

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА АСИНХРОННОГО ПУСКА ЯВНОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.К. ГРОМОВ, канд. техн. наук, В.Н. КАРАУЛОВ, канд. техн. наук

Представлены анализ и результаты методов расчета асинхронного пуска явнополюсного синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением. Анализируются методы, основанные на использовании схем замещения фазы якоря по осям d и q , уравнений Парка-Горева, частотных характеристик фазы якоря с детальным представлением многообразия электромагнитных связей контуров электрической машины по осям d и q .

Ключевые слова: синхронный двигатель, асинхронный пуск, пусковой режим, пусковые характеристики, частотные характеристики.

THE ANALYSES AND THE RESULTS OF CALCULATION METHODS OF SALIENT-POLE SYNCHRONOUS MOTORS

A.K. Gromov, Ph.D., V.N. Karaulov, Ph.D.

This paper represents the analysis and the results of calculation methods of salient-pole synchronous motor with electromagnetic drive asynchronous start. There is the analyses of methods, which are based on using the armature phase equivalent circuits in D- and Q-directions, Park-Gorev's equations, armature phase frequency performance with the detailed representation of electromagnetic cohesions variety of electrical machine circuit in D- and Q-directions.

Key words: synchronous motor, asynchronous start, starting regime, startability, frequency performance.

При асинхронном пуске синхронного двигателя рабочий поток вращается относительно ротора с частотой скольжения. Согласно теории двух реакций, в явнополюсных машинах рабочий поток раскладывается на составляющие, пульсирующие по продольной и поперечной осям ротора. Соответственно, ток якоря раскладывается на продольную I_d и поперечную I_q составляющие. Для расчета составляющих тока якоря используются следующие методы: метод, основанный на использовании схем замещения фазы якоря по осям d и q ; метод, основанный на использовании уравнений Парка-Горева; метод, основанный на использовании частотных характеристик фазы якоря с детальным представлением многообразия электромагнитных связей контуров электрической машины по осям d и q . Ниже представлен анализ и результаты методов расчета асинхронного пуска трехфазного явнополюсного синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением при симметричном синусоидальном питающем напряжении со следующими номинальными данными: мощность $P_{ном} = 500$ кВт; линейное напряжение $U_{ном} = 6000$ В; частота вращения $n_{ном} = 500$ об/мин; частота $f = 50$ Гц.

Основные положения метода расчета асинхронного пуска синхронного двигателя, основанного на использовании схем замещения фазы якоря по осям d и q . Одноосные обмотки ротора заменяются в расчете на эквивалентные трехфазные (приведенные обмотки), устроенные так же, как и обмотка якоря. По продольной оси ротора располагаются эквивалентные трехфазные обмотка возбуждения и продольная демпферная обмотка; по поперечной оси – эквивалентная трехфазная поперечная демпферная обмотка. У всех обмоток, расположенных по продольной оси ротора, главные индуктивные сопротивления фаз одинаковы и равны индуктивному сопротивлению реакции якоря по продольной оси $X_{ад}$. У поперечной демпферной обмотки главное индуктивное сопротивление фазы равно индуктивному сопротивлению реакции якоря по поперечной оси $X_{ақ}$. При асинхронном пуске насыщением магнитной

цепи на пути рабочего потока можно пренебречь, поскольку происходит его вытеснение на пути потоков рассеяния ротора; сопротивления $X_{ад}$ и $X_{ақ}$ при асинхронном пуске имеют ненасыщенные значения. Величины активных сопротивлений и индуктивных сопротивлений рассеяния фаз обмоток ротора (приведенных) рассчитываются по обмоточным данным реальных обмоток.

Электромагнитные связи обмотки якоря с обмотками ротора представляются в виде схем замещения по осям d и q , соответственно, для продольного и поперечного токов якоря. Токи в схемах рассчитываются независимо. Принимается допущение, что электромагнитные процессы происходят значительно быстрее механического процесса. Поэтому при расчете токов скорость вращения ротора считается постоянной (скольжение задано и не изменяется), т.е. рассчитывается квазистационарный режим работы. При неизменном скольжении и синусоидальном питающем напряжении составляющие тока якоря по осям d и q являются синусоидальными.

