



УДК 621.313.33

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

●●●●●

MATHEMATICAL MODEL OF A SYNCHRONOUS MACHINE

Квон Алексей Михайлович

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электротехники
и электрических машин,
Кубанский государственный
технологический университет
alexinasofi@yandex.ru

Автайкин Илья Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электротехники
и электрических машин,
Кубанский государственный
технологический университет
glubokovodnik@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается математическая модель явнополюсного синхронного двигателя, которая позволяет исследовать несимметричные режимы работы и межвитковые замыкания. Авторами предложены методики определения параметров модели и пути преобразования дифференциальных уравнений с целью проведения численных экспериментов.

Ключевые слова: математическое моделирование; явнополюсный синхронный двигатель; определение параметров; переход к матричной форме.

Kwon Alexei Mikhailovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Assistant Professor
of electrical engineering
and electrical machines,
Kuban state technological university
alexinasofi@yandex.ru

Avtaikin Ilya Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Assistant Professor
of electrical engineering
and electrical machines,
Kuban state technological university
glubokovodnik@yandex.ru

Annotation. The paper considers a mathematical model of the explicit lucus synchronous motor, which allows to investigate asymmetrical modes of operation and intercircuits. The authors offer methods of definition of parameters of the model and ways of transformation of the differential equations for the purpose of carrying out of numerical experiments.

Keywords: mathematical simulation; explicit pole synchronous motor; parameter determination; transition to matrix form.

Синхронные двигатели активно применяются в нефтегазовой отрасли. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с асинхронными машинами. Максимальный вращающий момент меньше зависит от величины питающего напряжения, скорость вращения ротора синхронна с магнитным полем, характер машины может быть активным, индуктивным или емкостным, высокий КПД, большой воздушный зазор. Есть варианты синхронных двигателей с безщёточным возбуждением.

У синхронного двигателя есть ряд проблемных моментов. Скорость вращения ротора не регулируется, сложность пуска и самозапуска, вероятность выхода из синхронизма, малый пусковой момент. Данные проблемы могут быть успешно решены подбором правильного типа синхронной машины, усложнением конструкции двигателя или при помощи дополнительных внешних устройств.

На промысловых компрессорных станциях с поршневыми компрессорами применяются синхронные двигатели СДКП, на буровых установках СДЗ, СДБ, СДЗБ, СДБО. Взрывозащищенные синхронные двигатели СТДП применяются на нефтеперекачивающих станциях и компрессорных станциях магистральных газопроводов. Используются и синхронные двигатели СТД без взрывозащиты, которые устанавливаются за пределами насосных и компрессорных станций.

Двигатели основных технологических агрегатов, применяемые в нефтегазовой отрасли при бурении, добыче или транспорте обладают мощностями в десятки и сотни киловатт. Выход из строя такой ответственной электрической машины приводит к серьезным экономическим потерям, связанным с остановкой технологического процесса, вынужденным ремонтом. В связи с вышесказанным, возрастают требования к безаварийной работе синхронных машин. Один из путей решения этой проблемы – своевременное обнаружение аномальных режимов работы и признаков зарождающихся необратимых повреждений конструкции электрической машины на ранних стадиях.

Для решения такой задачи необходимо составить математическую модель, отвечающую требованиям высокой чувствительности, адекватности, информативности и сходимости с предполагаемым объектом моделирования. На следующих этапах полученная модель используется для получения экспериментальных данных, которые могут быть использованы в системах управления и контроля, также при принятии решений персоналом, обслуживающим технологические установки с синхронными двигателями.



Данная работа посвящена созданию математической модели явнополюсного синхронного двигателя. На этапе принятия решения о варианте схемы замещения, выбор пал на фазный статор в осях a-b-c и ротор в осях d-q. Данная схема наиболее информативна и удобна для практического применения. В обмотках статора будут протекать реальные токи, соответствующие физической модели рассматриваемого синхронного двигателя. Информацию с этих обмоток наиболее удобно снимать при помощи типовых измерительных систем, которые необходимо предусмотреть в процессе монтажа оборудования.

Разработанная схема замещения явнополюсного синхронного двигателя (рис. 1) предусматривает учет системы электроснабжения в каждой фазе R_b, L_b . Внутренние параметры обмоток учтены индуктивными и активными элементами. Наличие сопротивления $R_{ш}$ позволяет имитировать межвитковое замыкание в фазе, которое является одним из самых распространенных и сложновывяемых аномалий в работе электрических машин. На роторе предполагаются обмотки возбуждения и демпферная.

