

Норхожаева Наргиза Насировна, ст. преподаватель,
Камолов Носир Камолович, к.т.н. доцент,
Ферганский политехнический институт,
Пирматов Нурали Бердиярович, д.т.н. профессор,
Ташкентский государственный технический институт

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДВУХОСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В статье приводится порядок составления математической модели с использованием системы дифференциальных уравнений Парка Горева с учетом параметров продольно поперечных обмоток возбуждения и массивных полюсных сердечников синхронного двигателя двухосного возбуждения работающих в приводах. Проведен анализ полученных результатов расчета на математической модели и экспериментов на физическом модели.

Ключевые слова: колебания, режим, параметр, одноосная, массивный сердечник, динамическая устойчивость, алгоритм, физическая модель, сердечник, переходный процесс, эксперимент, осциллограмма, симметричный ротор

Norkhozhaeva Nargiza Nasirovna, senior lecturer,
Kamolov Nosir Kamolovich,
candidate of technical sciences, associate professor,
Fergana Polytechnic Institute,
Pirmatov Nurali Berdiyrovich, doctor of technical
sciences, professor,
Tashkent State Technical Institute

The article provides the procedure for compiling a mathematical model using the system of differential equations of Park Gorev, taking into account the parameters of longitudinally transverse excitation windings and massive pole cores of a synchronous motor of two-nosed excitation operating in drives. The analysis of the obtained results of calculation on the mathematical model and experiments on the physical model is carried out.

Key words: oscillations, mode, parameter, uniaxial, massive core, dynamic stability, algorithm, physical model, core, transient, experiment, oscillogram, symmetrical rotor

MATHEMATICAL MODEL OF A SYNCHRONOUS MOTOR OF TWO-AXIAL EXCITATION

Введение. Резко переменные нагрузки металлургической промышленности вызывают колебаний ротора и остальных режимных параметров синхронных двигателей одноосного возбуждения [5,6]. Применение систем автоматического регулирования даже «сильное» регулирования не в состоянии обеспечить аperiodического перехода на другой режим синхронных двигателей одноосного возбуждения. Благодаря наличию продольно поперечного возбуждения и мощной демпферной системы, распределённой в массивных полюсных сердечниках синхронного двигателя, требует уточнения числа и параметров поперечной обмотки ротора. Это же обстоятельство приводит к существенному усложнению определения параметров схем замещения.

В статье приведены результаты расчётное экспериментальных исследований переходных процессов синхронных двигателей продольно поперечного возбуждения [1,2] в характерных режимах, таких как определение колебаний активной и реактивной мощности, угла выбега ротора, динамической устойчивости и разработан алгоритм расчета параметров, исходя из аналитических и экспериментальных данных. Эксперименты проводимые на физическом модели синхронного двигателя показывают, что предлагаемое уточнение схем замещения существенно снижает погрешности в вычислении электромагнитных величин при различных переходных процессах.

Цель исследования. Актуальность проблемы определения параметров и электромагнитных величин обуславливается тем, что от качества ее решения в конечном счете зависит успех применения математического моделирования электроэнергетических систем.

Моделирование переходных процессов синхронных машин продольно поперечного возбуждения может осуществляться в различных системах координат, выбор которых определяется конкретными условиями решаемой задачи. Синхронные двигатели продольно поперечного возбуждения являются самыми сложными элементами систем электроэнергетики.

В математической модели подробный учет всех элементов системы с синхронными машинами при использовании современных вычислительных средств невозможен, поэтому при выборе математических моделей приходится стремиться к максимально возможным упрощениям, но таким, чтобы они правильно отражали основные процессы двигателя при нагрузке на всем диапазоне изменения частоты вращения синхронных машин даже при асинхронных режимах.

При расчетах электромеханических и электромагнитных переходных процессов в огромном числе случаев для систем с синхронными машинами продольно поперечного возбуждения, работающих с резко переменной нагрузкой, для подробного учета используются уравнения, записанные в координатных осях d , q , жестко связанных с ротором, или d_c , q_c , синхронно вращающихся [2,3]. При этом математическое моделирование переходных процессов может осуществляться как по хорошо известным полным или упрощенным уравнениям Парка–Горева, так и с использованием схем замещения, представляемых в координатных осях d , q , o . Уравнения машин в осях d и q , являющиеся универсальной типовой моделью, можно получить из исходной системы уравнений, записанной в системе фазных координат a , b , c , путем преобразования. Существует несколько форм представления уравнений типовой модели, отличающихся друг от друга лишь знаками перед слагаемыми в обеих частях уравнений, что зависит от выбора положительных направлений токов, напряжений, координатных осей, их вращения и вращения ротора.