Вследствие магнитной и электрической несимметрии явнополюсной машины действующие значения продольного I_d и поперечного I_q токов якоря неодинаковы и поле в машине является эллиптическим. Согласно методу симметричных составляющих, эллиптическое поле представляется суммой круговых полей, создаваемых токами якоря прямой и обратной последовательностей. Ток прямой последовательности I_1 изменяется с частотой сети, ток обратной последовательности I_2 – с частотой $2s-1$. Значения токов I_1 и I_2 рассчитываются по формулам [1]:

$$I_1 = \frac{\dot{U} \left[\frac{Z_{ds} + Z_{qs}}{2s-1} + \frac{2R_1}{2s-1} \right]}{\left(\frac{Z_{ds} + R_1}{2s-1} \right) \left[\frac{Z_{qs} + R_1}{2s-1} \right] + \left(\frac{Z_{qs} + R_1}{2s-1} \right) \left[\frac{Z_{ds} + R_1}{2s-1} \right]}, \quad (1)$$

$$i_2 = \frac{\dot{U} [Z_{qs} - Z_{ds}]}{(Z_{ds} + R_1) \left[Z_{qs} + \frac{R_1}{2s-1} \right] + (Z_{qs} + R_1) \left[Z_{ds} + \frac{R_1}{2s-1} \right]}, \quad (2)$$

Действующее значение полного тока якоря

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2}. \quad (3)$$

Электромагнитный момент рассчитывается по величине прямой и обратной составляющих тока якоря (в относительных единицах):

$$M = \left(\dot{U} I_{1a} - I_1^2 R_1 + I_2^2 \frac{R_1}{2s-1} \right) \frac{1}{\cos(\varphi_{ном})}, \quad (4)$$

где I_{1a} – активная составляющая тока I_1 .

Метод, основанный на использовании схем замещения фазы якоря по осям d и q, позволяет рассчитать статические пусковые характеристики $I = f(s)$ (рис. 1) и $M = f(s)$ (рис. 2).

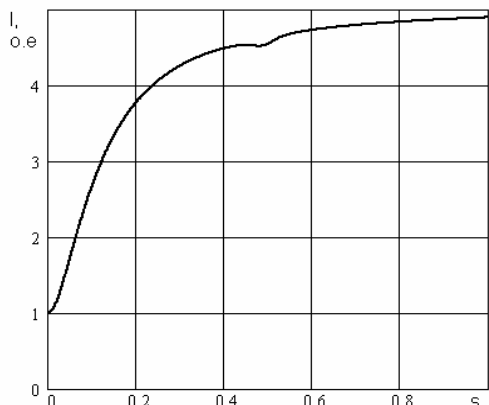


Рис. 1

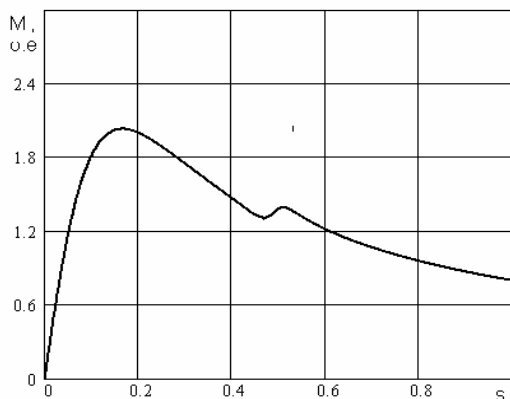


Рис. 2

Характеристики представляют изменение действующего значения тока якоря и среднего значения электромагнитного момента в функции скольжения.

Использование схем замещения фазы якоря по осям d и q, позволяет с достаточной точностью рассчитать статические пусковые характеристики явнополюсного синхронного двигателя $I = f(s)$ и $M = f(s)$. Метод не позволяет вычислить мгновенные значения тока и момента, в частности: значения ударных токов в обмотках якоря, возбуждения, в стержнях демпферной обмотки; периодические составляющие момента, возникающие вследствие протекания в обмотках апериодических затухающих токов и токов обратной последовательности, появляющихся при несимметричном питании якоря

и изменяющихся с частотой сети; перегрев обмоток при пуске; продолжительность пуска.

Основные положения метода расчета, основанного на использовании уравнений Парка-Горева.

Уравнения Парка-Горева представляют электромагнитные процессы в синхронной явнополюсной машине и позволяют рассчитать мгновенные значения токов в фазах якоря и электромагнитного момента. Обмотки ротора заменяются на эквивалентные трехфазные, устроенные так же, как обмотка якоря, и расположенные по осям d и q ротора. Мгновенные токи, потокосцепления и напряжения всех обмоток представляются в виде изображающих векторов. Проекция изображающего вектора переменной на оси фаз определяют ее мгновенные значения. Система уравнений Парка-Горева представляет собой уравнения напряжений обмоток, записанные для проекций изображающих векторов на вращающиеся оси d и q ротора. Соответственно, переменные всех обмоток представляются в уравнениях продольными и поперечными составляющими. Мгновенное значение электромагнитного момента рассчитывается по величине составляющих тока и потокосцепления якоря. Механический процесс описывается дифференциальным уравнением механического движения. Уравнения Парка-Горева и механического движения рассчитываются методами численного интегрирования.

