

Виртуальные модели асинхронного двигателя

В электроприводах переменного тока вопросы динамики решаются главным образом с помощью теории обобщенной электрической машины. Сравнительно недавно появилась новая «Спирально-векторная теория электрических машин переменного тока» [1, 2], согласно которой с помощью спирального вектора можно записать в аналитической форме единственное решение как для установившихся режимов, так и для переходных процессов. В основу этой теории положена схема замещения электрической машины. Другие авторы в своих работах [3, 4] также отмечают возможность решения задач динамики с помощью схемы замещения асинхронного двигателя (АД).

Алим Суптель, к. т. н.
Григорий Малинин, к. т. н.
 malgrig6@rambler.ru
Евгений Ларин

Покажем, что между схемой замещения АД и теорией обобщенной электрической машины имеется тесная связь, а наиболее удобным инструментом для решения задач динамики является программная система MATLAB Simulink.

На рис. 1 изображены схемы замещения АД. Первая схема (рис. 1а) справедлива в неподвижных системах координат a, b, c и α, β . Вторая (рис. 1б) описывает процессы во вращающихся системах координат u, v, x, y, d, q . Будем рассматривать общий случай, когда система координат вращается с произвольной скоростью ω_k . В приведенных схемах предполагается, что переменные и параметры ротора приведены к числу витков статора.

Обмотки статора и ротора находятся в магнитном поле, вращающемся со скоростью ω_c . Вращение ма-

шины и системы координат будем учитывать с помощью добавочных ЭДС вращения, которые для получения уравнений обобщенной электрической машины из схем замещения АД должны определяться следующим образом:

$$\dot{E}_{доб.1} = j\dot{\Psi}_1\omega_k; \dot{E}_{доб.2} = j\dot{\Psi}_2(\omega_k - \omega). \quad (1)$$

Положительные направления для этих ЭДС необходимо принять совпадающими с направлением токов статора и ротора. В частном случае, когда система координат неподвижна, дополнительная ЭДС вводится только в ротор и

$$\dot{E}_{доб.2} = -j\dot{\Psi}_2\omega. \quad (2)$$

Рассмотрим математическое описание процессов в неподвижных системах координат. Проходя последовательно вдоль контуров в схеме на рис. 1а, получаем уравнения для напряжений в контуре статора и ротора:

$$\dot{U}_1 = j\Psi_1\omega_c + \dot{I}_1 R_1; \dot{U}_0 + \dot{E}_{доб.2} + \dot{I}'_2 R'_2 + j\dot{I}'_2 L'_{\sigma 2} \omega_c = 0.$$

Если для контура ротора напряжение \dot{U}_0 выразить через главное потокосцепление $\dot{\Psi}_0$, то оно принимает вид:

$$j\dot{\Psi}_0\omega_c + \dot{E}_{доб.2} + \dot{I}'_2 R'_2 + j\dot{I}'_2 L'_{\sigma 2} \omega_c = 0.$$

Первый и последний члены этого уравнения в сумме характеризуют ЭДС самоиндукции, наводимую в роторе потокосцеплением $\dot{\Psi}_2$,

$$j\dot{\Psi}_0\omega_c + j\dot{I}'_2 L'_{\sigma 2} \omega_c = j\dot{\Psi}_2\omega_c.$$

С учетом (2) уравнение для контура ротора может быть записано в следующем виде:

$$0 = j\dot{\Psi}_2\omega_c + \dot{E}_{доб.2} + \dot{I}'_2 R'_2 = j\dot{\Psi}_2(\omega_c - \omega) + \dot{I}'_2 R'_2.$$

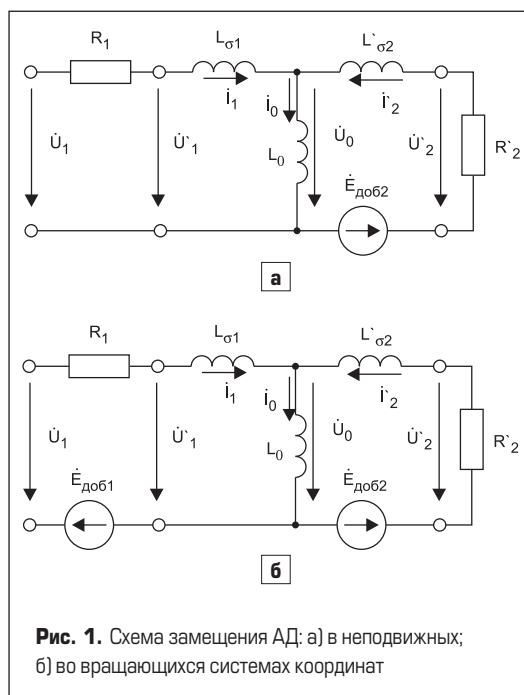


Рис. 1. Схема замещения АД: а) в неподвижных; б) во вращающихся системах координат

