

УДК 621.313

UDC 621.313

**СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ В
ТЕОРИИ СИНХРОННЫХ МАШИН С
НЕСКОЛЬКИМИ ОБМОТКАМИ НА СТАТОРЕ****SYSTEMS OF RELATIVE UNITS IN THE
THEORY OF SYNCHRONOUS MACHINES
WITH AN ARBITRARY NUMBER OF
WINDINGS ON THE STATOR**

Стрижков Игорь Григорьевич
д.т.н., профессор

*Кубанский государственный аграрный университет,
Краснодар, Россия*

Strizhkov Igor Grigorievich
Dr.Sci.Tech., professor

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

В статье обобщены вопросы теории математического описания синхронных машин с произвольным числом трехфазных обмоток и произвольным расположением этих обмоток в пространстве машины. Рассмотрены особенности выбора рациональной системы относительных единиц при математическом описании таких машин

The article presents an attempt of generalization of problems of the theory of mathematical description of synchronous machines with an arbitrary number of windings of three-phase and the arbitrary location of these windings in the space of the machine. We have also considered the peculiarities of choice of rational system of relative units in the mathematical description of such a machine

Ключевые слова: СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Keywords: SYNCHRONOUS MACHINES

В практической электротехнике все возрастающее применение находят синхронные машины (СМ) с несколькими статорными обмотками. У генераторов дополнительные обмотки позволяют использовать напряжения, отличные от напряжения основной якорной обмотки, для питания дополнительных электроприемников, но чаще для питания систем самовозбуждения; у двигателей они используются для питания цепей возбуждения и релейной защиты. В качестве примера последних можно назвать семейство синхронных двигателей с двойной якорной обмоткой конструкции КубГАУ [1].

В теории СМ уравнения математического описания электромагнитных и электромеханических процессов традиционно записываются не в физических (абсолютных), а в относительных единицах, т.е. в виде долей от одноименных физических единиц, принятых в качестве базисных. Представление параметров электрической машины в относительных единицах используется в качестве средства упрощения математического описания физических явлений и возможности сопостав-

ления электрических параметров машин разной конструкции и мощности. Используются различные варианты представления параметров машины в безразмерной форме [2]. Большое разнообразие систем о.е. вызвано, с одной стороны, многообразием решаемых задач, а, с другой стороны, сложилось исторически, поскольку систем относительных единиц, отвечающих требованию инвариантности мощности, может быть предложено бесконечное множество [2].

В отечественной технической литературе преобладает применение следующих базисных величин:

- за базисный ток статора i_6 принимается амплитуда номинального фазного тока;

- за базисное напряжение статора u_6 принимается амплитуда номинального фазного напряжения статора;

- за базисную угловую частоту ω_6 принимается синхронная $\omega_c = 2\pi f_n$ (f_n – номинальная частота);

- за базисное потокосцепление статора ψ_6 принимается потокосцепление, индуктирующее в обмотке статора при базисной угловой частоте базисное напряжение: $\psi_6 = u_6 / \omega_6$;

- за базисное сопротивление статора $z_6 = u_6 / i_6$;

- за базисную мощность принимается номинальная полная мощность $S_6 = 3U_n I_n = 1,5 u_6 i_6$;

- за базисный момент $M_6 = pS_6 / \omega_6$, где p – число пар полюсов СМ;

- базисная индуктивность статора $L_6 = z_6 / \omega_6$;

- базисное время t_6 – время, соответствующее повороту ротора СМ при базисной угловой частоте на 1 эл. рад., $t_6 = 1 / \omega_6 = 1 / (2\pi f_n)$.

Приведенная система базисных величин адаптирована к математическому описанию переходных процессов СМ классической конструкции – с одной трехфазной обмоткой на статоре. Для описания статических режимов в качестве переменных используются действующие

значения напряжений и токов и в качестве базисных принимаются номинальные значения этих величин: U_n , I_n (единице соответствует номинальное значение этих величин). Базисные значения сопротивления, индуктивности, других параметров и переменных цепи статорной остаются аналогичными приведенным выше.

