

УДК 621.314.263

М. В. Пронин, А. С. Григорян  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Г. А. Чесноков  
ПАО «Силовые машины»

А. Г. Воронцов  
ООО «НПЦ СЭС»

## Моделирование реактивной синхронной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора в ANSYS и по методологии взаимосвязанных подсистем

Построены модели реактивной синхронной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Одна модель выполнена в ANSYS Maxwell методом конечных элементов. В этой модели определяются параметры машины и их зависимость от амплитуды токов фаз и от углового положения вектора тока статора относительно осей симметрии ротора. Другая модель построена с применением методов теории электрических цепей в среде ComSim по методологии моделирования установок по взаимосвязанным подсистемам, позволяющей минимизировать затраты машинного времени на расчеты. Используются известные схемы замещения синхронных машин, в которых исключен контур возбуждения. При расчетах обеспечивается достаточно хорошее совпадение результатов, полученных на разных моделях. Модели в ComSim работают со сравнительно малыми затратами машинного времени. Это позволяет рекомендовать их к использованию при моделировании сложных электромеханических систем с предварительным определением параметров машин методом конечных элементов.

### Реактивная синхронная машина, анизотропная магнитная проводимость, моделирование, расчет, адекватность, затраты машинного времени

Реактивные электрические генераторы и двигатели относятся к классу синхронных машин (РСМ). Они производятся без обмотки возбуждения на роторе, без контактных колец. Электромагнитный момент обеспечивается за счет несимметрии ротора и различия индуктивностей по осям  $d$  и  $q$  (анизотропии магнитных свойств). Для увеличения реактивного момента используются специальные конструкции [1], [2]. Преимущества РСМ заключаются в отсутствии обмоток и активных потерь в роторе, в упрощении охлаждения ротора, в снижении температур конструкций ротора и подшипников. При 6 полюсах возможная конструкция РСМ в поперечном сечении изображена на рис. 1.

Статор выполняется аналогично электрическим машинам (ЭМ) переменного тока традиционного исполнения (синхронные, асинхронные). Он содержит стальной магнитопровод с пазами, в которых размещаются проводники, образующие

трехфазную или многофазную обмотку. В роторе магнитопровод выполняется шихтованным из листов электротехнической стали специальной формы, как, например, на рис. 1. В указанной аксиаль-

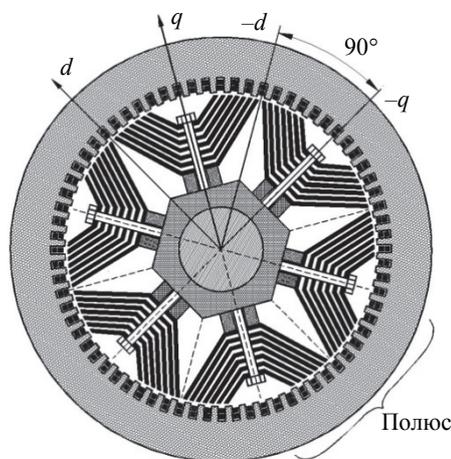


Рис. 1

но-ламинированной конструкции ротора магнитный поток, создаваемый токами фаз, замыкается между полюсами в основном по осям  $d$  по стальным листам, обладающим высокой магнитной проницаемостью. Магнитные потоки по осям  $q$  сравнительно малы, так как замыкаются по путям, направленным поперек стальных листов, в том числе через изоляционные промежутки, обладающие низкой магнитной проницаемостью.

Энергетические характеристики РСМ сильно зависят от соотношения индуктивностей намагничивания обмотки статора по продольной  $L_{ad}$  и поперечной  $L_{aq}$  осям. Чем больше отношение  $L_{ad}/L_{aq}$ , тем выше коэффициент мощности и КПД машины. Таким образом, в РСМ остро стоит вопрос точного определения индуктивностей. Аналитические методы расчета параметров не позволяют точно учесть сложную геометрию ротора и насыщение стали. Точные расчеты возможны с применением методов конечных элементов (МКЭ). Современный пакет ANSYS Maxwell реализует МКЭ с дискретизацией по времени, что позволяет определять параметры машины с учетом насыщения и моделировать электромагнитные процессы при вращающемся роторе. При моделировании вращающейся машины в установившемся режиме определяются многие параметры, в том числе коэффициент мощности, ток статора, угол нагрузки. К недостаткам МКЭ можно отнести большие затраты машинного времени на расчеты, которые на несколько порядков превышают затраты при построении моделей методами теории электрических цепей.