Ниже приведены рабочие формулы, используемые в методе [2].

Производные токов в обмотках выражаются из уравнений Парка-Горева:

$$\dot{i}(t) = L^{-1}(u(t) - R i(t) + \omega L i(t)), \quad (5)$$

где i и u – соответственно, вектор-столбец токов и вектор-столбец напряжений на зажимах обмоток:

$$i = \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{pmatrix}, \quad u = \begin{pmatrix} U_m \cdot \cos(\omega t) \\ U_m \cdot \sin(\omega t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

i_d и i_q – составляющие тока обмотки якоря в системе координат d и q; i_f – ток обмотки возбуждения; i_{kd} и i_{kq} – соответственно, токи в главных фазах продольной и поперечной демпферных обмоток; R – активные сопротивления фаз статора и приведенных обмоток ротора в матричном виде:

$$R = \begin{pmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kq} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

L – индуктивности фаз по осям d и q в матричном виде:

$$L = \begin{pmatrix} L_{ad} + L_1 & 0 & L_{ad} & L_{ad} & 0 \\ 0 & L_{aq} + L_1 & 0 & 0 & L_{aq} \\ L_{ad} & 0 & L_{ad} + L_f & L_{ad} & 0 \\ L_{ad} & 0 & L_{ad} & L_{ad} + L_{kd} & 0 \\ 0 & L_{aq} & 0 & 0 & L_{ad} + L_{kq} \end{pmatrix}; \quad (8)$$

L_{ad} и L_{aq} – индуктивности, определяющие потокосцепление фаз с продольной и поперечной составляющими рабочего потока; L_1 , L_f , L_{kd} , L_{kq} – индуктивности рассеяния фаз статора и приведенных обмоток ротора.

Мгновенные значения электромагнитного момента M рассчитываются по величине мгновенных значений токов в обмотках:

$$M = \left(i_d(L_{aq} + L_1)i_q + L_{aq}i_{kd} - i_q(L_{ad} + L_1)i_d + L_{ad}(i_f + i_{kd}) \right) \frac{3p}{2}. \quad (9)$$

Метод, основанный на использовании уравнений Парка-Горева, позволяет рассчитать пусковые характеристики явнополюсного синхронного двигателя $i = f(t)$ и $M = f(t)$ при тех же допущениях, что и метод, основанный на использовании схем замещения фазы якоря по осям d и q .

Ниже представлены рассчитанные по уравнениям Парка-Горева мгновенные значения: составляющих тока якоря по осям d и q (рис. 3); токов в фазах обмотки якоря (рис. 4); угловой скорости ротора (рис. 5); мгновенные и средние значения электромагнитного момента (рис. 6).

Расчет асинхронного пуска с помощью уравнений Парка-Горева дает значения величин ударного тока якоря и ударного момента, возникающих в процессе асинхронного пуска. Однако и уравнения Парка-Горева не позволяют вычислить токи в отдельных стержнях демпферной обмотки, учесть влияние поверхностного эффекта и насыщения на путях потоков рассеяния стержней и, соответственно, рассчитать температуры стержней в конце пуска.