Расположение на статоре СМ нескольких трехфазных обмоток усложняет взаимоиндуктивные связи обмоток. Поэтому целесообразно было бы использовать такую систему о.е., в которой количество параметров, характеризующих взаимные индуктивности обмоток, было бы сведено к минимуму. При этом крайне важным было бы сохранение принципа взаимности сопротивлений взаимоиндукции, что также уменьшило бы число параметров электрических цепей СМ.

Другим весьма важным требованием к системе о.е. является сохранение физического смысла преобразованных уравнений машины. При этом должен соблюдаться принцип инвариантности мощности исходной и приведенной машин.

Общепринятой системы базисных величин для обмоток ротора в настоящее время не существует. Разные авторы используют различные удобные для конкретного исследования системы базисных величин.

Для того чтобы записать все параметры и переменные величины ротора в относительных единицах, вначале выполняют операцию приведения обмоток ротора к статору. Приведение обмоток ротора к статору основывается на равенстве первых гармоник магнитной индукции в воздушном зазоре, созданных приведенной и реальной обмотками при равенстве электрической мощности приведенной и реальной обмоток. Коэффициенты приведения для различных обмоток ротора получаются неодинаковыми, поскольку эти обмотки выполняются с различным числом фаз, различным числом витков и обмоточными коэффициентами, отличающимися от обмотки статора.

Для обмотки возбуждения коэффициент приведения по току равен [3]

$$k_{if} = \frac{i_f}{i'_f} = \frac{3 \cdot w_1 k_{об1} k_{ad}}{p p w_f},$$

по напряжению

$$k_{uf} = \frac{u'_f}{u_f} = \frac{2}{3} k_{if},$$

по индуктивности и сопротивлению

$$k_{zf} = \frac{z'_f}{z_f} = \frac{L'_f}{L_f} = k_{if} k_{uf}.$$

Для эквивалентной демпферной обмотки в продольной оси коэффициенты приведения равны соответственно

$$k_{iyd} = \frac{i_{yd}}{i'_{yd}} = \frac{3 \cdot w_1 k_{об1} k_{ad}}{p p w_{yd}},$$

$$k_{uyd} = \frac{2}{3} k_{iyd}, \quad k_{zyd} = k_{iyd} k_{uyd}.$$

Для демпферной обмотки в поперечной оси аналогичные уравнения принимают вид

$$k_{iyq} = \frac{i_{yq}}{i'_{yq}} = \frac{3 \cdot w_1 k_{об1} k_q}{p p w_{yq} k_{yq}},$$

$$k_{uyq} = \frac{2}{3} k_{iyq}, \quad k_{zyq} = k_{iyq} k_{uyq}.$$

Значения коэффициентов $k_{ad} = k_d / k_f$, k_q , $k_{yd} = k_f$, k_{yq} , характеризующих форму магнитного поля, создаваемого обмотками, приведено в [3].

Если вопросы приведения параметров демпферной обмотки и обмотки возбуждения к статорной для классической СМ подробно рассматриваются в научной литературе, то вопросы выбора базисных

величин для уравнений обмоток многообмоточной машины освещены недостаточно и нуждаются в подробном анализе.

Этот вопрос целесообразно рассмотреть на конкретном примере СМ с несколькими обмотками на статоре. В качестве такого примера рассмотрим синхронный двигатель с двойной якорной обмоткой [4] (рис.1).