РСМ обычно работают с полупроводниковыми преобразователями (ПП), которые искажают токи и напряжения фаз, влияют на электромагнитные и энергетические характеристики машин и систем. При разработке таких комплексов требуется оценка множества характеристик в результате расчетов длительных электромагнитных процессов с различными настройками устройств управления. Во многих случаях приходится использовать весьма малые шаги интегрирования переменных по времени. Для выполнения подобных расчетов необходимы быстродействующие модели электрических машин и систем, построенные, например, методами теории электрических цепей.

В данной статье описывается создание технологии разработки систем с РСМ при использовании ANSYS Maxwell для расчета параметров, а

также среды ComSim для расчетов длительных электромагнитных процессов на моделях, построенных методами расчета систем по взаимосвязанным подсистемам [3]–[6]. Работа связана с конкретными проектами.

**Определение параметров РСМ в ANSYS Maxwell.** В проекте системы электродвижения используется реактивный двигатель мощностью 500 кВт с частотой вращения 1000 об/мин. Для оценки характеристик выполнено его численное моделирование в ANSYS Maxwell. Рассматриваемая РСМ имеет 6 полюсов, трехфазную обмотку, номинальное напряжение 660 В, частоту напряжения 50 Гц. Исходными данными для конечно-элементной модели были геометрические размеры статора и ротора, результаты аналитических расчетов индуктивностей и активных сопротивлений (индуктивность рассеяния лобовой части фазы 47 мкГн, активное сопротивление фазы при температуре обмотки 115 °С – 0.0076 Ом).

В конечно-элементной модели использована геометрия одного полюсного деления машины и применены симметричные граничные условия для уменьшения числа конечных элементов и времени расчета. Для достаточной точности вычислений расчетная область разбита на 11 208 конечных элементов. Длительность рассчитываемого установившегося режима работы машины 0.3 с при шаге расчета по времени 200 мкс. На рис. 2 представлено поперечное сечение машины на одном полюсном делении (*б*) и картина распределения магнитной индукции – в теслах, (*а*) в номинальном режиме работы.

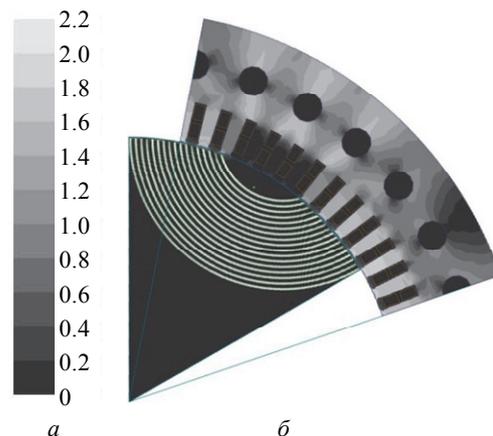


Рис. 2

По результатам моделирования в ANSYS Maxwell вращающейся машины определены в номинальном режиме: фазный ток статора 579.8 А; коэффициент мощности 0.776; угол между векто-

рами напряжения и тока  $\varphi = 39.1^\circ$ ; угол между осью  $q$  машины и вектором напряжения (угол нагрузки)  $\theta = -9.6^\circ$ ; угол между осью  $q$  и вектором тока (угол внутреннего сдвига)  $\psi = 29.5^\circ$ .

