

О МОДЕЛЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ НЕКАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В. В. Кузнецов

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: wit_jane2000@mail.ru

А. В. Николенко

Кандидат технических наук, доцент,

заведующий кафедрой*

E-mail: nikolenko_etep@mail.ru

*Кафедра электротехники и электропривода

Национальная металлургическая академия Украины

пр. Гагарина, 4, г. Днепропетровск, Украина, 49600

У статті розглянуті питання роботи асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором в умовах неякісної електроенергії. Проаналізовано існуючі математичні моделі асинхронного двигуна, що працює у зазначених умовах, наведено їх переваги та недоліки. Виявлено моделі, які відображають вплив окремих показників якості напруги живлення на роботу електромеханічного перетворювача

Ключові слова: математична модель, асинхронний двигун, якість електричної енергії, електромеханічний перетворювач, напруга

В статье рассмотрены вопросы работы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в условиях некачественной электроэнергии. Проанализированы существующие математические модели асинхронного двигателя, работающего в указанных условиях, приведены их достоинства и недостатки. Выявлены модели, которые отражают влияние отдельных показателей качества питающего напряжения на работу электромеханического преобразователя

Ключевые слова: математическая модель, асинхронный двигатель, качество электрической энергии, электромеханический преобразователь, напряжение

1. Введение

На сегодняшний день асинхронные двигатели являются основными преобразователями электрической энергии в механическую и составляют основу привода большинства различных механизмов. Такое положение они завоевали благодаря удачному сочетанию комплекса эксплуатационных и конструктивных характеристик – способность автоматически изменять вращающий момент в соответствии с изменением момента сопротивления на валу и высокому коэффициенту полезного действия, а также своей простоте конструкции и достаточно низкой себестоимости изготовления в сочетании с другими электромеханическими преобразователями.

Современный электропривод, реализующий процессы электромеханического преобразования энергии, который в основном базируется на использовании в качестве приводных устройств асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, конструктивно не сложен. Вместе с тем эксплуатация данного класса двигателей в настоящее время связана со многими проблемами. Основной из них является питание асинхронных двигателей некачественной электроэнергией. Достоверно известно, что даже незначительные отклонения качества питающего напряжения приводят к негативным последствиям, связанным со старением изоляции и снижением таких энергетических показателей работы асинхронных двигателей как коэффициент полезного действия и коэффициент мощности.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Моделирование электромеханических систем позволяет на предпроектной стадии оценить протекающие в них процессы. На основе этих данных могут быть скорректированы параметры силовых установок и систем управления ими, проведена проверка соответствия выбранного оборудования режимам работы. Математические аналоги асинхронных двигателей широко используются для оценки эффективности законов управления, исследования электромагнитных процессов и прогнозирования энергетических показателей их работы. Однако, ситуация усложняется, когда при моделировании необходимо учитывать качественные показатели электроэнергии, такие как несимметрия и несинусоидальность электрических величин. Проблема заключается в том, что в силу принимаемых в этом случае допущений, сама модель АД становится зачастую неадекватной. Если же используются более сложные модели, описание процессов настолько усложняется, что поиск требуемых зависимостей становится слишком затруднительным.

Тем не менее, допущение о симметрии и синусоидальности питающего напряжения является сейчас, фактически, необоснованным, поскольку качество электроэнергии в цехах промышленных предприятий практически всегда не соответствует необходимым требованиям. Решение данной проблемы невозможно без наличия единой математической модели, которая позволяла бы анализировать энергетическую

эффективность асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в установившихся режимах при различных значениях всех показателей качества электрической энергии в сети.