Таким образом, электромагнитные процессы в одной фазе описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = j\dot{\Psi}_1\omega_c + \dot{I}_1 R_1, \\ 0 = j\dot{\Psi}_2(\omega_c - \omega) + \dot{I}'_2 R'_2. \end{cases} \quad (3)$$

В системе уравнений (3) скорость ω входит в состав угловой частоты скольжения $\omega_2 = \omega_c - \omega$. Если в качестве переменной принимать эту частоту, то расчет электромагнитных процессов можно выполнять без учета механического процесса по методике, предложенной в [1, 2], не переходя к теории обобщенной электрической машины. Процессы можно рассчитывать и путем компьютерного моделирования в соответствии с теорией обобщенной электрической машины.

Взаимную ориентацию переменных во временной области удобно рассматривать с помощью векторной диаграммы на рис. 2. На этой диаграмме учитывается добавочная ЭДС в роторе и выполнены дополнительные построения в предположении, что $\omega < \omega_c$. Процессы будут более понятными, если указать физическую сущность отдельных составляющих.

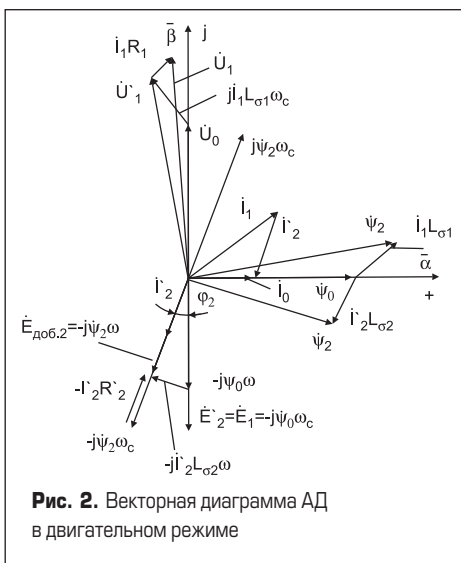


Рис. 2. Векторная диаграмма АД в двигательном режиме

Выражение $j\dot{\Psi}_1\omega_c = -\dot{E}_1$ представляет собой ЭДС самоиндукции, наведенную в статоре потоком сцепления Ψ_1 , в комплексной форме записи. Во временной форме эта ЭДС записывается как $e_1(t) = d\Psi_1(t)/dt$. На векторной диаграмме она действует встречно напряжению \dot{U}'_1 .

Выражение $j\dot{\Psi}_2\omega_c$ представляет собой ЭДС самоиндукции, наведенную в роторе потоком сцепления Ψ_2 . Во временной форме это выражение принимает вид $e_2(t) = -d\Psi_2(t)/dt$. Выражение $-j\dot{\Psi}_2\omega = \dot{E}_{доб.2}$ представляет собой ЭДС вращения, наводимую в роторе потоком сцепления Ψ_2 .

Из (3) и рис. 2 следует, что при неподвижном роторе $\omega = 0$ ток в роторе $\dot{I}'_2 = -j\dot{\Psi}_2\omega_c/R'_2$ потребляется от источника питания. Знак минус характеризует фактическое направление тока \dot{I}'_2 . Часть \dot{I}_1 идет на создание тока возбуждения \dot{I}_0 , а другая его часть, того же направления, перетекает в ротор для создания полезной мощ-

ности. При вращающемся роторе появляется добавочная ЭДС (2), ток в роторе пропорционален частоте скольжения $\dot{I}'_2 = -j\dot{\Psi}_2(\omega_c - \omega)/R'_2$. В режиме идеального холостого хода ($\omega = \omega_c$) он становится равным нулю.