Результаты. С учетом того, что ось d опережает ось q , можно записать уравнения типовой универсальной математической модели синхронной машины в виде:

$$\begin{aligned}
 u_d &= r i_d - p \Psi_d - \omega_s (1 + s) \Psi_q \\
 u_q &= r i_q - p \Psi_q + \omega_s (1 + s) \Psi_d \\
 u_{fd} &= r_{fd} i_{fd} + p \Psi_{fd} \\
 u_{fq} &= r_{fq} i_{fq} + p \Psi_{fq} \\
 0 &= r_k i_{kd} + p \Psi_{kd} \\
 0 &= r_{kq} i_{kq} + p \Psi_{kq}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$M_T = J\omega_s p_s + 1.5 (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d)$$

где u_d, u_q – продольная и поперечная составляющие напряжения на зажимах статора машины; Ψ_d, Ψ_q – потокосцепления обмоток статора по продольной и поперечной осям; Ψ_{fd} и Ψ_{fq} – потокосцепления продольной и поперечной обмотки возбуждения; Ψ_{kd} и Ψ_{kq} – потокосцепления продольного и поперечного демпферных (успокоительных) массивных контуров; u_{fd} и u_{fq} напряжения продольной и поперечной обмотки возбуждения; i_d, i_q – продольная и поперечная составляющие тока статора; i_{fd}, i_{fq} , токи продольной и поперечной обмотки возбуждения; i_{kd}, i_{kq} – токи продольных и поперечных успокоительных контуров массивных полюсов; r – активное сопротивление обмотки статора r_{fd}, r_{fq} – активное сопротивление продольной и поперечной обмотки возбуждения r_{kd}, r_{kq} . $\omega_c = 2\pi f$ – синхронная угловая частота; скольжение ротора относительно синхронной оси

$$s = \frac{\omega_c - \omega_2}{\omega_c}$$

ω_c и ω_2 – угловая частота магнитного поля статора и угловая частота вращения ротора; J – момент инерции ротора; $p = \frac{d}{dt}$ – знак дифференцирования по времени; M_T – момент механический.

Второе слагаемое в последнем уравнении системы (1) представляет собой электромагнитный момент синхронной машины. Во избежание легко возникающих ошибок при моделировании следует знак скольжения принимать одинаковым со знаком производной угла θ , образуемого поперечной осью ротора и синхронно вращающейся осью, т.е. $s = p\delta/\omega$ с. Тогда знак ускорения будет совпадать со знаком второй производной угла и, следовательно, со знаком момента, действующего на ротор машины. Для двигателей продольно поперечного возбуждения (поток мощности из сети) – момент на валу будет отрицательным, а электромагнитный момент – положительным. Следовательно, положительными будут как ускорение в направлении затормаживания машины, так и скольжение при скорости ротора, меньшей синхронной.

Для составления математической модели явно полюсной синхронной машины продольно поперечного возбуждения все параметры характеризуются в системе относительных единиц. В инженерной практике анализа и расчета переходных процессов в электрических машинах используются различные системы относительных единиц. Наиболее распространенной в задачах электроэнергетики является взаимная система, или «система X_{ad} », переход к которой не изменяет форму записи исходной системы (1), представленной выше в именованных единицах. «Система X_{ad} » отличается, например, от систем относительных единиц в форме А.А. Горева и других модификаций. К сожалению, пренебрежение тонкостями перехода к системам относительных единиц приводит к существенным ошибкам. По этому в настоящей статье представлен алгоритм перехода к системе относительных единиц в форме X_{ad} . Он включает следующие шаги:

1. Выбираются основные базисные параметры: I_b, U_b, ω_b , равные соответственно амплитудным значениям фазных токов и напряжений статора I_m, U_m и синхронной угловой частоте ω_s .
2. Вычисляются базисные величины других статорных переменных и момента по формулам:

$$\Psi_b = \frac{U_b}{\omega_b}; Z_b = \frac{U_b}{I_b}; L_B = \frac{Z_b}{\omega_b}; m_b = \frac{S_b}{\omega_b}$$

где базисная мощность S_b принимается равной номинальной мощности машины:

$$S_b = \frac{3}{2I_b U_b}$$

3. Принимаются базисные мощности всех роторных контуров одинаковыми по величине с базисной мощностью статора

$$S_b = \frac{3}{2U_b I_b} = U_{fb} I_{fb} = U_{IDb} I_{IDb} = U_{kGb} I_{kGb}$$

4. Находятся базисные токи и напряжения роторных контуров. При этом исходят из условия, что базисный ток обмотки возбуждения создает в воздушном зазоре машины такое же поле первой гармонической, как и продольная реакция статора при своем базисном токе. Оно определяет соотношение между базисным током возбуждения I_{fb} и током возбуждения холостого хода i_{fxx} . Для нахождения этого соотношения используют два уравнения, представляющих синхронную ЭДС генератора в о.е.:

$$\begin{aligned} E_q &= E_{fd} = i_{fd} x_{ad} \\ E_q &= E_f = c i_f / x_{fxx} \end{aligned}$$

где i_{fxx} – ток возбуждения при холостом ходе; c – коэффициент, учитывающий расхождение между действительной характеристикой холостого хода и спрямленной по ненасыщенной начальной части, x_{ad} – сопротивление реакции статора.

Из уравнений (2а) и (2б), приравнивая их правые части, находим базисный ток обмотки возбуждения:

$$i_{f(oe)} x_{ad} = c i_{fd} / x_{fxx} \quad (2a)$$

$$i_{f(oe)} x_{aq} = c i_{fq} / x_{fxx}$$

$$I_{fb} = i_f / i_{f(o.e)} = i_{fxx} x_{ad} / c \quad (2б)$$

Аналогично нужно определять и базисные токи демпферных обмоток, которые будут отличаться от базисного тока возбуждения, поскольку демпферные обмотки имеют другое число витков и другой обмоточный коэффициент. Однако такой путь невозможен для синхронных машин с массивными полюсами ротором и крайне затруднителен для неявнополюсных генераторов и двигателей. Поэтому чаще исходят из постоянных времени контуров, определенных экспериментально или оцениваемых по конструктивным размерам машины. Предположим здесь, что каким-либо из методов искомые базисные токи демпферных обмоток получены – I_{IDb} , I_{kGb} , тогда исходя из формул нетрудно определить и базисные напряжения всех роторных контуров.

5. Вычисляются другие параметры роторных контуров:

$$\Psi_{fb} = U_{fb} / \omega_s; \quad Z_{fb} = S_b / I_{fb}^2; \quad Z_{Db} = S_b / I_{IDb}^2; \quad Z_{kqb} = S_b / I_{kGb}^2.$$

6. Определяются активные сопротивления роторных контуров в о.е.:

$$r_{f(o.e.)} = r_f / Z_{fb} = r_f I_{fb}^2 / S_b = r_f i_{fxx}^2 x_{ad}^2 / S_b c^2.$$

Естественно, что активное сопротивление обмотки возбуждения ротора можно найти при помощи постоянной времени T_{fo} этой обмотки, когда все контуры машины разомкнуты:

$$r_{fd} = \frac{x_{fd}}{\omega_s T_{fo}} \quad (3)$$

Относительные сопротивления демпферных обмоток рассчитываются аналогично.

Принципиальные трудности в определении параметров связаны не с системой вводимых относительных единиц, а с невозможностью зачастую непосредственного использования заводских параметров, приводимых в каталогах, и экспериментальных

данных. Поэтому приходится прибегать в анализе к различным упрощенным схемам замещения машин.