Рассчитанные кривые индуктивностей намагничивания по осям  $d$  и  $q$  представлены на рис. 3 в зависимости от амплитуды токов фаз  $I_m$  и от угла  $\psi$ . Потери мощности в стали 4.4 кВт, в обмотке статора 7.7 кВт, механические потери приняты равными 2 кВт на основании результатов испытаний асинхронного двигателя сопоставимых габаритов с идентичной системой охлаждения. Суммарные потери мощности 14.1 кВт (без учета добавочных потерь в роторе), коэффициент полезного действия 97.26 %.

$L$ , мГн

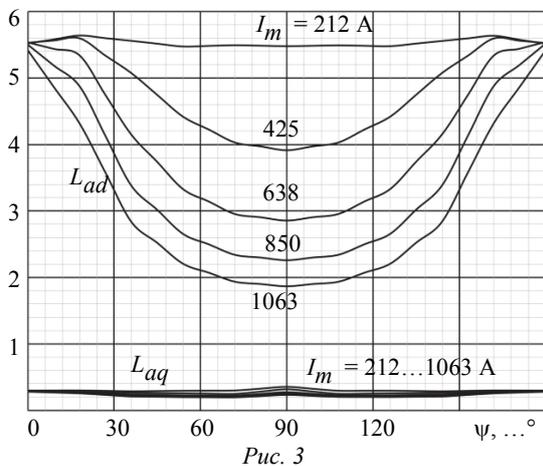


Рис. 3

**Моделирование РСМ по взаимосвязанным подсистемам.** При описании 3-фазной РСМ методами теории электрических цепей принято, что нулевая точка обмотки статора выведена и в фазах могут существовать токи нулевой последовательности. Ротор содержит демпферные контуры по продольной и поперечной осям. Распределение магнитодвижущих сил и магнитных потоков по окружности воздушного зазора синусоидально. Активные сопротивления и индуктивности рассеяния обмоток постоянны. Индуктивности намагничивания по продольной и поперечной осям, зависящие от тока статора и фазы вектора тока, постоянны в пределах одного шага интегрирования по времени. При переходе к следующему шагу расчета индуктивности уточняются в соответствии с зависимостями рис. 3. СМ приведена к двухполюсному исполнению. Описание СМ выполнено при разделении ее на взаимосвязанные части по магнитному потоку в воздушном зазоре, как изображено на рис. 4. Взаимные связи подсистем учтены зависимыми источниками напряжения и тока.

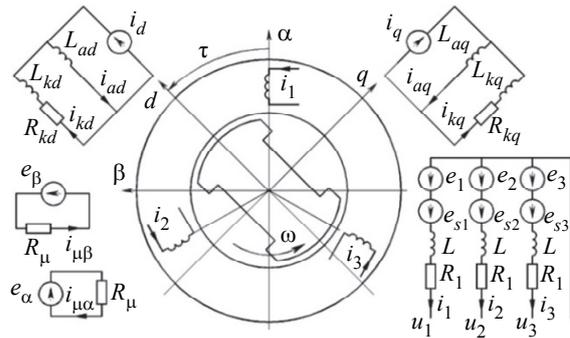


Рис. 4

Обмотка статора описана в осях фаз при следующих обозначениях:  $n$  – номер фазы ( $n = 1, 2, 3$ );  $u_n$  – напряжения фаз;  $i_n$  – токи фаз. В подсхеме обмотки статора в качестве зависимых источников учтены ЭДС фаз  $e_n$  (обусловленные магнитным потоком в зазоре); ЭДС взаимной индукции фаз по путям рассеяния  $e_{sn}$ ; индуктивности фаз  $L$  и активные сопротивления  $R_1$ . ЭДС  $e_{sn}$  и индуктивность  $L$  определяются при использовании следующих параметров:  $L_s$  – индуктивность рассеяния фаз в симметричном режиме работы обмотки;  $L_0$  – индуктивность нулевой последовательности. Если нулевая точка 3-фазной обмотки изолирована, то  $L = L_0 = L_s$ . Контур ротора описаны в осях  $d$  и  $q$ . В подсхемах ротора в качестве зависимых источников учтены токи реакции якоря  $i_d$  и  $i_q$ . Учтены индуктивности намагничивания  $L_{ad}$  и  $L_{aq}$ ; индуктивности рассеяния  $L_{kd}$  и  $L_{kq}$  демпферных контуров. Потери энергии в стали статора учтены резисторами  $R_\mu$ , в которых протекают токи  $i_{\mu\alpha}$ ,  $i_{\mu\beta}$  под действием ЭДС  $e_\alpha$ ,  $e_\beta$ . На рис. 4 указаны направления токов и источников напряжения, осей  $dq$  и  $\alpha\beta$ , направление вращения ротора с частотой  $\omega$ , угол поворота  $\tau$  оси  $d$  ротора относительно оси  $\alpha$ .

