

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-776-785

A MATHEMATICAL MODEL OF SINGLE-PHASE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR WITHOUT EXTERNAL PHASE-SHIFTING DEVICES FOR SHIP AUTOMATION SYSTEMS

A. B. Karakaev, A. V. Kostenko

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

It is shown that to date, the single-phase asynchronous motors (SPAM) without external phase-shifting device (PSD), a precise description of physical processes in which exists only in the theoretical form, are used in the modern vessel automation systems. A new mathematical model of such electric motor is offered. The currently existing mathematical models do not include an algebraic description of electromagnetic processes in the steady operation mode of an electric motor, and take into account only their influence in the transitional processes. The necessity to include such calculation at the mathematical modeling of small size SPAM is established.

For these purposes, a new mathematical model that considers the transients influence in all operation modes of the asynchronous electric machine is proposed. The standard approaches to the mathematical modeling of single-phase asynchronous motors are analyzed, the conclusion on impossibility of their use for calculations of electric machines without external PSD for ship automation systems without considering transitional processes in these engines in steady mode of their operation is made. The solution of this problem is topical for ship and shore automation systems, since the equations obtained during the study assist to correctly estimate the loss values in the single-phase asynchronous motors, on which the main part of the ship's automatic control systems is being built. To explain the phenomena occurring in the electric motor, a well-known schematic diagram of SPAM without external PSD is presented. The result is a new mathematical model describing the electromagnetic processes occurring in the single-phase asynchronous motor in a steady mode, as well as the resulting mathematical model makes it possible to calculate the electromechanical transients occurring in SPAM without PSD.

Keywords: single-phase asynchronous motors, mathematical model, phase-shifting devices.

For citation:

Karakaev, Aleksandr B., and Aleksandr V. Kostenko. "A mathematical model of single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 776–785. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-776-785.

УДК 621.3.01(076)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ БЕЗ ВНЕШНИХ ФАЗОСДВИГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СУДОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

А. Б. Каракаев, А. В. Костенко

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Показано, что на сегодняшний день на судах морского и речного флота в системах автоматизации все более активно применяются однофазные асинхронные двигатели без внешних фазосдвигающих устройств, точное описание физических процессов в которых существует лишь теоретически, предлагается новая математическая модель такого электродвигателя. Существующие в настоящее время математические модели не включают алгебраического описания электромагнитных процессов в установившемся режиме работы электродвигателя, а учитывает только их влияние в переходных процессах. Установлена необходимость включения такого расчета при выполнении математического моделирования однофазных асинхронных двигателей небольших размеров. Для этих целей в статье предложена новая математическая модель, которая учитывает влияние переходных процессов во всех режимах работы асинхронной электрической машины. Проанализированы типовые методы и подходы

к построению математических моделей, сделан вывод о невозможности их использования применительно к расчетам электрических машин без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматики и без учета переходных процессов, протекающих в таких двигателях в установившемся режиме их работы. Подчеркивается, что решение данной задачи является актуальным для судовых и береговых систем автоматики, так как полученные в ходе исследования уравнения помогают корректно оценивать значения потерь в однофазных асинхронных электродвигателях, на которых строится основная часть систем автоматического управления судна. Для пояснения явлений, происходящих в электромоторе, приведена общеизвестная принципиальная схема однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств. Результатом работы является получение новой математической модели, описывающей электромагнитные процессы, протекающие в однофазных асинхронных двигателях в установившемся режиме. Полученная математическая модель дает возможность расчета электро-механических переходных процессов, протекающих в них.

Ключевые слова: однофазные асинхронные двигатели, математическая модель, фазосдвигающие устройства.

Для цитирования:

Каракаев А. Б. Математическая модель однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматики / А. Б. Каракаев, А. В. Костенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 776–785. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-776-785.