К настоящему времени синтезом математических моделей асинхронного двигателя занимались такие известные российские и украинские ученые как Родькин Д. И., Копылов И. П., Черный А. П., Петров Л. П., Войнова Т., Беспалов В. Я., Ковалев Е. Б. и др., а так же зарубежные исследователи Pedra J., R. Krishnan, J. L. Kirtley, S. J. Chapman, M. R. Hachicha, M. H. Gmiden. Однако исследования авторов [1, 2] посвящены вопросам анализа работы электромеханического преобразователя при допущении о его симметрии, и синусоидального напряжения на входах АД. В работах [3, 4] проводится идентификация параметров электрической машины с целью оценки ее ресурса. Исследования [5–7] связаны с исследованиями способов управления АД.

На основании проведенного анализа, можно предположить, что единой модели, позволяющей оценить энергетическую эффективность электрической машины, работающей в условиях некачественного питания, т. е. учитывающей все показатели качества электроэнергии (ПКЭ) одновременно, не существует.

Сформулируем требования к виду, функциональности, характеристикам и составу входных величин, которым должна удовлетворять модель асинхронного двигателя:

1. Модель АД должна быть работоспособной при произвольной форме напряжения на статоре, включая несинусоидальность и несимметрию. Это требование является необходимым для большинства используемых в настоящее время математических аналогов рассматриваемых двигателей.

2. Разрабатываемая модель должна быть адекватной как в установившихся, так и в переходных режимах, связанных с изменением нагрузки, качества электроэнергии, управляющего воздействия.

3. Синтезированный аналог АД должен иметь возможность подключения модулей фильтров со стороны входа электродвигателя и при этом позволять определить зависимость результирующей формы напряжения «после фильтров» от потребляемого АД тока.

4. Выходными параметрами модели должны быть:

- мгновенные значения токов статора и ротора асинхронного электродвигателя, их спектр;
- активная (P), реактивная (Q) и полная (S) мощности, включая их ту долю, что связана с искажениями напряжения со стороны статора, соответствующим реальным показателям качества электроэнергии;
- коэффициент полезного действия (КПД, η %) и коэффициент мощности ($\cos \varphi$);
- составляющие отдельных потерь в двигателе: потери в меди статора (ΔP_{M1}), ротора (ΔP_{M2}) и стали (ΔP_C);
- скорость (ω) и электромагнитный момент (M) двигателя в зависимости от нагрузки на валу, включая их спектральные характеристики.

Таким образом, разрабатываемая модель должна предоставлять полный объем данных, необходимых для исследования режимов работы асинхронного

электродвигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии с целью оценки электромагнитной составляющей образующегося при этом экономического ущерба.

3. Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является анализ возможности использования существующих математических аналогов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для реализации математической модели, соответствующей вышеуказанным требованиям или составления на их основе единой математической модели асинхронного двигателя, которая позволяет прогнозировать его энергетические показатели при изменении всех показателей качества питающего напряжения в сети одновременно.

Основной задачей данного исследования является анализ разработанных аналогов АД с целью выявления в них вычислительных блоков, соединение которых позволит учесть все показатели качества электроэнергии одновременно.

4. Результаты анализа существующих математических моделей с короткозамкнутым ротором

Существует два подхода к моделированию электромеханического преобразования энергии: на базе теории поля и теории электрических цепей, основанных соответственно на уравнениях Максвелла и Кирхгофа. Но в настоящее время наиболее прогрессивным методом анализа процессов электромеханического преобразования энергии является обобщенный подход, сочетающий в себе обе указанные теории, когда, исходя из картины поля в воздушном зазоре электрической машины, составляются уравнения для напряжений, а затем уже через токи или потокосцепления записываются уравнения для электромагнитного момента [8].

На сегодняшний день известны достаточно полные математические модели асинхронных электродвигателей. Поведение их в различных условиях эксплуатации рассмотрено в уже классических исследованиях [9, 10]. Но вопрос моделирования работы асинхронных двигателей при некачественном питании так и остался нерешенным.