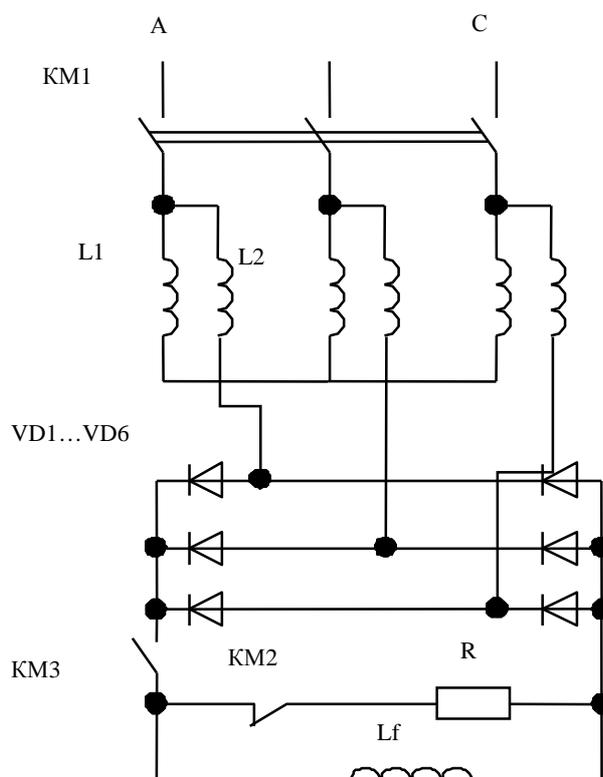


Рисунок 1 – Схема соединения обмоток СДДЯ

Подключение обеих статорных обмоток к общему источнику питания (сети) можно рассматривать как аргумент в пользу применения к обоим контурам одних и тех же базисных величин. Это сохранило бы естественное соотношение между напряжениями и токами обеих ветвей и упростило бы анализ падений напряжения в элементах цепей статора,

позволяло бы определить потребляемый из сети ток машины (суммарный ток двух обмоток) простым суммированием фазных токов этих обмоток. Наш опыт использования такой системы о.е. подтверждает ее преимущества и при построении годографов токов в обмотках машины. Такую систему о.е. удобно применять в задачах статики при использовании в качестве базисных величин действующих значений номинального напряжения, тока, а также мощности машины. При этом следует иметь в виду, что одинаковые токи в обмотках L_1 и L_n создают не одинаковую намагничивающую силу, поскольку числа витков W обмоток не совпадают ($W_1 \neq W_n$), потому такая система о.е. неудобна для расчетов, связанных с определением параметров магнитного поля. Однако это неудобство не носит "фатального" характера, поскольку при расчетах поля всегда можно использовать известное соотношение чисел витков обмоток ($k = W_1/W_n$).

Особенностью СДДЯ с контактными кольцами является строгое соответствие между током возбуждения (током обмотки L_f) и током проходной обмотки L_2 . Наличие в схеме соединения обмоток выпрямительного моста требует уточнения понятия "приведение параметров обмотки возбуждения к статорной обмотке". Под таким приведением в одних случаях понимается пересчет параметров обмотки возбуждения на число фаз и витков статорной обмотки при неизменных энергетических соотношениях в машине, а в других, понимается определение параметров схемы замещения мостового выпрямителя и обмотки возбуждения, представленных r_3 , x_3 цепочкой с постоянными значениями r_3 и x_3 . В бесконтактном варианте СДДЯ с асинхронным возбудителем возникают аналогичные проблемы при представлении асинхронного возбудителя звеном с постоянными параметрами схемы замещения (Т-, Г-образной или иной). В этом случае, обмотка возбуждения основной машины приводится к стороне переменного тока ротора

возбудителя, а затем вместе с параметрами ротора возбудителя приводится к статорной обмотке АВ, после чего выполняется перевод в относительные единицы с использованием в качестве базисных величин общих для всех контуров номинальных данных основной СМ.

Отмеченные проблемы применительно к многообмоточным статорам могут быть реализованы следующим образом. Обмотка возбуждения СМ приводится к опорной якорной (статорной) обмотке, а в уравнениях электрических контуров используется коэффициент связи параметров совместно с коэффициентом приведения тока, напряжения и сопротивления обмотки возбуждения.