Введение (Introduction)

Как показывает опыт проведенных исследований, разработка специальных однофазных асинхронных двигателей (ОАД) без внешних фазосдвигающих устройств (ВФСУ) с высокими энергетическими показателями для большинства сфер народного хозяйства, а также судостроения является все более актуальной [1]. В настоящее время проводятся исследования в области применения специального однофазного асинхронного двигателя для судовых вентиляционных систем, в частности в коаксиальных системах вентиляции, а также в других системах автоматики. Использование сдвоенного ОАД для судовой вентиляции позволяет уменьшить массогабаритные показатели действующих систем, а также улучшить показатели надежности и живучести вентиляционного устройства и судна в целом. Внедрение в современные системы вентиляции специального ОАД может внести ощутимый вклад в их эффективность, что играет ключевую роль в жизнеобеспечении экипажа судов [2].

Методы изучения ОАД с питанием от однофазной и трехфазной сетей разрабатываются и улучшаются на протяжении многих лет, однако проблемы математического моделирования электромагнитных и электромеханических процессов не решались так же быстро в связи с несовершенностью вычислительных методов, поэтому теоретическое описание процессов в ОАД превосходит математическое [3]. Конденсаторы, используемые для фазового сдвига, позволяют добиться значительного увеличения крутящего момента, но несмотря на простоту их использования, имеются серьезные недостатки. Например, включение конденсаторов может вызвать резонансные явления [4], которые опасны как для самих конденсаторов, так и для пусковой обмотки двигателя. Поэтому целесообразно вести разработку математической модели ОАД без ВФСУ.

Общеизвестно, что к числу общих для всех однофазных асинхронных двигателей малой мощности особенностей, которые необходимо учитывать при обосновании математической модели и ее анализе, относятся следующие:

1. Большие относительные значения активного и реактивного сопротивления обмотки статора. Так, в отличие от асинхронных машин средней и большой мощности, активное сопротивление статора имеет один порядок с реактивным, а иногда и превышает его в 2–3 раза, что необходимо учитывать при оценке характеристик двигателя.

2. Резкое снижение электромагнитной постоянной времени из-за относительно большого активного сопротивления. Электромагнитная постоянная времени T меньше электромеханической постоянной времени T на порядок и более. В связи с этим значение переходных электромагнитных процессов по сравнению со значением электромеханических процессов незначительно.

3. Малое число пазов на статоре, а значит, и малое число пазов на полюс и фазу, что обуславливает большое влияние обмоточных и зубцовых высших гармонических, при отсутствии применения специальных конструктивных мер.

4. Значительное влияние на выходные показатели и свойства в симметричных машинах различного рода технологической асимметрии. У неуправляемых асинхронных микродвигателей это может привести к колебаниям пускового момента при различных угловых положениях ротора.

5. Значительный по величине намагничивающий ток и наличие обратно вращающегося поля, которое обуславливает низкий КПД у большинства ОАД.

6. Необходимость приспособления в ряде случаев исполнения двигателей к конструкции механизмов, например, совмещение некоторых узлов машины с рабочими органами устройств.

7. Сложность теплового расчета микродвигателей, связанная с разветвленностью путей передачи тепла и необходимостью учета способа крепления и расположения в механизме.

8. Наличие асимметрии, чаще всего электрической, обусловленной схемой включения (для расчета характеристик таких двигателей приходится использовать методы симметричных составляющих, двух вращающихся полей или теорию двух реакций).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для малых электрических машин отношение активных сопротивлений контуров и индуктивных сопротивлений рассеяния к индуктивному сопротивлению намагничивания значительно больше, чем для крупных машин. Поэтому упрощения, возможные в теории крупных машин, связанные с пренебрежением первичными параметрами, совершенно недопустимы для малогабаритных электрических двигателей. По указанной причине векторные диаграммы не могут использоваться для представления основных закономерностей в электрических микромашинах. Здесь наиболее целесообразными и эффективными являются алгебраические методы исследования, в которых составляются уравнения ЭДС машины с последующим их решением относительно токов. Это позволяет получить выражения для основных характеристик машин в функции приложенных напряжений и ее параметров и, таким образом, наиболее рационально подойти к вопросам проектирования.

