде.

Перед вводом данных в программу записывается система ограничений в каноническом виде, вводятся новые переменные и неравенства преобразуются в уравнения.

$$\left. \begin{aligned} x_{\bar{b}a31} + a_{11}x_{c\bar{e}1} + \dots + a_{1p}x_{c\bar{e}p} &= b_1; \\ x_{\bar{b}a32} + a_{21}x_{c\bar{e}1} + \dots + a_{2p}x_{c\bar{e}p} &= b_2; \\ &\dots \\ x_{\bar{b}a3m} + a_{m1}x_{c\bar{e}1} + \dots + a_{mp}x_{c\bar{e}p} &= b_m. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Находится допустимое решение задачи линейного программирования, т.е. выбираются такие свободные и базисные переменные, что при всех $x_{c\bar{e}} = 0$ все $x_{\bar{b}a3} \geq 0$, т.е. все значения $b \geq 0$.

Лабораторная работа выполняется в следующей последовательности: в программу вводятся число переменных n , число ограничений m ; программа создает симплекс-таблицу (табл. 1), в которой $(n - m + 1)$ столбцов ($j = 1 - (n - m + 1)$) и $(m + 1)$ строк ($i = 0 - m$).

Таблица 1. Исходная симплекс-таблица

	$x_{c\bar{e}1}$	$x_{c\bar{e}2}$...	$x_{c\bar{e}p-1}$	$x_{c\bar{e}p}$	b
F			...			
$x_{\bar{b}a31}$...			
$x_{\bar{b}a32}$...			
...
$x_{\bar{b}a3m}$...			

Симплекс-таблица заполняется студентом в т.ч. вводятся индексы свободных и базисных переменных (табл. 2).

Таблица 2. Симплекс-таблица, заполненная пользователем

	$X_{\text{Индекс } X_{св1}}$	$X_{\text{Индекс } X_{св2}}$	...	$X_{\text{Индекс } X_{свp-1}}$	$X_{\text{Индекс } X_{свp}}$	b
F	$a_{0,1}$	$a_{0,2}$	...	$a_{0,p-1}$	$a_{0,p}$	b_0
$X_{\text{Индекс } X_{баз1}}$	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	...	$a_{1,p-1}$	$a_{1,p}$	b_1
$X_{\text{Индекс } X_{баз2}}$	$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	...	$a_{2,p-1}$	$a_{2,p}$	b_2
...
$X_{\text{Индекс } X_{базm}}$	$a_{m,1}$	$a_{m,2}$	...	$a_{m,p-1}$	$a_{m,p}$	b_m

Осуществляется проверка нулевой строки на наличие отрицательных чисел среди элементов $a_{0,1}, a_{0,2}, \dots, a_{0,p-1}, a_{0,p}$.

Если в нулевой строке есть отрицательные числа, то программа выполняет следующие действия:

- поиск максимального по модулю отрицательного элемента $a_{0,l}$ в нулевой строке среди элементов $a_{0,1}, a_{0,2}, \dots, a_{0,p-1}, a_{0,p}$;
- поиск в столбце l всех элементов $a_{i,l} > 0$;
- вычисление во всех i -х строках, в которых $a_{i,l} > 0$, отношения $b_{i,l}/a_{i,l}$;
- поиск минимального значения отношения $b_{i,l}/a_{i,l}$ в строке k , $b_{k,l}/a_{k,l}$;
- l – ведущий столбец, k – ведущая строка, $a_{k,l}$ – ведущий элемент;
- перезаполнение таблицы по следующим правилам:
 - замена x_k на x_l , x_l на x_k ;
 - замена ведущего элемента обратной величиной

$$a_{k,l}' = \frac{1}{a_{k,l}}; \quad (3)$$

– преобразование элементов ведущего столбца (кроме $a_{k,l}$)

$$\begin{aligned} a_{1,l}' &= a_{1,l} \cdot \left(-\frac{1}{a_{k,l}} \right), \\ a_{2,l}' &= a_{2,l} \cdot \left(-\frac{1}{a_{k,l}} \right), \\ &\dots \\ a_{m,l}' &= a_{m,l} \cdot \left(-\frac{1}{a_{k,l}} \right); \end{aligned} \quad (4)$$

– преобразование элементов ведущей строки (кроме $a_{k,l}$)

$$\begin{aligned}
 a_{k,0}' &= a_{k,0} \cdot \left(\frac{1}{a_{k,l}} \right), \\
 a_{k,1}' &= a_{k,1} \cdot \left(\frac{1}{a_{k,l}} \right), \\
 &\dots \\
 a_{k,p}' &= a_{k,p} \cdot \left(\frac{1}{a_{k,l}} \right);
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