Наиболее распространенная математическая модель асинхронного электромеханического преобразователя энергии приведена в работе Копылова И. П. [8]. Эта пространственная модель трехфазной идеализированной машины (рис. 1) имеет ряд допущений: машина двухполюсная, имеет гладкий воздушный зазор, все ее параметры линейные и напряжение синусоидальное. На рисунке представлены по три обмотки статора и ротора с количеством витков w_a , w_b , w_c и w_a , w_b , w_c соответственно, сдвинутые на 120° . В непреобразованной системе координат (рис. 2) при перемещении обмоток взаимные индуктивности между ними изменяются, а $(d\theta/dt) = \omega_r$.

Для рассматриваемой машины в непреобразованной системе координат A, B, C, a, b, c справедлива система дифференциальных уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= \frac{d\Psi_A}{dt} + i_A R_A; u_B = \frac{d\Psi_B}{dt} + i_B R_B; \\ u_C &= \frac{d\Psi_C}{dt} + i_C R_C; u_a = \frac{d\Psi_a}{dt} + i_a R_a; \\ u_b &= \frac{d\Psi_b}{dt} + i_b R_b; u_c = \frac{d\Psi_c}{dt} + i_c R_c; \end{aligned} \right\}$$

$$M_c + J \frac{d\omega_r}{dt} = M_\partial,$$

где R – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора; Ψ – результирующие потокосцепления этих обмоток.

Здесь потокосцепление одной, например фазы A , зависит от токов и других фаз статора и ротора:

$$\Psi_A = i_A L_A + i_B M_{AB} + i_C M_{AC} + i_a M_{Aa} + i_b M_{Ab} + i_c M_{Ac}.$$

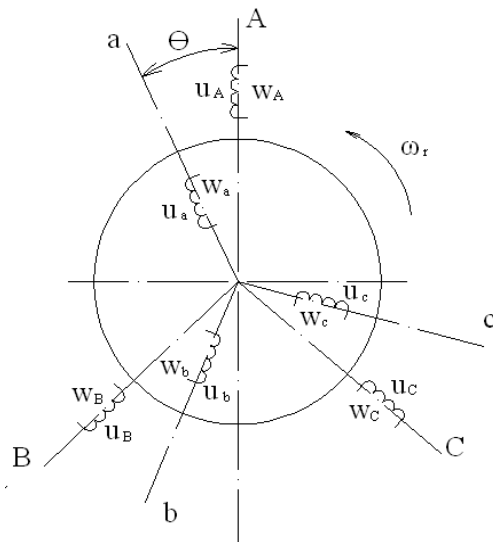


Рис. 1. Пространственная модель идеализированной трехфазной асинхронной машины

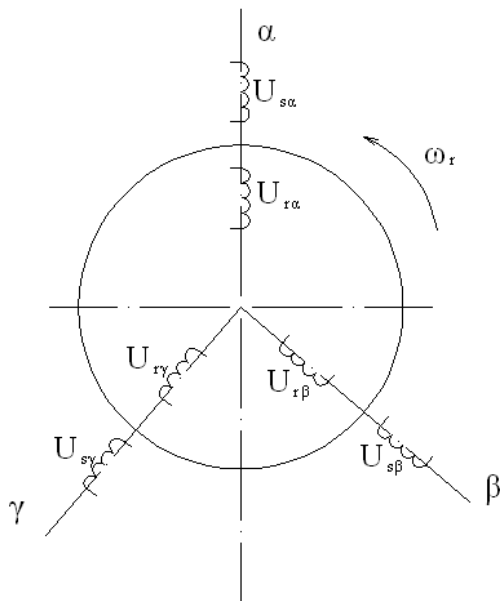


Рис. 2. Пространственная модель трехфазной асинхронной машины в заторможенной системе координат

По аналогии записываются потокосцепления для пяти других контуров. В данной системе координат индуктивности (L), взаимные индуктивности (M) в уравнении для потокосцепления являются периодическими коэффициентами, которые изменяются по гармоническому закону при вращении ротора машины. Для устранения этого осуществляется переход к заторможенной системе координат, где круговое поле в воздушном зазоре представляют результирующими векторами.