Теоретический анализ электрических микромашин переменного тока выполняется такими же методами, как и крупных машин. Причем для исследования и расчета характеристик и показателей можно использовать наиболее распространенные методы, в том числе теорию вращающихся полей, метод симметричных составляющих или теорию двух реакций. Наиболее целесообразным для исследования ОАД представляется теория двух реакций якоря [5], в использовании которой накоплен значительный опыт, в том числе для двигателей, подобных исследуемому. Согласно теории двух реакций, любая несимметричная система токов, магнитодвижущих сил (МДС) и напряжений представляет собой составляющие по двум взаимно перпендикулярным осям. При расчетах рассматриваются МДС и магнитные потоки отдельно по каждой из осей. Причем любую симметричную обмотку ротора заменяют двумя взаимно перпендикулярными с одинаковыми параметрами (активными и индуктивными). При этом в машине с короткозамкнутым ротором токи i_d и i_q являются проекциями результирующего вектора тока и МДС. Все параметры обмоток приводят к обмотке статора, совпадающей с продольной осью машины. Ход решения является следующим: составляются уравнения напряжений и ЭДС для всех контуров, уравнения решаются относительно токов обмоток, а затем выводится выражение для электромагнитного момента двигателя.

В настоящее время расчет двигателя на основе метода конечных элементов является наиболее достоверным способом анализа его параметров и нелинейных зависимостей. Этот метод необходим при проектировании прецизионных приводов. Наиболее эффективный результат, как показывают исследования, будет получен тогда, когда при расчете двигателя будет достигнута реализация большого количества соотношений конструктивных параметров. В случае широкой области поиска анализ всех сопоставляемых вариантов только методом конечных эле-

ментов неэффективен вследствие значительных затрат машинного времени, необходимых для расчета одного варианта. В особенности это справедливо для расчета пространственных трехмерных магнитных полей двигателя [6]. По трудоемкости теория двух реакций равноценна методу симметричных составляющих. Более того, выражения для токов, найденные методом симметричных составляющих, можно получить из уравнения ЭДС обобщенной машины в осях d и q , если рассматривать переход к симметричным составляющим как преобразование координат. Учитывая данные обстоятельства, целесообразно использовать для теоретических исследований электромагнитных процессов в ОАД теорию двух реакций.

Асинхронная машина — многообмоточная, при ее расчетах необходимо учитывать контуры вихревых токов статора и ротора. Очевидно, не может быть точного математического описания процессов электромеханического преобразования энергии в реальной электрической машине, так как каждый из источников пространственных гармоник является источником пространственно-полевых помех, а источников гармоник в электрическом поле имеется несколько десятков [7]. В связи с этим используют уравнения, составленные на основе определенного ряда предположений, которые заменяют реальную машину идеализированной. Применяются следующие допущения:

1. Поскольку в исследуемом двигателе предлагается применять нормальные распределенные обмотки с фазными зонами $2\pi/3$, выполненные с соответствующими сокращениями шагов, и хорошо известно, что в этом случае пространственные высшие гармонические МДС, потоки и индукции достигают малых значений и практически не оказывают влияние на работу машины, данное обстоятельство позволяет принять в теоретических расчетах допущение, что МДС, потоки, индукции распределены в пространстве по законам косинуса или синуса.

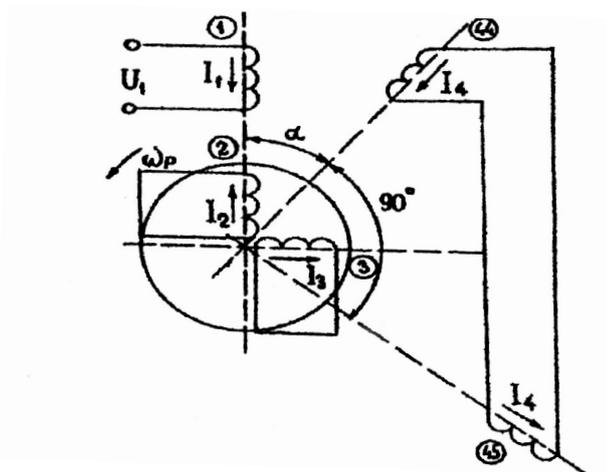
2. Известно, что современные питающие сети отличаются весьма высоким *клирфактором*. Это позволяет сделать допущение, что ЭДС, напряжения, токи и потоки изменяются во времени по синусоидальным (косинусоидальным) законам.