В модели использованы следующие коэффициенты:

$$c_n = \cos[2\pi(n-1)/3], \quad s_n = \sin[2\pi(n-1)/3].$$

Для подсистемы статора справедливы уравнения

$$\frac{di_n}{dt} = \frac{1}{L + L_{st}} \left( e_n + e_{sn} - u_n - R_1 i_n + L_{st} \frac{di_n}{dt} \right),$$

где  $L_{st}$  – стабилизирующая индуктивность, обеспечивающая устойчивость процесса вычислений.

Взаимное влияние фаз по путям рассеяния и токи реакции якоря определяются при использовании следующих переменных:

$$\frac{di_\alpha}{dt} = \frac{2}{3} \sum_{n=1}^3 c_n \frac{di_n}{dt}, \quad \frac{di_\beta}{dt} = \frac{2}{3} \sum_{n=1}^3 s_n \frac{di_n}{dt}.$$

ЭДС взаимной индукции фаз по путям рассеяния

$$e_{sn} = \frac{L_s - L_0}{3} \sum_{n=1}^3 \frac{di_n}{dt}.$$

Токи реакции якоря по осям  $\alpha$  и  $\beta$

$$i_\alpha = \frac{2}{3} \sum_{n=1}^3 c_n i_n + i_{\mu\alpha}, \quad i_\beta = \frac{2}{3} \sum_{n=1}^3 s_n i_n + i_{\mu\beta}.$$

Токи реакции якоря по осям  $d$  и  $q$

$$i_d = i_\alpha \cos \tau + i_\beta \sin \tau, \quad i_q = i_\alpha \sin \tau - i_\beta \cos \tau.$$

Производные токов реакции якоря по осям  $d$  и  $q$

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{di_\alpha}{dt} \cos \tau + \frac{di_\beta}{dt} \sin \tau - \omega i_q,$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{di_\alpha}{dt} \sin \tau - \frac{di_\beta}{dt} \cos \tau + \omega i_d.$$

Производные токов намагничивания по осям  $d$  и  $q$

$$\frac{di_{ad}}{dt} = \frac{L_{kd}}{L_{ad} + L_{kd}} \left( \frac{di_d}{dt} - \frac{R_{kd} i_{kd}}{L_{kd}} \right),$$

$$\frac{di_{aq}}{dt} = \frac{L_{kq}}{L_{aq} + L_{kq}} \left( \frac{di_q}{dt} - \frac{R_{kq} i_{kq}}{L_{kq}} \right). \quad (1)$$

Токи в демпферных контурах по осям  $d$  и  $q$

$$i_{kd} = i_{ad} - i_d, \quad i_{kq} = i_{aq} - i_q.$$

Токи намагничивания (1) при частоте вращения ротора  $\omega$  позволяют найти ЭДС по осям  $d$  и  $q$

$$e_d = -\omega L_{aq} i_{aq} - L_{ad} \frac{di_{ad}}{dt},$$

$$e_q = \omega L_{ad} i_{ad} - L_{aq} \frac{di_{aq}}{dt}. \quad (2)$$

ЭДС по осям  $\alpha$  и  $\beta$

$$e_\alpha = e_d \cos \tau + e_q \sin \tau, \quad e_\beta = e_d \sin \tau - e_q \cos \tau.$$