Перейдем к схеме замещения на рис. 16. Проходя, как и раньше, последовательно по контурам, получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 - \dot{E}_{доб.1} &= j\dot{\Psi}_1\omega_c + \dot{I}_1 R_1, \\ \dot{U}_0 + \dot{E}_{доб.2} + \dot{I}'_2 R'_2 + j\dot{I}'_2 L'_{\sigma 2} \omega_c &= 0. \end{aligned}$$

Выразив \dot{U}_0 через потокоцепление $\dot{\Psi}_0$ и выполнив простые преобразования с учетом (1), получим:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = j\dot{\Psi}_1\omega_c + j\dot{\Psi}_1\omega_k + \dot{I}_1 R_1, \\ 0 = j\dot{\Psi}_2\omega_c + j\dot{\Psi}_2(\omega_k - \omega) + \dot{I}'_2 R'_2. \end{cases} \quad (4)$$

В правой части этих уравнений присутствуют ЭДС двух видов с разной физической сущностью: $j\dot{\Psi}_1\omega_c, j\dot{\Psi}_2\omega_c$ — ЭДС самоиндукции, наводимые периодически изменяющимися токами статора и ротора; $j\dot{\Psi}_1\omega_k, j\dot{\Psi}_2(\omega_k - \omega)$ — ЭДС вращения или ЭДС взаимной индукции с учетом взаимодействия с другими фазами. Эти ЭДС как раз и являются добавочными ЭДС.

Векторная диаграмма на рис. 2 отражает процессы в одной фазе. Для создания электромагнитного момента обязательно нужна еще одна или две фазы. В этом случае состояния переменных рассматривают с помощью пространственных векторных диаграмм. Направим вдоль действительной оси «+», совпадающей с геометрической осью фазы «А», единичный вектор \bar{a} . Вдоль мнимой оси «j» расположим геометрическую ось второй фазы «В» и еди-

ничный вектор \bar{b} . Одно из достоинств ортогональных систем координат состоит в том, что модули временных и пространственных векторов одинаковы. В этом случае временные и пространственные векторные диаграммы принимают одинаковый вид, изменяется лишь обозначение для переменных. На временной диаграмме переменная отмечается точкой над переменной, на пространственной диаграмме — чертой сверху. Изменив обозначение переменных на рис. 2, получим пространственную векторную диаграмму.

Если теперь сравнивать процессы во временной и пространственной областях, то они будут совершенно разные. В пространственной области изображающие вектора вращаются относительно геометрических осей отдельных фаз и отражают процессы во всех фазах. Во временной области вектора вращаются только относительно комплексной плоскости и отражают процессы только в одной фазе. Если их поведение рассматривать относительно геометрической оси рассматриваемой фазы, то они пульсируют во времени.

Определенные неудобства возникают в 3-фазной неподвижной системе координат a, b, c . В этой системе координат модули временных и пространственных векторов разные, появляются масштабные коэффициенты $3/2$ и $2/3$.

Так как в ортогональных системах координат модули временных и пространственных векторов принимаются одинаковыми, то от временной формы записи изображающих векторов (4) можно перейти к математической описанию процессов в пространственной области:

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = j\bar{\Psi}_1\omega_c + j\bar{\Psi}_1\omega_k + \bar{I}_1 R_1, \\ 0 = j\bar{\Psi}_2\omega_c + j\bar{\Psi}_2(\omega_k - \omega) + \bar{I}'_2 R'_2. \end{cases} \quad (5)$$