3. Известно, что в подавляющем большинстве случаев питающая сеть в сотни раз по мощности превосходит мощность отдельного электродвигателя. Поэтому можно считать питающую сеть обладающей бесконечно большой мощностью, т. е. полагать внутреннее сопротивление источника напряжения, равным нулю.

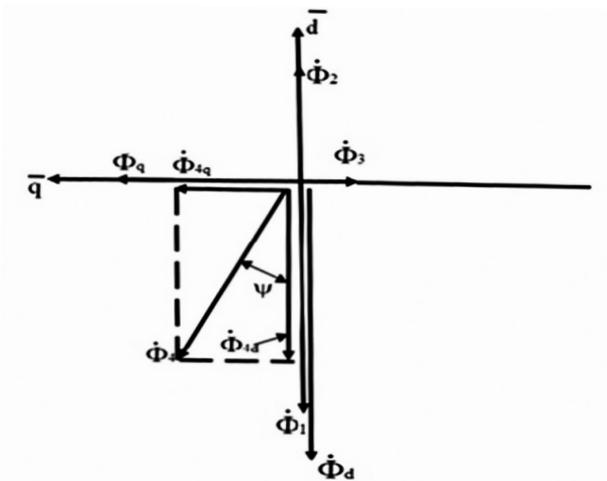
4. Асинхронные электродвигатели малой мощности часто работают в насыщенном режиме. Однако, если не пренебречь этим явлением, то нельзя пользоваться линейной зависимостью между потоками и МДС. Кроме того, в этом случае результирующий поток, создаваемый несколькими контурами, невозможно определить сложением потоков отдельных контуров. Для того чтобы было можно пренебречь насыщением, с целью его учета изменяют параметры машины (берутся «насыщенные» их значения). В пределах рассматриваемого режима работы двигателя его параметры остаются практически неизменными, что и позволяет применять *принцип наложения*.

Двигатель имеет симметричные круглые расслоенные магнитопроводы статора и ротора. В пазах ротора уложена обычная симметричная короткозамкнутая обмотка. В пазах магнитопровода статора размещены три однофазные распределенные обмотки. На рисунке *a* приведена электрическая схема рассматриваемой машины. Здесь I — однофазная распределенная обмотка возбуждения, подключаемая к сети; 44 и 45 — две однофазные распределенные обмотки, соединенные последовательно друг с другом. 2 и 3 — эквивалентные обмотки. I_1 — ток обмотки возбуждения. I_2 и I_3 — токи соответствующих эквивалентных обмоток. I_4 — ток в однофазных распределенных обмотках. Оси обмоток 44 и 45 сдвинуты относительно друг друга на 90 эл. град. Обмотка 45 имеет меньшее количество витков по сравнению с обмоткой 44 и предназначена для увеличения суммарного пространственного сдвига потоков в двигателе, обеспечивающего образование вращающегося поля. Она включается последовательно-встречно по отношению к обмотке 44 и исключает режим короткого замыкания, который может возникнуть, если ее исключить и замкнуть обмотку 44 накоротко. Короткозамкнутая обмотка ротора представлена на схеме двумя эквивалентными обмотками 2 и 3 . Направления токов указаны соответствующими стрелками.

а)



б)



Электрическая схема (а)
и диаграмма магнитных потоков электродвигателя (б)

При такой конструктивной схеме двигатель будет работать следующим образом: ток в обмотке возбуждения I создает пульсирующее во времени магнитное поле возбуждения ΦI , направленное в пространстве по продольной оси d . Это поле наводит в обмотках 2, 44 и 45 соответствующие ЭДС и так как контуры указанных обмоток замкнуты, в них протекают, соответственно, токи I_2 и I_4 . Ток I_4 создает в обмотках 44 и 45 МДС F_{44} и F_{45} , которые, складываясь в пространстве, образуют результирующую МДС с осью, смещенной на некоторый угол относительно оси обмотки I . Результирующая МДС, как показано на рисунке б, создает магнитный поток Φ_4 , имеющий продольную Φ_{4d} и поперечную Φ_{4q} составляющие. Продольная составляющая Φ_{4d} , складываясь с потоком Φ_1 и потоком обмотки 2 — Φ_2 , образует общий продольный поток двигателя Φ_d . Поперечная составляющая наводит в обмотке 3 соответствующую ЭДС, под действием которой течет ток I . Поперечный поток статора, складываясь с потоком обмотки 3 — Φ_3 , образует поперечный поток машины Φ_q . Токи I_1 и I_4 сдвинуты относительно друг друга по фазе во времени, так как между обмотками контуров этих токов имеются трансформаторные связи. Таким образом, при неподвижном роторе в двигателе имеются два потока, сдвинутые относительно друг друга как в пространстве, так и во времени, что приводит к образованию вращающегося поля. Взаимодействие вращающегося поля с токами обмотки ротора обеспечивает создание некоторого пускового момента, под влиянием которого ротор начнет вращаться.