– вычисление b_0'

$$b_0' = b_0 + \frac{a_{i,l} \cdot a_{k,j}}{a_{k,l}};
 \tag{6}$$

– преобразование оставшихся элементов таблицы (табл. 3)

$$a_{i,j}' = a_{i,j} - \frac{a_{i,l} \cdot a_{k,j}}{a_{k,l}}.
 \tag{7}$$

Таблица 3. Преобразованная симплекс-таблица

	$X_{\text{Индекс } X_{cв1}}$	$X_{\text{Индекс } X_{cв2}}$	...	$X_{\text{Индекс } X_{базk}}$	...	$X_{\text{Индекс } X_{свр-1}}$	$X_{\text{Индекс } X_{свр}}$	b
F	$a_{0,1}'$	$a_{0,2}'$	...	$a_{0,l}'$	...	$a_{0,p-1}'$	$a_{0,p}'$	b_0'
$X_{\text{Индекс } X_{баз1}}$	$a_{1,1}'$	$a_{1,2}'$	...	$a_{1,l}'$	...	$a_{1,p-1}'$	$a_{1,p}'$	b_1'
$X_{\text{Индекс } X_{баз2}}$	$a_{2,1}'$	$a_{2,2}'$	...	$a_{2,l}'$	...	$a_{2,p-1}'$	$a_{2,p}'$	b_2'
...
$X_{\text{Индекс } X_{св1}}$	$a_{k,1}'$	$a_{k,2}'$	...	$a_{k,l}'$	...	$a_{k,p-1}'$	$a_{k,p}'$	b_k'
...
$X_{\text{Индекс } X_{базm}}$	$a_{m,1}'$	$a_{m,2}'$	...	$a_{m,l}'$	...	$a_{m,p-1}'$	$a_{m,p}'$	b_m'

• переписывание значений

$$x_{базk}' = x_{св1},
 \tag{8}$$

$$x_{базl}' = x_{свk}.
 \tag{9}$$

Если в нулевой строке нет отрицательных чисел, то найдено оптимальное решение

$$x_{св1} = x_{св2} = \dots = x_{свр} = 0;
 \tag{10}$$

$$x_{\text{баз}1} = b_1, x_{\text{баз}2} = b_2, \dots, x_{\text{баз}m} = b_m; \quad (11)$$

$$F_{\text{min}} = b_0; \quad (12)$$

- выполняется вывод решения и его графическая проверка.

Выводы

Создан алгоритм работы программы, который позволяет решить задачу линейного программирования для 50 переменных.

На основании алгоритма выполнена программа диалоговой лабораторной работы по дисциплине «Математические задачи электроэнергетики» для студентов 5 семестра обучения специальности 140203 «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Программа адаптирована для современных операционных систем.

Внедрение планируется в осеннем семестре 2012 – 2013 года.

Библиографический список

1. Математическое программирование: учеб. пособие для вузов / Ю.Н. Кузнецов и др. – М.: Высш. шк., 1971.

С.Ю. Токарев, асп.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПРИГОДНОСТЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

Волновые (переходные) процессы, по своей природе, кратковременны [15, рис. 1.1]. Причем, чем короче такой процесс, тем шире его спектр [2, стр. 33]. В общем случае, он может содержать частотные составляющие от нескольких кГц до нескольких МГц [9].

Анализ этих процессов может проводиться, например, с помощью устройств РЗиА. При этом на входы таких устройств должны быть подведены сигналы от измерительных трансформаторов.

Очевидно, что в этом случае измерительные трансформаторы выступают промежуточными звеньями, обладающими присущими им характеристиками. Трансформация исходного сигнала происходит как по амплитуде, так и по фазе.

Полосы пропускания измерительных трансформаторов имеют конечные значения, налагающие ограничения на возможность анализа свойств волновым процессам высокочастотных составляющих сигнала.

Обычные (электромагнитные) измерительные трансформаторы, получившие широкое распространение в энергосистемах, имеют достаточно скромную ширину полосы пропускания.

Такой трансформатор напряжения хорошо пропускает лишь сигналы номинальной частоты. Сигналы более высоких частот значительно ослабляются и на частоте около 1 кГц почти полностью затухают [10, п. 5.2.3].