Особенно затруднены расчеты параметров схем замещения для машин со сплошным ротором, т.е. для турбогенераторов и двигателей с массивными гладкими роторами, представляющими собой стальную поковку. Система демпферных контуров такой машины является распределенной по всей бочке ротора, и ее учет крайне затруднителен. В [6] приведены подробные алгоритмы расчета параметров и характеристик синхронных двигателей одноосного возбуждения, схема замещения которых характеризуется семью параметрами, которые определены ниже. При этом каждый из параметров, входящий в уравнения (1), разделили на соответствующие базисные величины и, не вводя специальных обозначений для переменных в о.е., получили следующую систему уравнений синхронного двигателя продольно поперечного возбуждения (3) в относительных единицах

$$\begin{aligned} \frac{-p\Psi_d}{\omega_s} - (1-s)\Psi_q - r i_d &= u_d \\ (1+s)\Psi_d - \frac{p\Psi_q}{\omega_s} - r i_q &= u_q \\ \frac{p\Psi_{fd}}{\omega_s} + r_{fd} i_{fd} &= u_{fd} \\ \frac{p\Psi_{fq}}{\omega_s} + r_{fq} i_{fq} &= u_{fq} \\ \frac{p\Psi_{ID}}{\omega_s} + r_{ID} i_{ID} &= 0 \\ \frac{p\Psi_{kQ}}{\omega_s} + r_{kQ} i_{kQ} &= 0 \\ M &= T_j p s + (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \end{aligned} \quad (4)$$

где в последнем уравнении системы (3) учтено, что $T_j = J \omega_s^2 / S_b$.

Все величины в системе уравнений (3) безразмерные, а время и инерционная постоянная времени T_j записаны в секундах. При этом угол $\delta = \omega_{ss}/p$ при интегрировании скольжения получается в радианах.

Учитывая, что в системе о.е. индуктивности и реактивные сопротивления численно равны, можно записать:

$$\begin{aligned} \Psi_d &= x_d i_d + x_{ad} i_{fd} + \sum_{l=1}^{l=m} x_{ad} i_{ld} \\ \Psi_q &= x_q i_q + \sum_{k=1}^{k=n} x_{ad} i_{kq} \\ \Psi_{fd} &= x_{ad} i_{fd} + x_{fd} i_{fd} + \sum_{l=1}^{l=m} x_{ad} i_{ld} \end{aligned}$$

$$\Psi_{fq} = x_{aq}i_{fq} + x_{fq}i_{fq} + \sum_{l=1}^{l=m} x_{aq} i_{kd} \quad (5)$$

$$\Psi_{lD} = x_{ad}i_d + x_{ad}i_{fd} + x_{kd}i_{lD} + \sum_{p=1}^m x_{ad} i_{pq}$$

$$\Psi_{kQ} = x_{aq}i_q + x_{kq}i_{kq} + \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq q}}^{l=m} x_{aq} i_{vq}$$

В этих уравнениях для потокосцеплений соответствующих контуров, записанных в о.е., x_d , x_q – синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям; x_{ad} , x_{aq} – индуктивные сопротивления реакции статора по продольной и поперечной осям; x_{fd} , x_{fq} , x_{lD} , x_{kQ} – реактивные сопротивления обмоток возбуждения l-го продольного и k-го поперечного демпферных контуров. Системы уравнений (3) и (4) представляют собой универсальную, полную модель для изучения переходных процессов режимов работы синхронных машин продольно поперечного возбуждения.

Осциллографирование электромагнитного момента. Электромагнитный момент является одной из основных режимных величин, определяющих поведение синхронной машины продольно поперечного (3) возбуждения в установившихся и переходных процессах. Существующие в настоящее время аналитические методы расчета этого момента, использующие ряд допущений, дают ощутимые погрешности. Поэтому экспериментальное определение электромагнитного момента является весьма важной задачей.

Выводы. Известные методы измерения электромагнитного момента в переходных процессах производятся косвенно на основе дифференцирования кривой частоты вращения. Такой способ дает хорошие результаты, когда момент изменяется медленно, в остальных случаях появляются существенные погрешности. Кроме погрешности, вышеуказанный способ позволяет определить не электромагнитный момент, а динамический момент ускорения. В отличие от других методов, метод определения электромагнитного момента с использованием датчиков Холла дает более точные результаты, но схема измерения сложная.