Для составления уравнений равновесия напряжений выбираем условные положительные направления таков в соответствии с рисунком *a* (там же точками обозначены начала обмоток). Ориентация потоков показана на рисунке *б*. За положительное направление отсчета углов принимаем направление по ходу стрелки часов, а за положительное направление вращения ротора — направление против хода стрелки часов. Основой для составления уравнений ОАД является общеизвестное уравнение ЭДС для контура, движущегося в переменном внешнем магнитном поле, согласно которому приложенное к контуру напряжение равно падению напряжения в активном сопротивлении сумме противо-ЭДС, трансформации и ЭДС вращения. В исследуемом ОАД, в соответствии с теорией двух реакций, можно выделить четыре контура: обмотки возбуждения, обмотки ротора 2, обмотки ротора 3 и контур, соединенных последовательно-встречно, дополнительных обмоток.

Результаты (Results)

В соответствии с принципом суперпозиции поперечные составляющие магнитных потоков дополнительных обмоток складываются, а продольные — вычитаются [8]:

$$\begin{aligned}\Phi_q &= \Phi_{44q} + \Phi_{45q}; \\ \Phi_d &= \Phi_{44d} + \Phi_{45d}.\end{aligned}\tag{1}$$

С учетом (1) уравнения равновесия напряжении контуров двигателя для установившегося режима работы запишутся в общем виде следующим образом:

$$\begin{aligned}j\omega\Psi_d + (r_1 + jx_1)I_1 &= U_1; \\ j\omega\Psi_d - v\omega\Psi_d + (r'_2 + jx'_2)I'_2 &= 0; \\ j\omega\Psi_d - v\omega\Psi_d + (r'_3 + jx'_3)I'_3 &= 0; \\ j\omega\Psi_d (\cos \alpha - \sin \alpha) + j\omega\Psi_d (\cos \alpha - \sin \alpha) + \\ + \left(\frac{r_{44} + jx'_{44}}{k_{44}} + \frac{r'_{45} + jx'_{45}}{k_{45}} \right) I_4 &= 0.\end{aligned}\tag{2}$$

Как правило, при расчете потерь при несинусоидальном напряжении питания рассматривается разложение потерь на составляющие. [9] Учет потерь в стали и падения напряжения в намагничивающем контуре не только главным индуктивным сопротивлением x_0 , но и на активном сопротивлении r_0 [10] приводит к следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned}j\omega\Psi_d &= (r_0 + jx_0) \left[I_1 + I'_2 + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{r_{44}} + \frac{\sin \alpha}{r_{45}} \right) \right]; \\ j\omega\Psi_d &= (r_0 + jx_0) \left[I'_3 + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{r_{44}} + \frac{\sin \alpha}{r_{45}} \right) \right];\end{aligned}\tag{3}$$

Тогда система уравнений (2) с учетом (3) примет вид:

$$\begin{aligned}(r_0 + jx_0) \left[I_1 + I'_2 + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} - \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] + (r_1 + jx_1)I_1 &= U_1; \\ (r_0 + jx_0) \left[I_1 + I'_2 + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} - \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] - \\ - v(r_0 + jx_0) \left[I'_3 + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} + \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] + (r'_2 + x'_2)I'_2 &= 0;\end{aligned}\tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 & (r_0 + jx_0) \left[I_3' + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{45}} + \frac{\sin \alpha}{k_{44}} \right) \right] + \\
 & + v(r_0 + jx_0) \left[I_1 + I_2' + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} - \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] + (r_3' + jx_3') I_3' = 0; \\
 & (r_0 + jx_0)(\cos \alpha - \sin \alpha) \left[I_1 + I_2' + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} - \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] + \\
 & + (r_0 + jx_0)(\cos \alpha + \sin \alpha) \left[I_3' + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} + \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] + \\
 & + I_4 \left(\frac{r_{44}' + jx_{44}'}{k_{44}} + \frac{r_{45}' + jx_{45}'}{k_{45}} \right) = 0.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Раскрытие квадратных скобок и преобразования приводят к окончательному виду уравнений равновесия напряжений контуров:

$$\begin{aligned}
 & [(r_1 + r_0) + j(x_0 + x_1)] I_1 + (r_0 + jx_0) I_2' + (r_0 + jx_0) \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} - \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) I_4 = U_1; \\
 & (r_0 + jx_0) I_1 + [(r_2' + r_0) + j(x_0 + x_0')] I_2' - v(r_0 + jx_0) I_3' + \\
 & + \left[(r_0 + jx_0) \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} + \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) - v(r_0 - jx_0) \left(\frac{\cos \alpha}{k_{45}} + \frac{\sin \alpha}{k_{44}} \right) \right] I_4 = 0; \\
 & v(r_0 + jx_0) I_1 + v(r_0 + jx_0) I_2' + [(r_3' + r_0) + j(r_3' + r_0)] I_3' + \\
 & + \left[(r_0 + jx_0) \left(\frac{\cos \alpha}{k_{45}} + \frac{\sin \alpha}{k_{44}} \right) + v(r_0 + jx_0) \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} - \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] I_4 = 0; \\
 & [(r_0 + jx_0)(\cos \alpha - \sin \alpha)] I_1 + [(r_0 + jx_0)(\cos \alpha - \sin \alpha)] I_2' + \\
 & + [(r_0 + jx_0)(\cos \alpha - \sin \alpha)] I_3' + \\
 & + \left[\frac{(r_{44}' + r_0) + (x_{44}' + x_0)}{k_{45}} + \frac{(r_{45}' + r_0) + j(x_{45}' + x_0)}{k_{45}} \right] I_4 = 0.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Обсуждение (Discussion)

При теоретических и расчетных исследованиях следует иметь в виду еще одно существенное обстоятельство. Дело в том, что вследствие неточностей существующих методов теплового и электрического расчетов и неизбежных погрешностей при изготовлении электрических машин окончательные характеристики и параметры, как правило, устанавливаются после изготовления и всесторонних испытаний опытных образцов. Таким образом, при проектировании малых электрических машин значимость методов расчета, особенно теплового, принятых в крупном электромашиностроении, в какой-то мере, снижается.

Как показал анализ, наиболее перспективной схемой ОАД без ВФСУ обладает двигатель, в котором реализуется принцип получения временного фазового сдвига потоков за счет трансформаторной связи между рассредоточенными обмоткой возбуждения и дополнительными обмотками, уложенными в симметричный магнитопровод статора [11].

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что ОАД без ВФЗУ является сложной электромеханической системой, для расчета которой необходимо построение корректной математической модели, учитывающей все ее параметры при всех возможных режимах работы двигателя. Довольно часто в современном математическом моделировании двигателей малых размеров помимо рассмотренных допущений, в ходе теоретических расчетов пренебрегают потерями в стали двигателя. Однако это в ряде случаев приводит к значительным погрешностям при расчете характеристик двигателя. С учетом последнего, допущение об отсутствии потерь в стали двигателя не принимается. Как показали результаты предварительных исследований ОАД, для микромашин мощностью 6–7 Вт и ниже доля потерь в стали составляет значительную величину и соизмерима с полезной мощностью. Полученные уравнения позволяют описать электромагнитные процессы в ОАД в установившемся режиме работы. Разработанная математическая модель может быть использованы при расчете и проектировании комплексных систем автоматического управления судном.