Измерительный трансформатор тока того же принципа (электромагнитного) имеет значительно более широкую полосу пропускания. Сигнал практически не ослабляется вплоть до частот порядка 20 кГц [10, п. 5.3.3].

В последнее время все большее количество производителей электроэнергетического оборудования предлагают оптические измерительные трансформаторы [6], обладающие значительно более широкой полосой пропускания [5]. При этом они имеют более высокий класс точности [3, 6]; их время отклика быстрее [8, 6]; динамическая характеристика лучше [5, 3]; они невосприимчивы к электромагнитному индукционному шуму [8]; неподвержены влияниям феррорезонанса [8], насыщения и гистерезиса [3].

Оптические измерительные трансформаторы располагают двумя аналоговыми и одним цифровым выходом [3].

Аналоговым выходам присуще достаточное высокое (даже превышающее характерное для обычных измерительных трансформаторов) содержание белого шума. Однако его среднее Гауссово распределение имеет нулевое значение. Таким образом, используя методы фильтрации можно в значительной степени устранить влияние этого шума. Источником появления такого уровня шума являются как характерный для оптоэлектронных систем собственный шум, так и собственно особенности выполнения оптического датчика [6].

Цифровой выход имеет полосу пропускания значительно уже аналоговых. Этот факт вызван не какими-либо физическими особенностями головки оптического датчика, а возможностями используемой в цепях цифрового тракта электроники промышленно выпускаемых моделей оптических трансформаторов. Таким образом, использование более совершенной электронной базы может расширить полосу пропускания цифрового выхода, но при этом увеличит стоимость самого трансформатора [6].

Помимо этого, использование цифрового выхода позволяет использовать один и тот же измерительный трансформатор как для целей РЗА,

так и измерений [5]. Количество подключенных устройств (вторичной нагрузки) при этом не оказывает влияния на точность измерений. Такая возможность достигается за счет использования передачи именно цифровой информации о токах и напряжениях [14] от цифрового измерительного трансформатора к адресату – IED [11]. К тому же, применение цифрового канала связи полностью исключает влияние погрешностей, характерных для каналов связи (медных проводов) обычных измерительных трансформаторов [1].

Действительно, цифровой канал не подвержен наводкам и влиянию изменения температуры окружающей среды. Это становится особенно актуальным при постановке задачи об идентификации электроэнергетического объекта на основании анализа входных и выходных волновых сигналов. Шум, содержащийся в измеренном сигнале, может привести к тому, что процесс идентификации будет сходиться в значительной степени медленно и потребует использования аппроксимации чрезмерно высокой степени [7, А. 4.2.1]

Таким образом, при анализе волновых процессов использование токовых сигналов обычных (электромагнитных) измерительных трансформаторов является более предпочтительным по сравнению с сигналами напряжения трансформаторов этого же принципа, полоса пропускания которых уже.

Использование оптических измерительных трансформаторов позволяет анализировать сигналы еще более широкого (недоступного для измерения обычными токовыми трансформаторами) спектра. Стоимость оптических измерительных трансформаторов значительно выше электромагнитных. Однако возможности, открывающиеся использованием алгоритмов, основанных на распространении волн в многопроводных линиях, позволяют в значительной мере обосновывать применение оптических трансформаторов не только для целей измерений, но и для РЗиА [8].

Передача сигналов от измерительных трансформаторов в цифровом виде [13, п. 7.4.4] снимает ряд характерных (для аналоговой передачи) проблем. Однако в ряде случаев делает принципиально невозможным использование волновых сигналов. Такая ситуация случается при передаче сигналов недостаточной (для анализа волновых процессов) частоты дискретизации [12, п. 19.2.1.8]. При использовании «облегченной» передачи данных [4, п. 7.1.4] такая проблема возникает всегда.

Библиографический список

1. **Гречухин В.Н., Лебедев В.Д.** Цифровой комбинированный трансформатор тока и напряжения на базе стандартного трансформатора напряжения // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – Спец. выпуск. – С. 98 – 99.

2. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011.
3. **Blake J.** Fiber optic current sensor calibration // Proc. IEEE Transm. Distrib. Conf. Expo. – Atlanta, GA – 2001. – Pp. 127 – 130.
4. **IEC 61850-9-2LE (Light edition) Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers using IEC 61850-9-2.** – UCA International Users Group.
5. **Kezunovic M., Portillo L., Karady G., Kucuksari S.** Impact of Optical Instrument Transformer Characteristics on the Performance of Protective Relays and Power Quality Meters // Proc 2006 Transmission & Distribution Conference and Exposition. – Latin America. – Pp. 1 – 7.
6. **Kucuksari S., Karady G.** Experimental comparison of conventional and optical current transformers // IEEE Trans. Power Delivery. – 2010. – Vol. 25. – Pp. 2455 – 2463.
7. **Martinez-Velasco Juan A. (ed.).** Power System Transients: Parameter Determination. – CRC Press, 2009.
8. **Nie Y., Yin X., Li K., Ye M.** Development of an optical voltage transformer for power protection relays // Electrical Power System Research. – 2002. – Vol. 61. – Pp 127 – 131.
9. **Pathirana V., Dirks A., McLaren P.G.** Hardware and software implementation of a travelling wave based protection relay // Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting. – 2005. – Vol. 1. – P. 701.
10. **Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E.** Fault Location on Power Networks // London: Springer, 2010.
11. **TC-57.** Communication networks and systems in substations. – Part 1: Introduction and overview. Standard IEC/TR 61850. – Edition 1.0. – IEC, 2003.
12. **TC-57.** Communication networks and systems in substations. – Part 7-2: Basic information and communication structure. – Abstract Communication Service Interface (ACSI). Standard 61850-7-2. – Edition 2.0. – IEC, 2010.
13. **TC-57.** Communication networks and systems in substations. – Part 7-3: Basic communication structure. – Common Data Classes (CDC). Standard 61850-7-3. – Edition 2.0. – IEC, 2010.
14. **TC-57.** Communication networks and systems for power utility automation. – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM). – Sampled values over ISO/IEC 8802-3. Standard 61850-9-2. – Edition 2.0. – IEC, 2011.
15. **Watson N., Arrillaga J.** Power Systems Electromagnetic Transients Simulation. – The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2007.

Д.Н. Кокоулин, асп.;
рук. В.А. Шуин, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПУСКОВЫХ ОРГАНОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ, ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ АВАРИЙНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКОВ, ПРИ СИНХРОННЫХ КАЧАНИЯХ

Введение. В режиме синхронных качаний в электроэнергетических системах (ЭЭС) изменения токов в линиях электропередачи (ЛЭП) и напряжений на шинах подстанций и электростанций могут быть не только

соизмеримыми с изменениями указанных электрических величин при коротких замыканиях (КЗ), но и превышать последние. Поскольку синхронные качания не являются аварийным режимом, то пусковые органы (ПО) релейной защиты (РЗ) не должны срабатывать, при этом ПО должны обеспечивать устойчивые срабатывания при КЗ, как сопровождаемых качаниями, так и при КЗ без качаний. Для построения подобных ПО устройств РЗ, прежде всего дистанционных защит ЛЭП [1 – 3 и др.], достаточно широкое распространение получили алгоритмы, основанные на использовании аварийных составляющих, в частности, токов прямой и обратной последовательности.

Ниже рассматривается алгоритм функционирования ПО РЗ, основанный на контроле указанных составляющих.

Анализ работы ПО РЗ, основанных на использовании токов прямой и обратной последовательности, при синхронных качаниях в ЭЭС. Функционально-логическая схема алгоритма представлена на рис. 1.

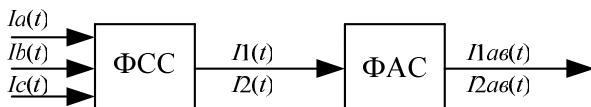


Рис. 1. Общая функциональная схема выделения аварийных составляющих тока прямой и обратной последовательности: ФСС – фильтр симметричных составляющих; ФАС – фильтр аварийных составляющих

Изменяя частоту скольжения в системе проанализируем поведение алгоритма. Режим качаний является симметричным режимом. Появление тока обратной последовательности связано с несколькими причинами:

- а) постоянным наличием тока обратной последовательности в системе, связанным с несимметричной нагрузкой по фазам;
- б) небалансом на выходе ФАС, связанным с погрешностями алгоритма.

В данном исследовании рассматривается симметричная система с симметричной нагрузкой, поэтому появление тока обратной последовательности будет обусловлено поведением ФАС. Рассмотрим поведение ФАС при изменении частоты сигнала, причем на каскад фильтров (ФСС и ФАС, рис. 1) подается ток качаний с частотой скольжения от 1 до 10 Гц. В указанном режиме контролируется небаланс на выходе ФАС для тока обратной последовательности, а также проводится оценка коэффициента небаланса данного фильтра в зависимости от частоты скольжения.