Методика определения параметров представленной схемы изложена в [1]. Она опирается на решение оптимизационной задачи для сложной целевой функции $F(Y)$, учитывающей максимальный момент в синхронном режиме, момент и ток при асинхронном пуске проектируемого или каталожного синхронного двигателя. Для решения задачи параметрической идентификации предлагается применить методы переменной метрики (квазиньютоновские методы), которые аппроксимируют матрицу Гессе.

Для уточнения параметров обмоточной части рекомендуется воспользоваться методикой из [2].

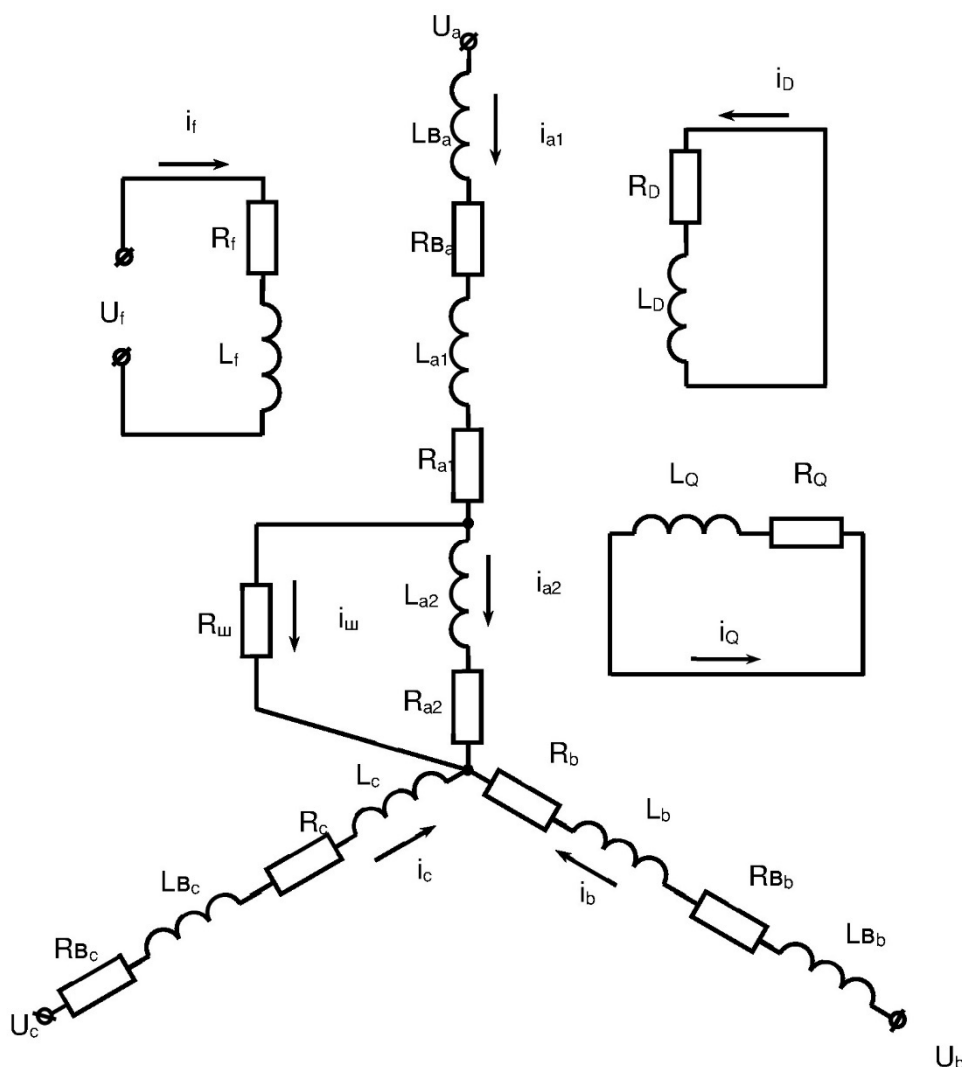


Рисунок 1

Система дифференциальных уравнений, входящая в состав математической модели исследуемой машины, составлена на основе законов Кирхгофа. Основная проблема, которая возникает при решении данной системы, состоит в том, что индуктивности и потокосцепления входящие в нее являются функциями положения ротора. То есть имеет место система с переменными коэффициентами. В случае установившегося режима работы эти коэффициенты будут периодическими.