Пространственная модель трехфазной идеализированной машины в заторможенной трехфазной системе координат представлена на рис. 2. Уравнения, соответствующие данной модели в координатах α, β, γ , неподвижных относительно статора, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{sa} &= \frac{d\Psi_{sa}}{dt} + i_{sa} r_{sa}; \\ u_{s\beta} &= \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} + i_{s\beta} r_{s\beta}; \\ u_{s\gamma} &= \frac{d\Psi_{s\gamma}}{dt} + i_{s\gamma} r_{s\gamma}; \\ u_{ra} &= \frac{d\Psi_{ra}}{dt} + i_{ra} r_{ra} + \omega_r \frac{(-\Psi_{r\gamma} + \Psi_{r\beta})}{\sqrt{3}}; \\ u_{r\beta} &= \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + i_{r\beta} r_{r\beta} + \omega_r \frac{(-\Psi_{ra} + \Psi_{r\gamma})}{\sqrt{3}}; \\ u_{r\gamma} &= \frac{d\Psi_{r\gamma}}{dt} + i_{r\gamma} r_{r\gamma} + \omega_r \frac{(-\Psi_{r\beta} + \Psi_{ra})}{\sqrt{3}}. \end{aligned} \right\}$$

Здесь потокосцепления

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{sa} &= i_{sa} L_{sa} - 0.5 M i_{s\beta} - 0.5 M i_{s\gamma} + (i_{ra} - 0.5 i_{r\beta} - 0.5 i_{r\gamma}) M; \\ \Psi_{s\beta} &= i_{s\beta} L_{s\beta} - 0.5 M i_{s\gamma} - 0.5 M i_{sa} + (i_{r\beta} - 0.5 i_{ra} - 0.5 i_{r\gamma}) M; \\ \Psi_{s\gamma} &= i_{s\gamma} L_{s\gamma} - 0.5 M i_{sa} - 0.5 M i_{s\beta} + (i_{r\gamma} - 0.5 i_{ra} - 0.5 i_{r\beta}) M; \\ \Psi_{ra} &= i_{ra} L_{ra} - 0.5 M i_{r\beta} - 0.5 M i_{r\gamma} + (i_{sa} - 0.5 i_{s\beta} - 0.5 i_{s\gamma}) M; \\ \Psi_{r\beta} &= i_{r\beta} L_{r\beta} - 0.5 M i_{r\gamma} - 0.5 M i_{ra} + (i_{s\beta} - 0.5 i_{sa} - 0.5 i_{s\gamma}) M; \\ \Psi_{r\gamma} &= i_{r\gamma} L_{r\gamma} - 0.5 M i_{ra} - 0.5 M i_{r\beta} + (i_{s\gamma} - 0.5 i_{sa} - 0.5 i_{s\beta}) M. \end{aligned} \right\}$$

При этом электромагнитная энергия, сконцентрированная в воздушном зазоре:

$$W_\partial = 0.5 \sum_{i=1}^n \Psi_i \times i_i,$$

а электромагнитный момент

$$M_\partial = \frac{\sqrt{3}}{2} p M (i_{r\gamma} i_{sa} + i_{ra} i_{s\beta} + i_{r\beta} i_{s\gamma} - i_{r\beta} i_{sa} - i_{r\gamma} i_{s\beta} - i_{ra} i_{s\gamma}),$$

где $i=1, n$ – число обмоток машины.

Данная система состоит из четырнадцати уравнений, в которой зависимыми переменными являются по шесть токов и потокосцеплений, электромагнитный момент и скорость вращения. Система в общем случае – нелинейна.