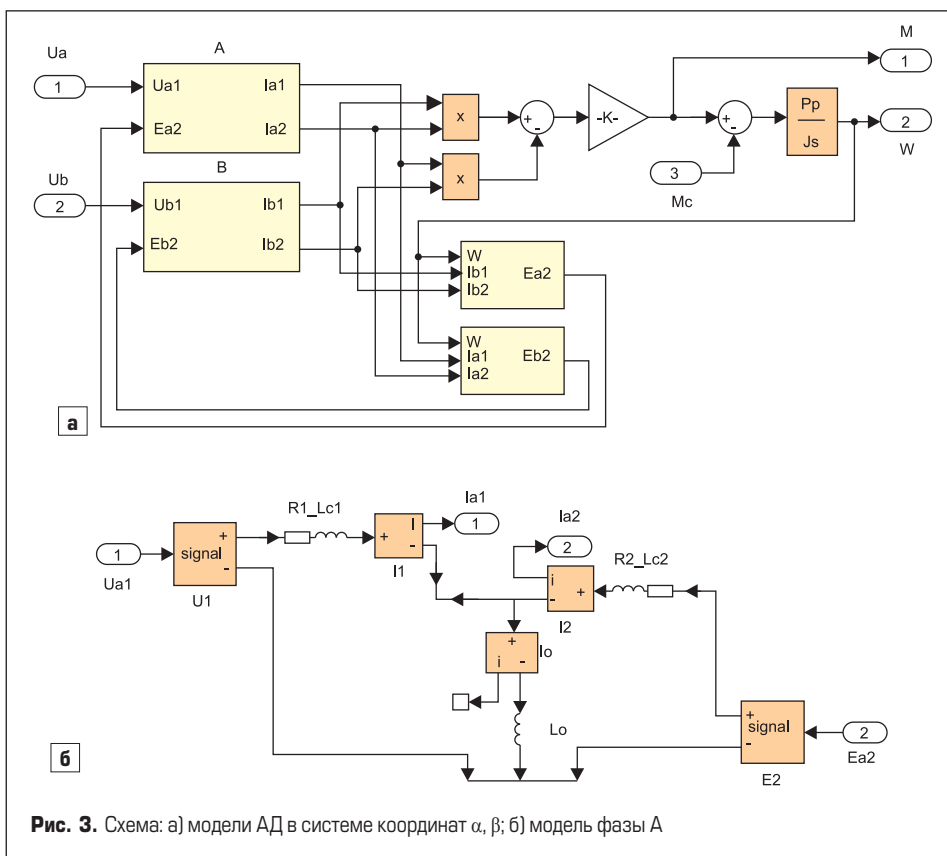


Рис. 3. Схема: а) модели АД в системе координат α, β ; б) модель фазы А

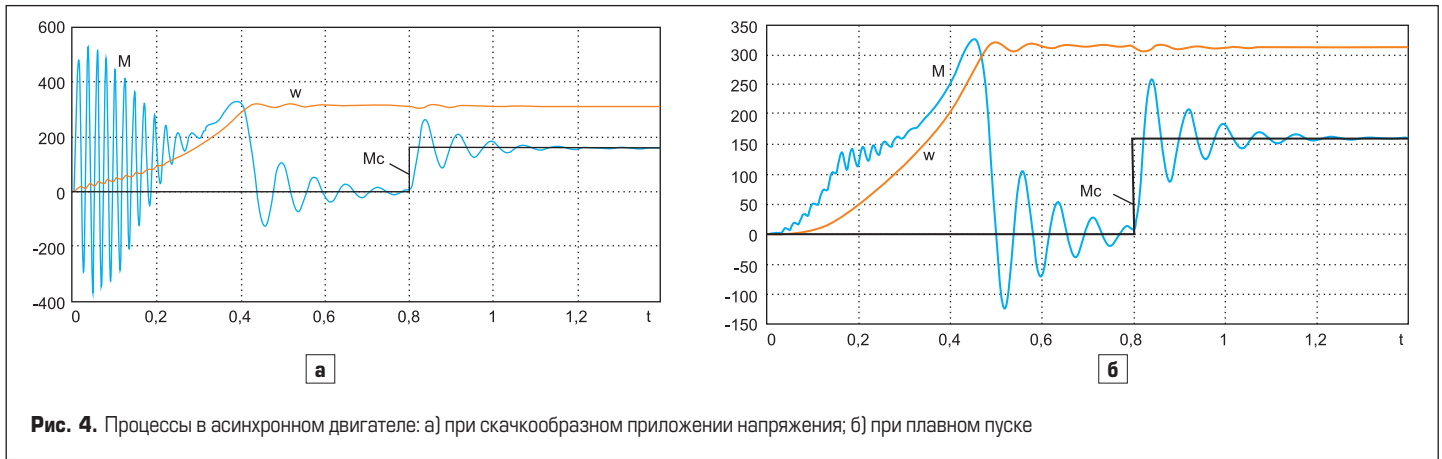


Рис. 4. Процессы в асинхронном двигателе: а) при скачкообразном приложении напряжения; б) при плавном пуске