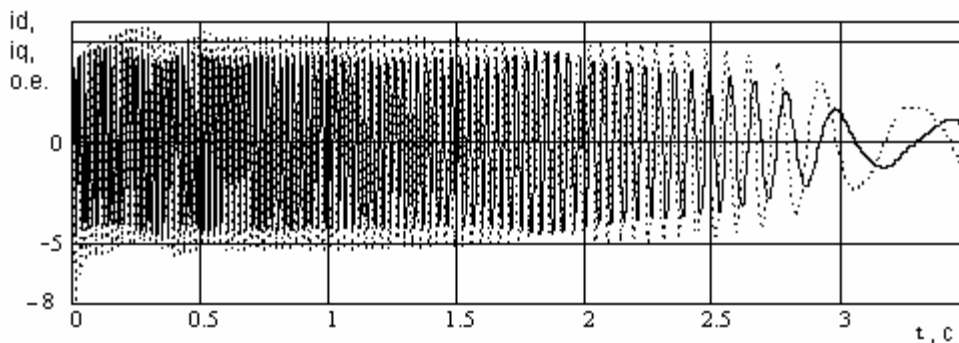


Рис. 3

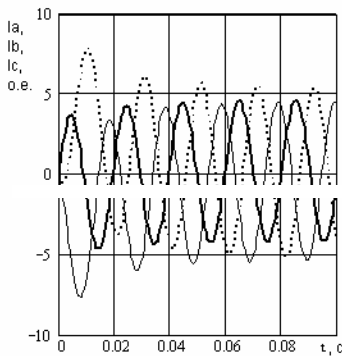


Рис. 4

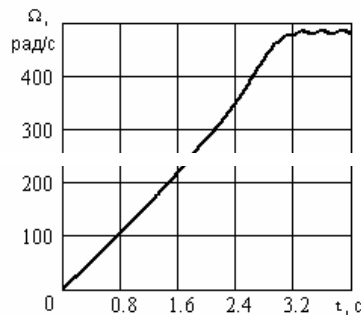


Рис. 5

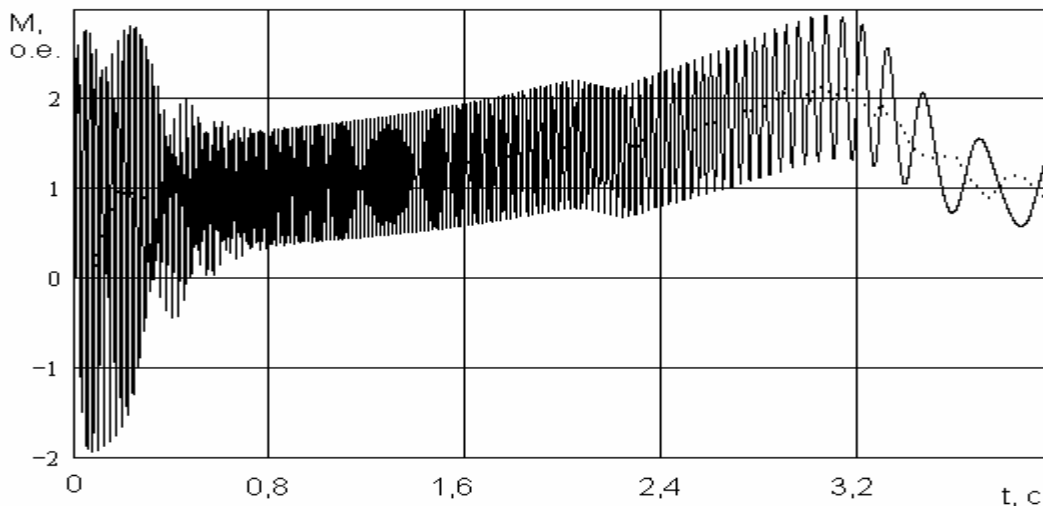


Рис. 6

Основные положения метода расчета, основанного на использовании частотных характеристик фазы якоря по осям d и q с детальным представлением многообразия электромагнитных связей контуров электрической машины. При расчете пусковых режимов явнополюсных синхронных двигателей должны определяться следующие величины: время пуска (достижение значения входного момента); нагрев обмотки якоря и стержней демпферной системы. Необходим учет влияния вытеснения токов в стержнях и насыщения на путях потоков рассеяния на параметры. Нагрев, вытеснение токов и насыщение определяют величину параметров цепей двигателя и, следовательно, токов и электромагнитных моментов в функции времени t. Обычно динамика пусковых режимов оценивается в функции скорости ω или скольжения s. Определенные выше положения метода расчета асинхронного пуска, основанного на использовании схем замещения фазы якоря по осям d и q, универсальны и являются основой при построении уточненных моделей процессов пуска. При этом машина представлена эквивалентными параметрами по осям X_d и X_q .

Изменение эквивалентных параметров X_d и X_q синхронной машины при $\omega = \text{var}$ (или $s = \text{var}$) может быть представлено соответствующими комплексными функциями $X_d(j\omega)$ и $X_q(j\omega)$ (или $X_d(j s)$ и $X_q(j s)$), которые называются частотными характеристиками.

На кафедре электромеханики ИГЭУ разработан уточненный метод анализа пусковых режимов явнополюсных синхронных машин [3], учитывающий влияние нагрева, вытеснения тока, насыщения на путях потоков рассеяния на величины указанных параметров. Демпферная обмотка представляется системой реальных смежных контуров по осям d и q и рассматривается как несимметричная, поскольку вследствие неравномерного распределения токов по стержням параметры последних различны. Процесс пуска рассматривается как квазистационарный. Взаимодействие между цепями статора и ротора обусловлено основной гармонической поля в зазоре. Высшие и низшие гармонические учитываются при определении дифференциального рассеяния цепей и взаимных связей между цепями ротора. Метод анализа включает уравнения механического движения и нагрева стержней в конечных разностях, которые определяют время пуска и температуры обмоток.