Данную модель, как указано в [9], целесообразно применять, для исследования асинхронной электрической машины в динамическом режиме при синусоидальном питающем напряжении. Для анализа же установившегося режима, как предельного случая динамического, уравнения для напряжений могут быть

получены из уравнений электромеханического преобразования путем замены в исходных уравнениях оператора дифференцирования $d(\)/dt$ на $j\omega$. Недостатком такой модели является то, что она рассчитана на питание асинхронного двигателя только от симметричной системы синусоидального напряжения. При несимметрии напряжений появляется необходимость раскладывать их на прямую, обратную и нулевую последовательности, и рассматривать момент на валу как сумму от каждой из этих последовательностей. Таким образом, для анализа работы асинхронного двигателя в условиях питания некачественной электроэнергией необходимо существенное усложнение исходной модели.

Ряд исследований [11–13] посвящено вопросам математического моделирования электрических машин с целью определения влияния конструктивной несимметрии асинхронного двигателя на его электромагнитные параметры. Такие модели целесообразно использовать, как отмечают авторы, при проектировании и производстве серийных асинхронных машин, а также в исследованиях, связанных с определением ресурса электрической машины. Однако данные математические аналоги электрических машин не соответствуют требованиям поставленной задачи исследования.

В [14–19] рассматриваются проблемы, связанные нелинейностью параметров электромеханического преобразователя, что в итоге способствует определению ресурса самой машины и идентификации ее параметров. Как указывают авторы, используемые ими модели пригодны для электрических машин, прошедших ремонт и находящихся в условиях интенсивной эксплуатации. Они также не представляют особого интереса в связи с несоответствием задаче исследования.

В работах [20, 21] проведен анализ энергетических преобразований в электромеханических системах. Проанализированы возможности снижения потерь в асинхронном двигателе, путем применения специальных устройств, позволяющих улучшить качество преобразования энергии в самом двигателе. Вышеуказанные исследования также не соответствуют поставленной в работе цели.

Интерес представляют работы [22–24], где автором предложена математическая модель, описывающая асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором как объект регулирования. Она составлена с допущением, что машина симметрична, а напряжение на ее входах синусоидальное. Хотя указанный математический аналог и позволяет анализировать процессы преобразования энергии в двигателе, при принятых допущениях он не позволяет получить адекватную оценку потерь в электромеханическом преобразователе при его некачественном питании.

Исследования [25–27] позволяют провести классификацию математических аналогов асинхронного двигателя. Авторы указывают, что в настоящее время используются два вида: на базе обобщенной двухфазной машины, α - β , d-q, а также x-y и в естественных трехфазных осях на

основе фазных или линейных напряжений. Отмечено, что модели d-q, а также x-y жестко привязаны к скорости поля статора или ротора, и их применение возможно, только в случае питания обмоток статора двигателя синусоидальным напряжением. Если же статор питается несинусоидальным напряжением, то используются α - β модели и модели в естественных осях.

Особого внимания заслуживает математическая модель электромеханического преобразователя, работающего в условиях несимметрии первичных напряжений, рассмотренная в [28]. Для анализа работы асинхронной машины в условиях несимметричного режима работы автором применен метод симметричных составляющих. Система несимметричных первичных напряжений статора (U_{A1}, U_{B1}, U_{C1}) представляется как сумма составляющих прямой ($U_{A11}, U_{B11}, U_{C11}$) и обратной последовательностей ($U_{A12}, U_{B12}, U_{C12}$)

$$U_{A11} = U_{11} = \frac{(U_{A1} + aU_{B1} + a^2U_{C1})}{3};$$

$$U_{A12} = U_{12} = \frac{(U_{A1} + a^2U_{B1} + aU_{C1})}{3},$$

где $a = e^{j2\pi/3}$.

При этом токи в обмотке статора представляют суммой токов прямой ($I_{A11} = I_{11}, I_{B11}, I_{C11}$) и обратной $I_{A12} = I_{12}, I_{B12}, I_{C12}$) последовательностей, которые обусловлены симметричными системами напряжений прямой и обратной последовательностей соответственно. В указанной работе ток прямой последовательности I_{11} в фазе «А» статора находят с помощью схемы замещения асинхронной машины, которая приведена на рис. 3, а, где $s_1 = (\Omega_1 - \Omega) / (\Omega_1)$ – скольжение ротора относительно поля этой последовательности. Здесь где Ω_1 и Ω – угловые скорости указанного поля и ротора.