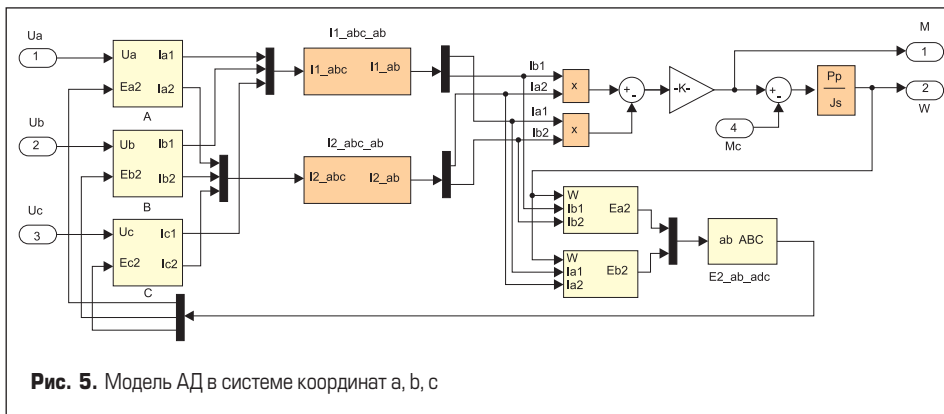


Рис. 5. Модель АД в системе координат a, b, c

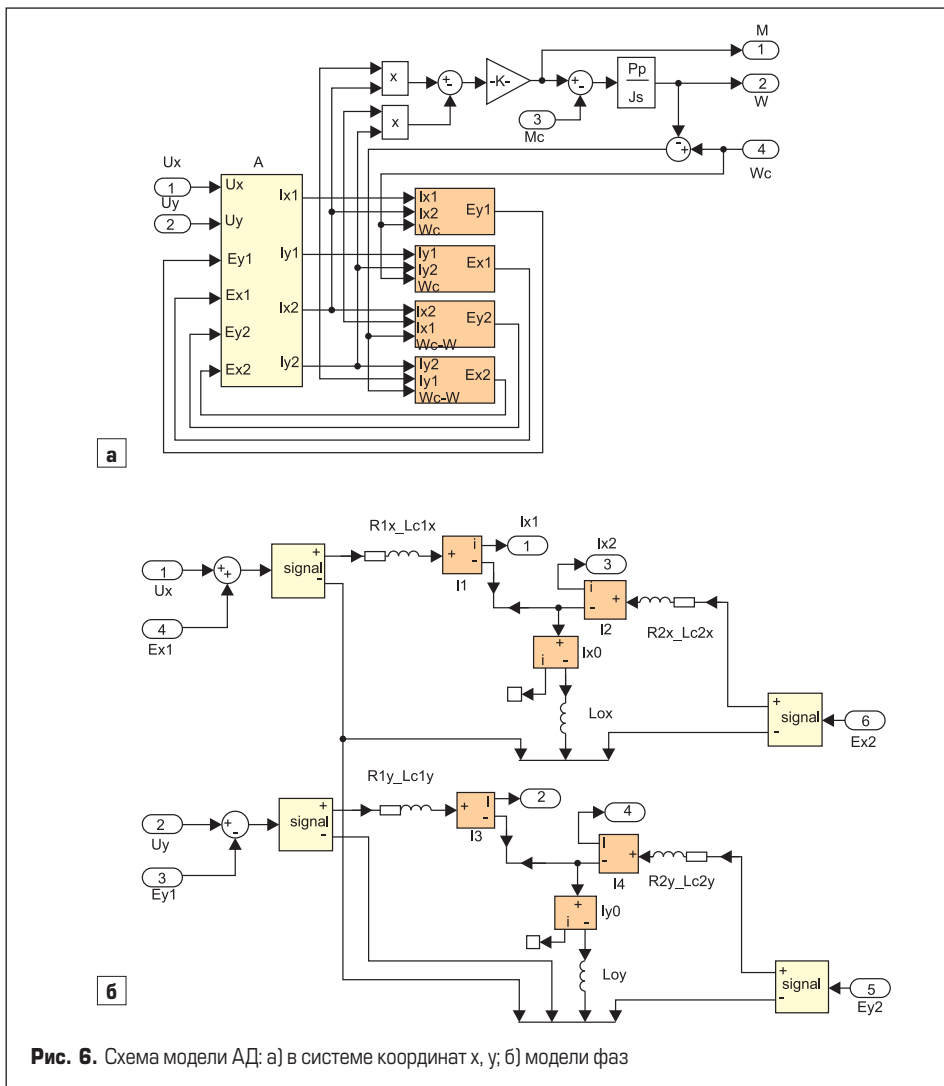


Рис. 6. Схема модели АД: а) в системе координат x, y; б) модели фаз

Эти уравнения являются основополагающими в теории обобщенной электрической машины. Таким образом, путем простых преобразований установлена связь между схемой замещения и теорией обобщенной электрической машины. Эта связь стала возможной благодаря введению в схему замещения добавочных ЭДС, которые описываются выражениями (1) и (2).