Расчет пусковых режимов заключается в решении уравнений для потокосцеплений электрических контуров по продольной и поперечной осям машины для заданного скольжения, которое определяет значения соответствующих параметров, в совокупности являющихся частотными характеристиками. Заданными являются условия на зажимах статора.

Подробное представление многоконтурного ротора иллюстрируют следующие уравнения:

- потокосцепление –

$$\Psi_{d(q)} = X_{d(q)}(js) i_{d(q)} = \sum_n X_{and(nq)} i_{nd(nq)} + X_{d(q)} i_{d(q)} + \sum_n X_{and(nq)} [\pm i_{nq(nd)}], \quad (10)$$

где $X_{and(nq)}$ – сопротивления взаимоиндукции между контурами якоря (a) и n-м контуром ротора по продольной <d> и поперечной <q> осям; $i_{nd(nq)}$ – составляющие токов контуров ротора по осям d и q;

- частотные характеристики –

$$X_{d(q)}(js) = \sum_n X_{and(nq)} i_{nd(nq)} + X_{d(q)}; \quad (11)$$

- составляющие токов якоря по осям d и q –

$$i_{d(q)} = (-j) u \left\{ R_1 - (1-2s) \left[jX_{d(q)}(js) \mp X_{dq(qd)}(js) \right] \right\} \times [A(js)]^{-1},$$

где R_1 – активное сопротивление обмотки якоря,

$$A(js) = R_1^2 - js \cdot R_1 [X_d(js) + X_q(js)] + (1-2s) [X_d(js)X_q(js) - X_{dq}(js)X_{qd}(js)] + R_1 [X_{dq}(js) - X_{qd}(js)]. \quad (12)$$

Уравнение электромагнитного момента совпадает с уравнением (4).

Метод, основанный на использовании частотных характеристик фазы якоря по осям d и q, позволяет рассчитать зависимость среднего значения электромагнитного момента от скольжения $M = f(s)$, показанную на рис. 7. На рис. 8 представлены частотные характеристики обмотки якоря, рассчитанные с учетом действия поверхностного эффекта, насыщения путей потоков рассеяния стержней демпферной обмотки и их нагрева в процессе асинхронного пуска.

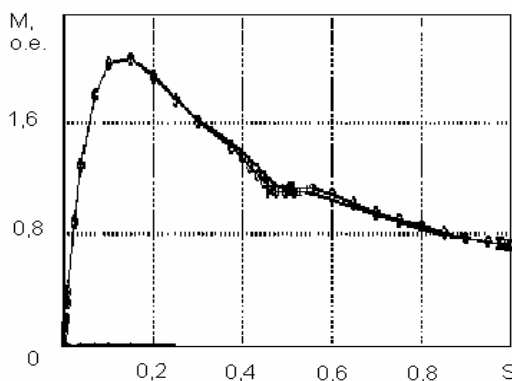


Рис. 7

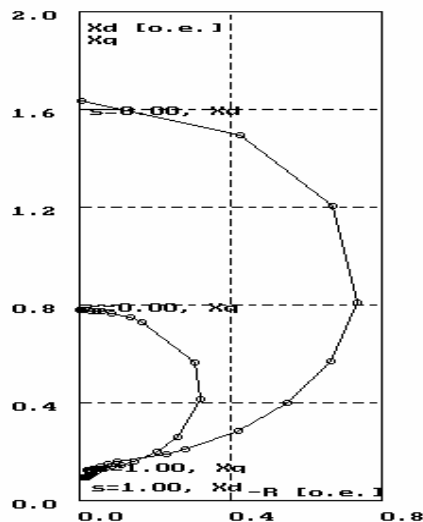


Рис. 8

Результаты проведенных расчетных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанные и реализованные на кафедре электромеханики ИГЭУ методы расчета

пусковых режимов явнополюсных синхронных двигателей обеспечивают приемлемую точность в значениях пусковых момента и тока в якоре, максимального момента, времени пуска.

2. Метод, основанный на расчете частотных характеристик, обеспечивает учет насыщения на путях потоков рассеяния каждого стержня, вытеснение тока в нем, нагрев стержня. Этот метод необходимо использовать для расчета пусковых режимов машин с нетрадиционными демпферными системами, в том числе и с несимметричными.

Громов Аркадий Константинович,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-04,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Караулов Виктор Николаевич,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-04,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Список литературы

1. **Проектирование** электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков: Учеб. пособие для вузов; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.
2. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
3. **Талалов И.И.** Параметры и характеристики явнополюсных синхронных машин. – М.: Энергия, 1978. – 264 с.