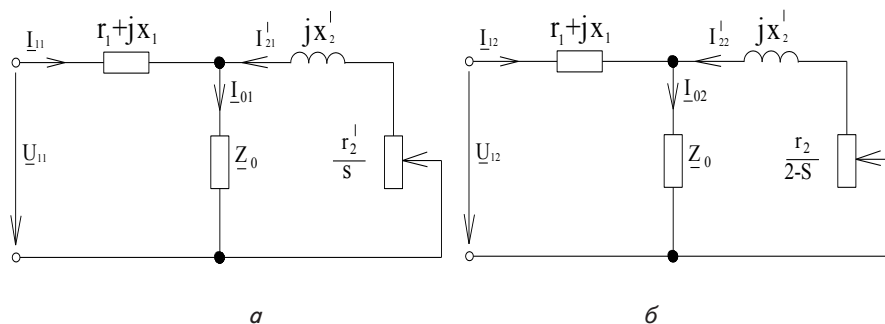


Рис. 3. Схема замещения асинхронного двигателя: а – для напряжения прямой последовательности; б – для напряжения обратной последовательности

При этом ток прямой последовательности (I_{11}) определяется с помощью соответствующих ей системы напряжений и сопротивления обмотки статора.

Для вычисления тока обратной последовательности I_{12} в фазе «А» статора используется схема замещения, приведенная на рис. 3, б, отличающаяся от предыдущей тем, что в нее введено скольжение ротора по отношению к полю обратной последовательности $s_2 = (-\Omega_1 - \Omega) / \Omega_1 = 2 - s$, где $(-\Omega_1)$ – угловая скорость последнего. После расчета токов I_{11} и I_{12} в фазе «А», как их векторную сумму находят полные токи в каждой из фаз статора.

Результирующий вращающий момент асинхронного двигателя (M) при нарушении симметрии напряжений определяется как сумма моментов M_1 и M_2 , связанных с напряжениями прямой и обратной последовательностей соответственно. Данная модель хотя и позволяет выполнить анализ энергетической эффективности двигателя, но только в случае несимметрии питающего напряжения.

Заслуживает также внимания математический аналог АД, описанный в [29]. Здесь исследуется работа машины при несинусоидальном несимметричном напряжении питания в установившемся режиме. Автор производит замену дифференциальных уравнений трехфазной асинхронной машины в осях α - β -0 комплексными вида:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_a^s \\ \underline{U}_\beta^s \\ \underline{U}_a^r \\ \underline{U}_\beta^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r^s + jx^s & 0 & jx_m & 0 \\ 0 & r^s + jx^s & 0 & jx_m \\ jx_m & vM' & r^r + jx^r & vL^r \\ -vM' & jx_m & -vL^r & r^r + jx^r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_a^s \\ \underline{I}_\beta^s \\ \underline{I}_a^r \\ \underline{I}_\beta^r \end{pmatrix}.$$

Затем вводятся составляющие прямой и обратной последовательностей напряжений и токов по осям α - β . При отсутствии нулевой последовательности получены следующие выражения:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{np} + \underline{U}_{обр}; \underline{I}_a = \underline{I}_{np} + \underline{I}_{обр}; \\ \underline{U}_b &= a^2 \underline{U}_{np} + a \underline{U}_{обр}; \underline{I}_b = a^2 \underline{I}_{np} + a \underline{I}_{обр}; \\ \underline{U}_c &= a \underline{U}_{np} + a^2 \underline{U}_{обр}; \underline{I}_c = a \underline{I}_{np} + a^2 \underline{I}_{обр}. \end{aligned}$$

Выполненный переход от дифференциальных уравнений относительно напряжений трехфазной машины в осях α - β -0 к комплексным уравнениям соответствует общеизвестным схемам замещения. Как отмечает автор, параметры последних могут быть получены опытным или расчетным путем.