Токи в контурах, учитывающих потери энергии в стали статора,

$$i_{\mu\alpha} = e_\alpha / R_\mu, \quad i_{\mu\beta} = e_\beta / R_\mu.$$

ЭДС фаз обмотки статора

$$e_n = e_\alpha c_n + e_\beta s_n.$$

Электромагнитный момент двухполюсной машины

$$M_{em} = 1.5 (L_{ad} i_{ad} i_q - L_{aq} i_{aq} i_d). \quad (3)$$

Частота вращения двухполюсной СМ  $\omega$  и угол поворота ротора  $\tau$  при моменте инерции  $J$  определяются электромагнитным моментом  $M_{em}$ , моментом механических потерь  $M_m$  и моментом сопротивления  $M_c$  (под моментом сопротивления может подразумеваться и активный момент, создаваемый, например, турбиной) из выражений

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_c - M_m - M_{em}), \quad \frac{d\tau}{dt} = \omega.$$

В многополюсных машинах  $M_{em}$  и  $\omega$  определяются с учетом числа пар полюсов [3].

В модели реактивной машины на каждом шаге расчета по времени вычисляются мгновенные значения амплитуды и угловое положение вектора токов фаз относительно оси  $q$ . По зависимостям рис. 3 методами сплайн-аппроксимации кривых [7] вычисляются индуктивности намагничивания. Полученные значения используются в выражениях (1)–(3). На следующем шаге расчета по времени при новых значениях токов фаз индуктивности уточняются, и т. д.

**Компьютерная модель РСМ.** В соответствии с математическим описанием реактивной машины разработана компьютерная модель на языке С++ в среде программирования ComSim [3]. Модель выполнена по схеме рис. 5 и предназначена для расчета характеристик машины в двигательном и генераторном режимах работы. Одно из назначений модели – проверка параметров на соответствие расчетам в ANSYS с целью последующего моделирования систем с полупроводниковыми преобразователями в ComSim.



Рис. 5

В соответствии с рис. 5 обмотка статора машины подключена к трехфазному источнику напряжения  $u_n$ . В фазах протекают токи  $i_n$ . Вал ротора машины соединен с турбиной Т, которая служит источником или приемником энергии. Турбина создает на валу машины вращающий момент  $M_c$ ;  $\psi$  – фаза вектора тока;  $P_z$  – заданная мощность;  $\omega_z$  – заданная частота вращения.