Другой способ решения проблемы заключается в приведении активного и индуктивного сопротивления ОВ к стороне переменного тока эквивалентной схемой замещения и использовании операции приведения ОВ как имеющей чисто активное сопротивление. Выбор базисных величин для ОВ производится по условию либо равных МДС от единичного тока обмотки статора и единичного тока возбуждения [2], либо по условию наведения единичным током возбуждения в каждой фазе якоря ЭДС, равной $x_{ad}i_{ao}$ в симметричном синхронном режиме (известная система с базисным X_{ad}). При этом необходимо учитывать, что ток якоря СДДЯ распределен по двум якорным обмоткам и параметры магнитного поля при заданных токах зависят от угла смещения якорных обмоток β .

Поэтому исходная предпосылка о том, что единичный ток возбуждения должен создавать в воздушном зазоре такое же магнитное поле, как и якорная обмотка при единичном амплитудном токе применительно к СДДЯ нуждается в уточнении.

В результате преобразования координат обе статорные обмотки становятся соосными (обмотки располагаются вдоль осей d и q без взаимного смещения). В случае, когда обмотка $L2$ приводится к обмотке $L1$, они, к тому же, имеют одинаковое число витков; без такого приведения

- разное. Хотя каждая из обмоток $L1$ и $L2$ участвует в создании магнитного поля, можно считать, что опорная обмотка $L1$ определяет величину магнитного потока в зазоре и поэтому именно ее целесообразно использовать как базовую для приведения обмотки возбуждения.

Физический смысл такого преобразования заключается в следующем. Обмотка $L2$ заменяется другой, аналогичной по конструкции и расположению в машине, но имеющей число витков, равное числу витков обмотки $L1$, т.е. в k раз больше реальной. Соответственно этому и напряжение питания цепи этой обмотки увеличивается в сравнении с реальным в k раз. Такая конструктивная схема может быть реализована практически, для чего следует использовать либо трехобмоточный трансформатор с соответствующими уровнями вторичных напряжений для отдельного подключения обмоток $L1$ и $L2$ СДДЯ, либо трансформатор с промежуточными отпайками, либо автотрансформатор [1]. Практическая ценность такой схемы заключается в том, что может использоваться СМ со стандартной статорной обмоткой, без изменения её конструкции.

Высокая наглядность этого способа приведения величин делает целесообразным применение системы о.е. с базисным X_{ad} при приведении параметров всех обмоток к обмотке $L1$ и использовании в качестве базисных величин амплитудных значений номинального потребляемого тока и напряжения двигателя.

Поскольку конструкция обмотки $L2$ предполагает равные обмоточные коэффициенты с обмоткой $L1$, коэффициент приведения напряжений и ЭДС будет иметь значение

$$k_n = W'_n/W_n = W_1/W_n$$

а коэффициент приведения тока будет иметь обратное значение. Таким образом, приведение напряжений, ЭДС и тока выполняется по правилу

$$e'_n = k_n e_n; \quad u'_n = k_n u_n; \quad i'_2 = i_n / k_n$$

Активные и реактивные (индуктивные) сопротивления обмоток приводятся по известному правилу [2]:

$$r'_n = r_n k_n^2; \quad x'_{sn} = x_{sn} k_n^2$$

Аналогично приводятся все сопротивления цепи $L2$ -ВВ- L_f после приведения параметров цепи выпрямленного тока к анодной цепи (цепи переменного тока). Приведение потокосцепления обмотки

$$\Psi'_n = k_n \Psi_n.$$

В системе о.е. с базисным X_{ad} коэффициенты приведения тока и напряжения обмотки возбуждения имеют вид [3]:

$$k_i = 2m_1 W_1 k_d k_{o\delta} / (\pi W_f);$$

$$k_u = 4m_1 W_1 k_d k_{o\delta} / (\pi W_f).$$

Приведенные ток и напряжение возбуждения связаны с реальными соотношениями:

$$i'_f = i_f / k_i;$$

$$u'_f = k_u u_f.$$

Приведение активного сопротивления обмотки возбуждения осуществляется по уравнению

$$r'_f = k' r_f,$$

где $k' = 8m_1 W_1^2 k_d^2 k_{o\delta}^2 / (\pi^2 W_f)$.