Выполнив предварительный расчет токов, определяется значение среднего за период электромагнитного момента по формуле:

$$M_o = \int_0^T M(t) dt / T.$$

В результате рассчитывается значение коэффициента полезного действия машины (η) и коэффициента мощности ($\cos \phi$). Рассмотренная модель позволяет выполнить анализ энергетической эффективности асинхронного двигателя при несимметричном несинусоидальном напряжении в питающей сети, однако требует определенной доработки, т. к. она кроме рассмотрения только статических режимов аналогично предыдущей не учитывает и изменения частоты питающего напряжения.

5. Выводы

На основании проведенного анализа существующих математических аналогов АД с короткозамкнутым ротором, можно предположить, что единой модели, позволяющей оценить энергетическую эффективность электрической машины, работающей в условиях некачественного питания, т. е. учитывающей все показатели качества электроэнергии (ПКЭ) одновременно, не существует. Тем не менее, есть модели, которые отражают влияние отдельных показателей качества питающего напряжения на работу электромеханического преобразователя.

По нашему мнению, из сложившейся ситуации существует только один выход – создание имитационной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, используя в качестве вычислительных блоков элементы моделей, описанных выше. Их соединение позволит учесть все показатели качества электроэнергии одновременно, но при этом определение параметров схемы замещения электромеханического преобразователя расчетным путем возможно при неизменной частоте питающего напряжения. Если же она будет изменяться, то вышеуказанное возможно, только лишь на основе проведения соответствующего эксперимента.

Литература

1. Pedra, J. Estimation of typical squirrel-cage induction motor parameters for dynamic performance simulation [Text] / J. Pedra // IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution. – 2006. – Vol. 153, Issue 2. – P. 197. doi: 10.1049/ip-gtd:20045209.
2. Krishnan, R. Electric Motor Drives – Modeling, Analysis and Control [Text] / R. Krishnan. – PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2010. – 626 p.
3. Kirtley, J. L. 6.685 Electric Machines, Massachusetts Institute of Technology [Text] / J. L. Kirtley. – MIT OpenCourseWare, 2005.
4. Chapman, S. J. Electric Machinery Fundamentals [Text] / S. J. Chapman; Fourth Ed. – Mc Graw Hill New York, USA, 2005. – 737 p.
5. Hachicha, M. R. Finite element method for induction motor parameters identification [Text] / M. R. Hachicha, N. B. Hadj, M. Ghariani, R. Neji // Proc. 2012 First Intl. Conf. on Renewable Energies and Vehicular Technology, 2012. – P. 490–496. doi: 10.1109/revet.2012.6195318.
6. Gmiden, M. H. Calculation of two axis induction motor model using finite elements with coupled circuit [Text] / M. H. Gmiden, H. Trabelsi // 6th Intl. Multi-conference on systems, signals and devices, 2009. – P. 1–6. doi: 10.1109/ssd.2009.4956785.
7. Bhattacharjee, S. A modified scalar control strategy of an induction motor with applications in traction [Text] / S. Bhattacharjee // IAEME Intl. J. Elec. Engg. Tech. – 2012. – Vol. 3, Issue 2. – P. 394–404.
8. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов. – М.: Энергия, 1994. – 317 с.
9. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов. – М.: Наука, 2001. – 327 с.
10. Ковач, К. Переходные процессы в машинах переменного тока [Текст] / К. Ковач, И. Рац. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
11. Никиян, Н. Г. От математической модели реальной электрической машины к ее допустимой нагрузке [Текст] / Н. Г. Никиян // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – Т. 2, № 1. – С. 121–127.