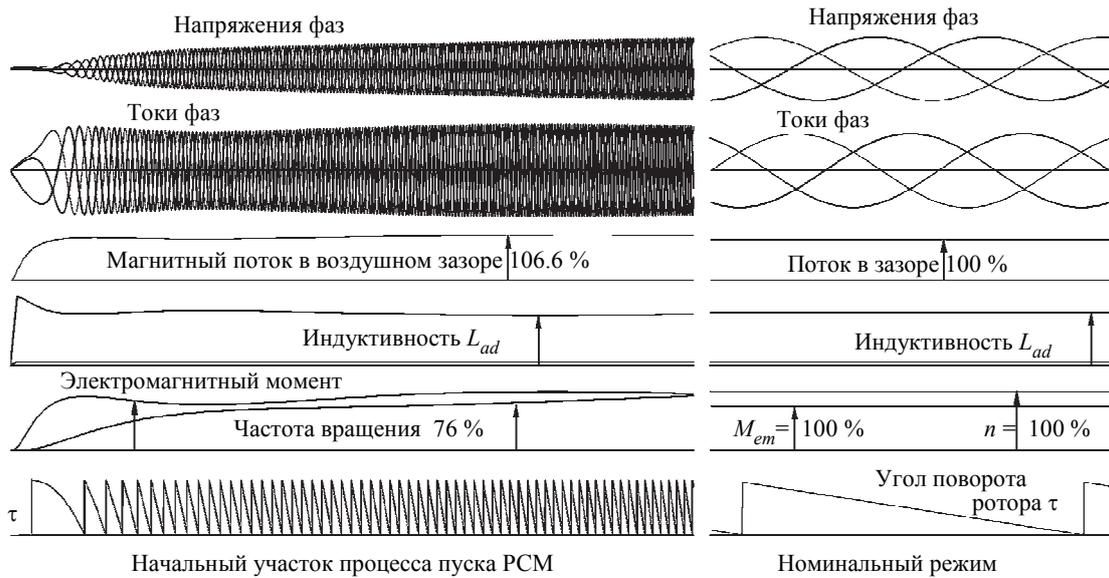


Рис. 6

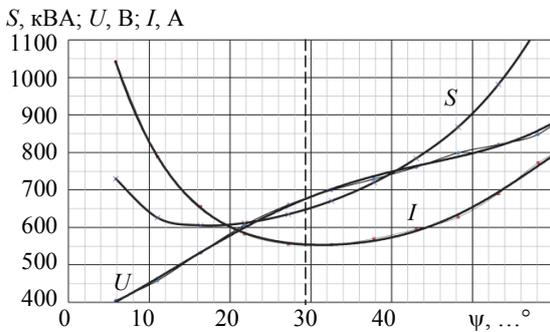


Рис. 7

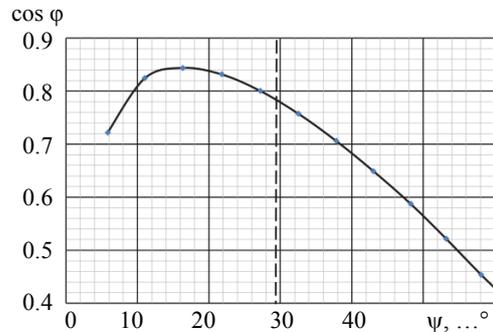


Рис. 8

**Расчеты на модели режимов работы и характеристик РСМ.** Расчеты выполнены для двигателя мощностью 500 кВт, другие параметры указаны ранее. Результаты расчета пуска двигателя с выходом на номинальный режим работы представлены на рис. 6.

Рассчитан ряд параметров, в том числе кривые напряжений, токов, магнитного потока в воздушном зазоре, электромагнитного момента, частоты вращения двигателя на начальном участке пуска длительностью 1.6 с, а также в конце процесса в установившемся режиме работы.

Серия расчетов выполнена также для определения характеристик двигателя. Результаты приведены на рис. 7 и 8: зависимости от угла  $\psi$  напряжения, тока, полной мощности ( $S$ ) и коэффициента мощности ( $\cos \phi$ ) при номинальной нагрузке на валу РСМ. На рис. 7, 8 штриховыми линиями указана фаза вектора тока  $\psi = 29.5^\circ$ , при которой обеспечиваются параметры машины, близкие к номинальным. В этом режиме напряжение статора  $U = 662$  В, ток фазы  $I = 577$  А, сдвиг вектора напряжения относительно оси  $q$  равен  $9.33^\circ$ , коэффициент мощности 0.777, магнитный поток в

воздушном зазоре, частота вращения ротора и электромагнитный момент номинальные, индуктивности намагничивания по продольной и поперечной осям машины неизменны. Напряжения и токи фаз статора практически синусоидальны.

Параметр	ANSYS Maxwell	ComSim	Различие
Мощность на валу (задана), кВт	500	500	0 %
Полная мощность статора, кВА	662.5	661.98	-0.08 %
Напряжение обмотки статора, В	660	662.54	+0.38 %
Ток фазы обмотки статора, А	579.8	576.88	-0.5 %
Коэффициент мощности	0.776	0.777	+0.12 %
Частота тока статора (задана), Гц	50	50	0 %
Угол нагрузки $\theta$ , ...°	-9.6	-9.33	0.27
Угол $\psi$ (задан), ...°	29.5	29.5	0
Мощность потерь, кВт	14.1	14.7	-
Магнитный поток в воздушном зазоре, %	100	99.95	-0.05
КПД, %	97.26	97.14	-0.12
Небаланс мощности, кВт	0.18	-0.0033	-
Шаг расчета по времени (задан), с	0.00005	0.000005	-
Время расчета на интервале 0.02 с, мкс	640	0.0152	-

**Сравнение результатов расчета по различным методикам характеристик РСМ.** В таблице приведены данные для сравнения результатов расчетов в ANSYS Maxwell и в ComSim. Расчеты выполнены для сформировавшегося режима работы установки на одном периоде напряжения питания двигателя при указанных ранее параметрах системы.