В качестве примеров использования полученных результатов рассмотрим составление виртуальных моделей АД на основе его схем замещения. Наиболее простой является модель в системе координат α, β (рис. 3а). Для ее составления следует взять для каждой фазы по схеме замещения. В пространстве эти схемы должны располагаться по двум взаимно ортогональным осям α и β . Модель содержит виртуальную часть (блоки А и В) и математическую. Модель одной фазы (фазы А) показана в раскрытом виде (рис. 3б). На вход блока поступает напряжение $u_a = u_{a1} = U_m \cos \omega_c t$. В качестве выходных переменных выступают токи на отдельных участках схемы замещения: ток статора $i_{\alpha 1}$ и ток ротора $i_{\alpha 2}$.

Аналогичные явления протекают и в другой фазе, смещенной в пространстве под углом 90 электрических градусов. В ней на вход поступает напряжение: $u_b = u_{\beta 1} = U_m \sin \omega_c t$. В качестве выходных переменных принимаем ток статора $i_{\beta 1}$ и ток ротора $i_{\beta 2}$.

Электромагнитный момент для данной модели вычисляется по формуле

$$M = 3/2 \times p_n L_0 (i_{\beta 1} i_{\alpha 2} - i_{\alpha 1} i_{\beta 2}),$$

где p_n — число пар полюсов АД. Дополнительные ЭДС по осям α и β вычисляются по формулам:

$$E_{\alpha 2} = -(L_0 i_{\beta 1} + L_2 i_{\beta 2}) \omega,$$

$$E_{\beta 2} = -(L_0 i_{\alpha 1} + L_2 i_{\alpha 2}) \omega.$$

На рис. 4 приведены кривые переходных процессов. Расчет проводился для двигателя 4А200L4 мощностью 45 кВт при статическом моменте на валу двигателя $M_c = 160$ Н·м. На рис. 4а напряжение, подводимое к двигателю, прикладывается скачком. На начальном участке имеются колебания электромагнитного момента. На рис. 4б напряжение на начальном участке повышается плавно с помощью устройства плавного пуска.

Благодаря этому удастся существенно уменьшить амплитуду колебаний электромагнитного момента. После разгона в обоих случаях прикладывается статический момент.

Модель 3-фазной машины (рис. 5) содержит три блока со схемами замещения для каждой фазы. От ранее рассмотренной эта модель отличается наличием прямых и обратных координатных преобразователей $I_{1_abc_\alpha\beta}$, $I_{2_abc_\alpha\beta}$ и $E_{2_\alpha\beta_abc}$.

Модель 2-фазной машины в системе координат x, y приведена на рис. 6а. Здесь добавочные ЭДС (1) вводятся в статор и ротор и вычисляются по формулам:

$$\begin{cases} e_{x1} = \Psi_{y1}\omega_c; e_{y1} = \Psi_{x1}\omega_c \\ e_{x2} = \Psi_{y1}(\omega_c - \omega); e_{y2} = -\Psi_{x1}(\omega_c - \omega), \end{cases}$$

Электромагнитный момент вычисляется по формуле:

$$M = 3/2 \times p_p L_0 (i_{y1} i_{x2} - i_{x1} i_{y2}).$$

В основу модели положена схема замещения АД (рис. 16). Модели фаз x и y (функциональный блок А) раскрыты на рис. 6б.

Рассмотренная методика может иметь определенный интерес, в первую очередь, в учебном процессе — по той причине, что достаточно просто и наглядно позволяет выполнить переход от схемы замещения к теории обобщенной электрической машины. Приведенные модели хорошо согласуются с реальными физическими явлениями, их можно использовать при решении самых разнообразных задач, в частности, при анали-

зе коммутационных процессов с помощью силовых полупроводниковых ключей. ■

Литература

1. Ямамура С. Спирально-векторная теория электрических цепей и машин переменного тока. Санкт-Петербург. 1993.
2. Ямамура С. Спирально-векторная теория электрических машин переменного тока // Электротехника. 1996. № 10.
3. Поздеев А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. Чебоксары: Изд-во ЧГУ. 1998.
4. Донской Н. В. Регулируемые электроприводы переменного тока. Чебоксары: Изд-во ЧГУ. 2007.