12. Никиян, Н. Г. Математические модели трехфазных асинхронных машин с учетом технологических и эксплуатационных отклонений [Текст] / Н. Г. Никиян // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2000. – №1 (4). – С. 59–64.
13. Калінов, А. П. Математичні моделі для дослідження впливу конструктивних несиметрій електричних машин на їх електромагнітні параметри [Текст] / А. П. Калінов, Д. Г. Мамчур // Вісник КДПУ. – 2007. – Вип. 3 (44), Ч. 2. – С. 150–154.
14. Черный, А. П. Оценка качества преобразования энергии в электрических машинах с учетом параметров питающего напряжения [Текст] / А. П. Черный, А. П. Калинов, В. А. Киричков // Вісник КДПУ. – 2007. – Випуск 4 (45), Ч. 1. – С. 67–69.
15. Родькин, Д. И. Определение послеремонтной паспортной мощности асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором [Текст] / Д. И. Родькин, И. Н. Здор, В. В. Прус // Проблемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов КГПИ. – 2000. – Вып. 1 (8). – С. 65–71.
16. Родькин, Д. И. Эквивалентизация потерь асинхронных двигателей при динамическом нагружении [Текст] / Д. И. Родькин, В. А. Мосьпан // Проблемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов КГПИ. – 2000. – Вып. 1 (8). – С. 96–107.
17. Родькин, Д. И. Современные методы определения параметров асинхронных двигателей после их ремонта [Текст] / Д. И. Родькин, И. В. Здор // Проблемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов КГПИ. – 1998. – Вып. 1 (5). – С. 106–117.
18. Родькин, Д. И. Возможности и эффективность метода энергодиагностики в идентификационных задачах [Текст] / Д. И. Родькин, Ю. В. Ромашихин // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета, 2007. – С. 507–512.
19. Родькин, Д. И. Особенности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя при питании от трехпроводной линии [Текст] / Д. И. Родькин, И. Е. Здор // Научные труды КГПУ. – 2001. – Вып. 1/ (10). – С. 212–216.
20. Родькин, Д. И. О преобразовании энергии в электромеханических системах [Текст] / Д. И. Родькин // Научные труды КГПУ. – 2000. – Вып. 2 (9). – С. 106–111.
21. Ковалев, Е. Б. Математическое моделирование асинхронного двигателя при компенсации реактивной мощности с помощью статических конденсаторов [Текст] / Е. Б. Ковалев, О. И. Толочко, Г. С. Чекавский // Научные труды КГПУ. – 2000. – Вып. 2 (9). – С. 287–294.
22. Войнова, Т. В. Математическая модель для исследования трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором как объекта регулирования им для прямого процессорного управления [Текст] / Т. В. Войнова // Электротехника. – 1998. – № 6. – С. 51–61.
23. Войнова, Т. В. Программное обеспечение для моделирования трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в составе системы управления электроприводами и для бездатчикового измерения регулируемых переменных [Текст] / Т. В. Войнова // Электротехника. – 2000. – № 1. – С. 19–25.
24. Беспалов, В. Я. Динамические показатели трехфазных асинхронных двигателей, включаемых в однофазную сеть [Текст] / В. Я. Беспалов, Ю. А. Мощинский, А. П. Петров // Электротехника. – 2000. – № 1. – С. 13–19.
25. Петров, Л. П. Моделирование асинхронных электроприводов с тиристорным управлением [Текст] / Л. П. Петров и др. – М.: Энергия, 1977. – 300 с.
26. Петров, Л. П. и др. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами [Текст] / Л. П. Петров и др. – М.: Энергия, 1970. – 277 с.
27. Петров, Л. П. Автоматизированное моделирование электроприводов на цифровых вычислительных машинах [Текст] / Л. П. Петров, П. Э. Херунцев. – К.:УМК ВО, 1991. – 158 с.
28. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины [Текст] / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 927 с.
29. Копылов, И. П. Расчет на ЦВМ характеристик асинхронных машин [Текст] / И. П. Копылов, О. П. Щедрин. – М.: Энергия, 1973. – 212 с.