Как видно из таблицы, небаланс мощности, характеризующий точность вычислений [3], пренебрежимо мал. При расчетах в ANSYS Maxwell и в ComSim обеспечивается достаточно хорошее совпадение результатов (погрешности менее 1 %). Различия в результатах расчетов обусловлены следующим. В Maxwell из аналитического расчета обмотки статора в качестве исходных данных задается только индуктивность рассеяния лобовой части, не попадающей в область решения задачи в двухмерной постановке, а составляющие пазового и дифференциального рассеяний определяются МКЭ. В ComSim задается в качестве

данных полная индуктивность рассеяния, полученная аналитически.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны модели реактивной синхронной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора в ANSYS Maxwell, а также в ComSim с применением зависимостей индуктивностей  $L_{ad}$  и  $L_{aq}$  от тока статора и его фазы.

2. Результаты расчетов характеристик реактивной машины в ANSYS Maxwell и в ComSim достаточно точно соответствуют друг другу.

Модель реактивной машины в среде ComSim позволяет создавать быстродействующие достаточно точные модели установок для расчетов электро-механических процессов. Совместное применение моделей в ANSYS Maxwell и в ComSim позволяет реализовать эффективные технологии разработки систем с реактивными машинами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синхронные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В. Ф. Самосейко, Ф. А. Гельвер, В. А. Хомяк, Д. А. Хайров; под ред. В. Ф. Самосейко. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016. 174 с.
2. Самосейко В. Ф., Шарашкин С. В. Анализ преимуществ реактивных электрических машин при построении гребной электрической установки // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2017. Т. 17, № 2. С. 14–22.
3. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромехатронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Ладога, 2017. 220 с.
4. Модель синхронной машины с транзисторным возбудителем для анализа нормальных режимов,

внешних и витковых замыканий / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, А. С. Григорян, И. А. Пименова // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 6. С. 61–68.

5. Self-Excitation systems of synchronous generator with a bipolar and unipolar PWM DC-DC Converters / A. Grigoryan, I. Pimenova, M. Pronin, V. Shelyuh // EPE-2016, Karlsruhe, Germany, 5–9 Sept. 2016. P. 1–10.

6. A model of synchronous machine with a transistor exciter for analysis of normal operations, external and turn-to-turn faults / M. V. Pronin, A. G. Vorontsov, I. A. Pimenova, A. S. Grigoryan // IECON, 2016.10.23–27. Italy: Firenze, 2016. P. 1–10.

7. Стечкин С. Б., Субботин Ю. Н. Сплайны в вычислительной математике. М.: Наука, 1976. 248 с.

M. V. Pronin, A. S. Grigoryan  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

G. A. Chesnokov  
PJSC «Power machines»

A. G. Vorontsov  
Ltd «NPC SES»

## MODELING OF SYNCHRONOUS RELUCTANCE MACHINE WITH ANISOTROPIC ROTOR MAGNETIC CONDUCTANCE IN ANSYS AND BY METHODOLOGY OF INTERCONNECTED SUBSYSTEMS

*Models of synchronous reluctance machine with anisotropic rotor magnetic conductance were built. One model was performed in Ansys Maxwell using finite element method. Machine parameters and dependencies of phase currents and of rotational position of phasor stator current in reference to rotor symmetry axis are determined in the model. Other model was built by methods of electric circuit theory in ComSim by using system-modeling methodology by interconnected parts. Known equivalent circuits of synchronous machines with exclusion of excitation loop were used. Quite good concurrence of results from calculations on different models are provided. ComSim models work with significantly less machine time losses. It allows to recommend them for use under modeling of complex electromechanic systems with preliminary determining of machine parameters by finite element method.*

**Synchronous reluctance machine, anisotropic magnetic conductance, modeling, calculation, adequacy, machine time losses**