$$\left\{ \begin{array}{l} L_{ba} \frac{di_{a1}}{dt} + (R_{a1} + R_{ba})i_{a1} + \frac{d\Psi_{a1}}{dt} + R_{ш}i_{ш} - \\ - (R_b + R_{bb})i_b - \frac{d\Psi_b}{dt} - L_{bb} \frac{di_{bb}}{dt} = U_a - U_b; \\ -L_{bc} \frac{di_c}{dt} - (R_c + R_{bc})i_c - \frac{d\Psi_c}{dt} + (R_b + R_{bb})i_b + \\ + \frac{d\Psi_b}{dt} + L_{bb} \frac{di_{bb}}{dt} = U_b - U_c; \\ R_{a2}i_{a2} + \frac{d\Psi_{a2}}{dt} - R_{ш}i_{ш} = 0; \\ R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} = U_f; \\ R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} = 0; \\ R_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} = 0; \\ i_{a2} + i_{ш} + i_b + i_c = 0; \\ i_{a1} - i_{ш} - i_{a2} = 0. \end{array} \right.$$

После преобразований система приводится к матричному уравнению общего вида:

$$N_U \cdot U = \left(R + N_\Psi \cdot \frac{dL}{dt} \right) \cdot i + N_\Psi \cdot L \cdot \frac{di}{dt},$$

где N_U – матрица графа опорных напряжений; U – матрица фазных напряжений; R – матрица сопротивлений; N_Ψ – матрица графа потокоцеплений; $\frac{dL}{dt}$ – матрица искомых токов; i – матрица искомых токов; L – матрица индуктивностей; $\frac{di}{dt}$ – матрица производственных искомых токов.

При заполнении матриц L и R необходимо учитывать коэффициенты как определяющий соотношение незамкнутых витков к полному числу витков фазы и ксв характеризующий взаимоддуктивную связь между поврежденной и неповрежденной частями фазной обмотки. В [2] поставленная задача решена и получены зависимости для различных гармоник тока на входе поврежденной фазы от коэффициента перемкнутых витков в фазе от 0 (нормальный режим) до 1 (100 % перемыкание витков фазы).

Полученная в работе математическая модель позволяет провести ряд исследований несимметричных режимов работы явнополюсной синхронной машины с целью выявления критериев и оценки степени их опасности путем численного эксперимента, что позволит продлить сроки безаварийной работы действующих и проектируемых технологических систем на базе данного типа электрической машины. Кроме того, представленная модель может являться опорной при создании широко круга схем замещения для исследования всего многообразия аномальных и аварийных режимов синхронных машин.

Литература

1. Кwon A.M. Минимизация ошибок при определении параметров синхронной машины : Электромеханические преобразователи энергии // Материалы второй межвузовской научно-методической конференции; Сборник тезисов и докладов. – Краснодар : изд-во Краснодарский военный авиационный институт, 2003. – Т. 1. – С. 263–264.
2. Кwon A.M., Автайкин И.Н., Артеян К.З. Анализ параметров медных обмоточных проводов на основе теоремы Умова-Пойнтинга // Булатовские чтения. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. – 2019. – Т. 5. – С. 91–93.
3. Кwon A.M. Выявление на ранних стадиях аварийных режимов технологических установок с синхронными двигателями // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – Краснодар : изд-во Кубанский государственный технологический университет. – 2013. – № 4. – С. 121–122.

References

1. Kwon A.M. Minimization of errors at determination of the synchronous machine parameters : Electromechanical energy converters // Materials of the second interuniversity scientific-methodical conference; Collection of theses and reports. – Krasnodar : Krasnodar Military Aviation Institute, 2003. – Vol. 1. – P. 263–264.
2. Kwon A.M., Avtaikin I.N., Artyan K.Z. Analysis of parameters of copper winding wires on the basis of Umova-Pointing theorem // Bulatovskie readings. – Krasnodar : Publishing House – South. – 2019. – Vol. 5. – P. 91–93.
3. Kwon A.M. Detection at the early stages of the emergency modes of the technological installations with the synchronous motors // News of higher educational institutions. Food technology. – Krasnodar : Kuban state technological university. – 2013. – № 4. – P. 121–122.