Мгновенные значения тока i_1 и напряжения u_1 в относительных единицах

$$i_1^* = i_1/(\sqrt{2} I_H);$$

$$u_1^* = u_1/(\sqrt{2} U_H).$$

Базисное сопротивление статорных обмоток

$$Z_{\sigma} = U_H/I_H.$$

Для обмотки $L1$ сопротивления в о.е. получают по уравнениям

$$r_1^* = r_1/Z_{\sigma}; \quad x_1^* = x_1/Z_{\sigma}; \quad x_{s1}^* = x_{s1}/Z_{\sigma}.$$

Для представления параметров обмотки Ln в о.е. используются уравнения

$$i_n^* = i'_n/(\sqrt{2} I_H); \quad u_n^* = u'_n/(\sqrt{2} U_H);$$

$$r_n^* = r'_n/Z_{\sigma}; \quad x_n^* = x'_n/Z_{\sigma}; \quad x_{sn}^* = x'_{sn}/Z_{\sigma}.$$

Для обмотки возбуждения:

$$i_f^* = i'_f/(\sqrt{2} I_H); \quad u_f^* = u'_f/(\sqrt{2} U_H); \quad r_f^* = r'_f/Z_{\sigma}.$$

Выводы

При выборе системы относительных единиц для математического описания синхронной машины с несколькими статорными обмотками необходимо учитывать характер решаемой задачи и целесообразность придания наглядности промежуточным результатам вычислений. При решении задач статики, как правило, более удобной является система относительных единиц с едиными базисными величинами для электрических контуров всех статорных обмоток, обеспечивающая естественное соотношение токов и напряжений в этих контурах, в то время как при решении задач динамики (переходные процессы) более удобной является система относительных единиц с базисным X_{ad} .

Литература

1. Стрижков И.Г. Синхронные двигатели с двойной якорной обмоткой/ И.Г. Стрижков, Е.Н. Чеснюк, А.Н. Трубин // В кн.: Электроэнергетические комплексы и системы. - Краснодар, КубГТУ, 2005. С.117-119.
2. Гаррис М. Системы относительных единиц в теории электрических машин. Пер. с англ. / М. Гаррис, П. Лауренсон, Дж. Стефенсон. –М.: Энергия, 1975. 120 с.
3. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины / А.А. Горев. –Л.: Госэнергоиздат, 1950. 551с.
4. Стрижков И.Г. Технологический комплекс на базе ЭДМФ «Кубань»/ И.Г. Стрижков, Е.Н. Чеснюк, А.Н. Трубин, С.И. Стрижков //Ж. Механизация и электрификация с.х., 2005, № 2. С. 4-6.

References

1. Strizhkov I.G. Sinhronnye dvigateli s dvojnoj jakornoj obmotkoj/ I.G. Strizhkov, E.N. Chesnjuk, A.N. Trubin // V kn.: Jelektrojenergeticheskie komplekсы i sistemy. - Krasnodar, KubGTU, 2005. S.117-119.
2. Garris M. Sistemy odnositel'nyh edinic v teorii jelektricheskij mashin. Per. s angl. / M. Garris, P. Laurensон, Dzh. Stefenсон. –M.: Jenergija, 1975. 120 s.
3. Gorev A. A. Perehodnye processy sinhronnoj mashiny / A.A. Gorev. –L.: Gosjenergo-izdat, 1950. 551s.
4. Strizhkov I.G. Tehnologicheskij kompleks na baze JeDMF «Kuban'»/ I.G. Strizhkov, E.N. Chesnjuk, A.N. Trubin, S.I. Strizhkov //Zh. Mehanizacija i jelektrifikacija s.h., 2005, № 2. S. 4-6.