Под коэффициентом небаланса фильтра понимается отношение величины на выходе каскада фильтров ФСС и ФАС к величине на входе $K_{\text{НЕБ}} = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХОД}}}$, где $I_{\text{вых}}$ – величина на выходе каскада фильтров; $I_{\text{вход}}$ – ве-

личина на входе исследуемого каскада. С целью упрощения нахождения коэффициента небаланса на вход каскада будем подавать сигнал единичной амплитуды, тогда значение максимального сигнала (тока обратной последовательности) на выходе каскада будет являться искомым коэффициентом небаланса.

Симметричные составляющие определяются по выражениям:

$$\dot{i}_1 = \frac{\dot{i}_A + \dot{i}_B \cdot e^{i120^\circ} + \dot{i}_C \cdot e^{i240^\circ}}{3}; \quad (1)$$

$$\dot{i}_2 = \frac{\dot{i}_A + \dot{i}_B \cdot e^{i240^\circ} + \dot{i}_C \cdot e^{i120^\circ}}{3}. \quad (2)$$

Для вычисления аварийных составляющих используются следующие выражения:

$$I1_{ABAF_i} = I1_i + 3 \cdot I1_{i-\frac{N}{2}} + 3 \cdot I1_{i-N} + I1_{i-\frac{3 \cdot N}{2}}; \quad (3)$$

$$I2_{ABAF_i} = I2_i + 3 \cdot I2_{i-\frac{N}{2}} + 3 \cdot I2_{i-N} + I2_{i-\frac{3 \cdot N}{2}}. \quad (4)$$

Сформируем исходный сигнал с частотой скольжения 1 Гц и амплитудой тока прямой последовательности 1 А (рис. 2). Фазные токи подаются на ФСС (рис. 1), в результате формируется ток обратной последовательности, который обусловлен погрешностью фильтрации (рис. 3).

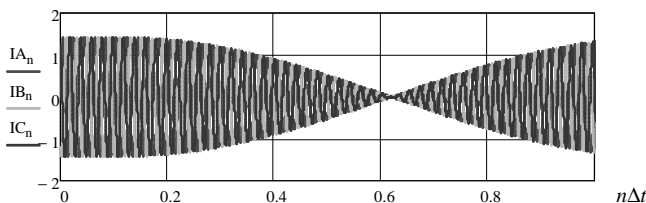


Рис. 2. Фазные токи в режиме синхронных качаний при частоте скольжения 1 Гц

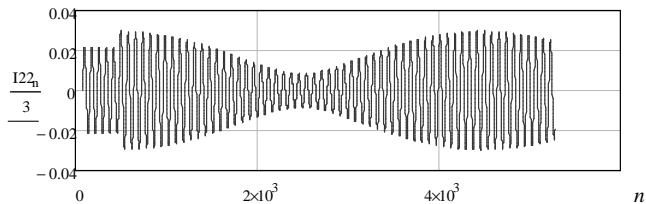


Рис. 3. Ток обратной последовательности на выходе ФСС при частоте скольжения 1 Гц

На выходе ФАС обеспечивается формирование аварийной составляющей тока обратной последовательности, которая в режиме качаний обусловленная погрешностями фильтрации (рис. 4).

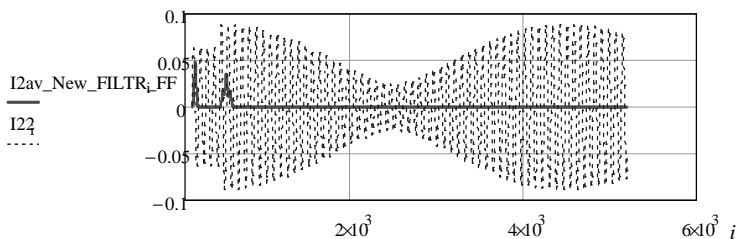


Рис. 4. Аварийная составляющая тока обратной последовательности на выходе ФАС при частоте скольжения 1 Гц

Из рис. 4 можно видеть, что аварийная составляющая тока обратной последовательности $I_{2AV_New_FILTR_FF}$ имеет два всплеска на первоначальных этапах моделирования. Данные всплески при анализе качаний учитывать нет необходимости, так как эти скачки есть реакция ФАС на резкое изменение входного сигнала (тока обратной последовательности). Первый всплеск обусловлен тем, что значение тока в доаварийном режиме, которые мы задаем на первоначальном этапе моделирования, резко возрастает с нулевого значения. ФАС набирает информацию о сигнале. Второй всплеск обусловлен переходом из доаварийного режима в режим качаний. Максимальное значение аварийной составляющей тока обратной последовательности на оставшемся интервале будет равно $1,069 \cdot 10^{-5}$.