Предлагаемая методика измерения электромагнитного момента M_3 [4] лишена вышеперечисленных недостатков. Сущность предлагаемого метода заключается в следующем. Кривая магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины зависит от величины и характера нагрузки и может существенно отличаться от синусоидальной формы шириной, равной полюсному делению машины и устанавливаемая в воздушном зазоре.

Заменяя потокосцепление соответствующей ему ЭДС E_δ , формула электромагнитного момента примет вид

$$M_3 = E_\delta \cdot I \cos \beta \quad (6)$$

где β – угол между вектором тока i и потокосцепления Ψ_δ .

При этом ось потокосцепления совпадает с продольной осью, а вектор тока ортогонален вектору Ψ_δ . Выражение (6) указывает на возможность непосредственного измерения электромагнитного M_3 момента. Для перемножения векторных величин E_{δ_1} и i был использован преобразователь мощности ПО24, который имеет выходное напряжение 40÷380 В.

Напряжение на зажимах синусной рамки в зависимости от мощности испытуемой электрической машины составляет от вольта до нескольких вольт, поэтому в схему

измерения электромагнитного момента вводится усилитель. На зажимы напряжения преобразователя подается усиленная ЭДС E_{δ_1} , а на токовые зажимы – ток i соответствующей фазы. На выходе преобразователя получаем напряжение, пропорциональное величине электромагнитного момента.

На рис.1 показаны осциллограммы электромагнитного момента M_{Σ} и тока статора синхронного двигателя продольно поперечного возбуждения при асинхронном пуске.

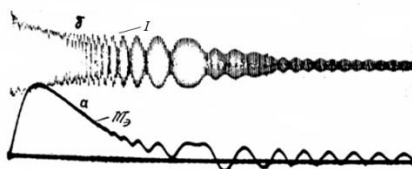


Рис.1 Осциллограммы синхронного двигателя при асинхронном пуске: а- характер изменения электромагнитного момента – M_{Σ}
б- характер изменения тока обмотки статора – I_1 .

Экспериментальные исследования, проведенные на физической модели синхронного двигателя продольно поперечного возбуждения, изготовленный на базе синхронного двигателя типа МСА72/4, номинальной активной мощностью $P_n = 12$ кВт, напряжением $U_n = 380$ В и номинальной частотой вращения $n = 1500$ об/мин с различными модификациями ротора с успокоительной обмоткой и с массивными полюсами, снабженный поперечной обмоткой возбуждения. Несмотря на простоту, предложенная методика обладает большой точностью при непосредственном измерении электромагнитного момента в переходных режимах электрических машин переменного тока [7].

Сравнение результатов расчета на математической модели и осциллограмм показали, что разница составляет 7,5%

Преимущества применения математической модели и сравнения полученных результатов с результатами экспериментов на физическом модели особенно ярко проявляются при анализе процессов в энергетических системах с явно полюсными машинами продольно поперечного возбуждения, а также с машинами с двухосным возбуждением с симметричным ротором при учете многих демпферных контуров массивного ротора.

Литература

1. **Ахматов, М.Г.** Синхронные машины Специальный курс. М.; Изд-во Высшая школа, 1984. 132 с.
2. **Ахматов, М.Г.** Осциллографирование электромагнитного момента машин переменного тока [Текст] / Н.К. Камалов, В.М. Ахматова // Изв.АН Уз ССР.СНТ.- 1980.-№1.-39-42.с.
3. **Важнов, А.И.** Переходные процессы в машинах переменного тока [Текст] / А.И. Важнов // Л.: Энергия, 1980. 768 с.
4. **Иванов, Н.П.** Турбогенераторы. Расчет и конструкции [Текст] / Н.П. Иванов, Р.А. Лютер // Л.:Энергия, 1967. 202 с.
5. **Казовский, Е.Я.** Переходные процессы в электрических машинах переменного тока [Текст] // М.: Изд-во АН СССР, 1962. 624 с.
6. **Пирматов, Н.Б.** Анормальные режимы работы синхронных двигателей двухосного возбуждения. [Текст] / М.Г. Ахматов // Ташкент, Изд-во Таш. ГТУ. 2003. 158 с.
7. **Kamolov, N.K.** The principle of operation of transformers ACADEMICIA A n International Multidisciplinary Research Journal [Text] / N.N. Norkhojayeva // (Do u ble