На рис. 5 – 7 представлены зависимости, аналогичные зависимостям, представленным на рис. 2 – 4, но для частоты скольжения 10 Гц.

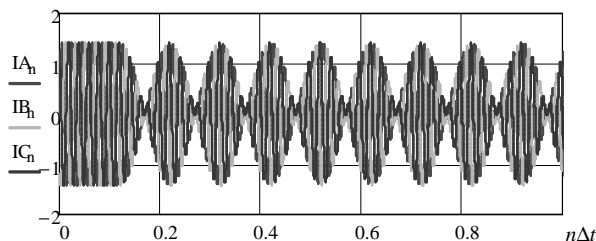


Рис. 5. Фазные токи в режиме качаний при частоте скольжения 10 Гц

Коэффициент небаланса при частоте скольжения 10 Гц будет равен 0,04 – максимальному значению аварийной составляющей тока обратной последовательности в установившемся режиме (рис. 7).

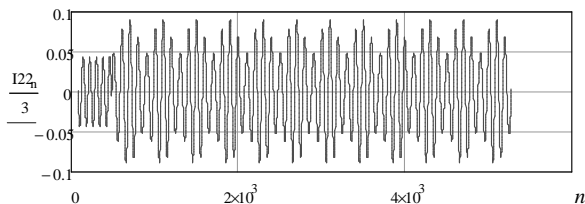


Рис. 6. Ток обратной последовательности при частоте скольжения 10 Гц

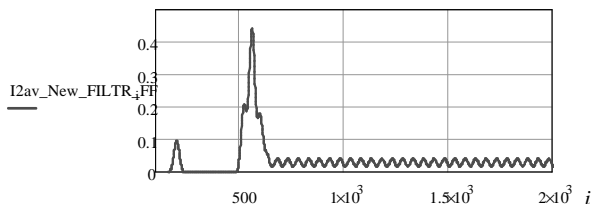


Рис. 7. Аварийная составляющая тока обратной последовательности при частоте скольжения 10 Гц

Результаты проведенных исследований сведены в табл. 1. В табл. 1 приведено значение коэффициента небаланса с дополнительной фильтрацией. Дополнительная фильтрация реализована нерекурсивным фильтром, не изменяющим фазу сигнала:

$$Y_i = \sum_{n=0}^a X_{i-n} \cdot L_n, \quad (5)$$

где X – входная величина; L – коэффициенты фильтра; a – длина фильтра; Y – выходная величина.

На рис. 8 приведены зависимости значений коэффициента небаланса без дополнительной фильтрации и с дополнительной фильтрацией аварийной составляющей тока обратной последовательности.

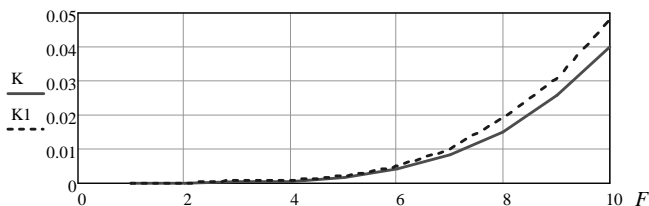


Рис. 8. Зависимость коэффициентов небаланса от частоты скольжения: K – коэффициент небаланса с дополнительной фильтрацией аварийной составляющей тока обратной последовательности; $K1$ – коэффициент небаланса без дополнительной фильтрацией аварийной составляющей тока обратной последовательности

Выводы. На основе проведенных с использованием математического моделирования исследований можно сделать следующие выводы.

1. При помощи дополнительной фильтрации, основанной на нерекурсивном фильтре, можно обеспечить уменьшение коэффициента небаланса по току обратной последовательности, возникающего в режиме синхронных качаний.

2. Полученные значения коэффициента небаланса могут использоваться для отстройки ПО устройств РЗ от режима качаний в ЭЭС.

Библиографический список

1. **Шнеерсон Э.М.** Дистанционные защиты – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. **Циглер Г.** Цифровая дистанционная защита принципы и применение: пер. с англ. / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоиздат, 2005.
3. **Чернобровов Н.В., Семенов В.А.** Релейная защита энергетических систем: учеб. пособие для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1998.