Выводы (Conclusion)

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Расчетным способом получена система уравнений (5), которая описывает электромагнитные процессы в ОАД без ВФЗУ в установившемся режиме. При необходимости данная математическая модель может быть использована также для расчета электромеханических переходных процессов.
2. Разработанная математическая модель включает в расчет при математическом моделировании потери в стали и падения напряжения в намагничивающем контуре не только в главном индуктивном сопротивлении x_0 , но и на активном сопротивлении r_0 . Этим зачастую пренебрегают при выполнении теоретического расчета маломощных ОАД без ВФЗУ, в результате чего уменьшается погрешность при расчетах.
3. ОАД без ВФЗУ является наиболее оптимальным электродвигателем для систем судовой автоматики ввиду отсутствия в ее составе дополнительного инерционного звена — конденсатора для фазового сдвига.
4. На основе анализа сделан вывод об оптимальности достижения фазового сдвига в рассматриваемом двигателе за счет трансформаторной связи между рассредоточенной обмоткой возбуждения и дополнительными обмотками, уложенными в симметричный магнитопровод статора, а, соответственно, и о необходимости ухода от использования конденсаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каракаев А. Б.* Разработка и применение однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматики / А. Б. Каракаев, А. В. Костенко // Сборник тезисов национальной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — СПб.: Издательство ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — С. 91–92.
2. *Каракаев А. Б.* Применение специального асинхронного электродвигателя для судовых вентиляционных систем / А. Б. Каракаев, Е. С. Хохлов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 208–214. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-208-214.
3. *Malyar V.* Mathematical model of single-phase induction motors with auxiliary winding resistance / V. Malyar, A. Malyar // Przegląd Elektrotechniczny. — 2018. — Vol. 94. — Pp. 33–37. DOI: 10.15199/48.2018.12.08.
4. *Alshamasin M. S.* Optimization of the Performance of Single -Phase Capacitor-Run Motor / M. S. Alshamasin // American Journal of Applied Sciences. — 2009. — Vol. 6. — Is. 4. — Pp. 745–751. DOI: 10.3844/ajassp.2009.745.751.

5. Друбецкий А. Е. Аппроксимация универсальной магнитной характеристики для моделирования тяговых электрических машин / А. Е. Друбецкий // Наука и прогресс транспорта. — 2017. — № 1 (67). — С. 106–116. DOI: 10.15802/stp2017/94031.

6. Баранов М. В. Разработка математической модели высокомоментного синхронного двигателя при проектировании прецизионных приводов / М. В. Баранов, О. А. Корчагин // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2013. — № 8 (20). — С. 23.

7. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. — М.: Высшая школа, 2001. — С. 233.

8. Каракаев А. Б. Учет потерь в стали при расчете характеристик однофазного асинхронного двигателя без фазосдвигающих устройств / А. Б. Каракаев // В сб.: Электромеханические преобразователи и устройства. Деп. в Информэлектро № 300 ЭТ-Д83 Деп. реф., опубли. в указателе ВИНТИ «Депонированные научные работы». — 1984. — № 2. — С. 156.

9. Батоврин А. А. Электромагнитный момент однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств / А. А. Батоврин, А. Б. Каракаев // Электромеханические преобразователи и устройства: сб. науч. тр. — 1985. — № 5. — С. 156.

10. Казаков Ю. Б. Расчетный анализ потерь в стали асинхронных двигателей при питании от преобразователей частоты с несинусоидальным выходным напряжением / Ю. Б. Казаков, Н. К. Швецов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2015. — № 5. — С. 42–46. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.042-046.

11. Пат. 2680372 Российская Федерация, МПК H02J 1/00. Способ получения фазового сдвига напряжений генераторов и устройство использования фазового сдвига для преобразования механической энергии в эллипсоидное излучение / Г. Л. Багич; заяв. и патентообл. Г. Л. Багич (RU). — № 2017139643; Заявлено 14.11.2017; Опубли. 20.02.2019, Бюл. № 5.

REFERENCES

1. Karakaev, A. B., and A. V. Kostenko. “Razrabotka i primeneniye odnofaznogo asinkhronnogo dvigatelya bez vneshnikh fazosdvigayushchikh ustroystv dlya sudovykh sistem avtomatiki.” *Sbornik tezisov natsional’noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel’skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova»*. SPb.: Izdatel’stvo GUMRF im. S.O. Makarova, 2018. 91–92.

2. Karakaev, A. B., and E. S. Khokhlov. “Application of special design asynchronous electric motor for the ship ventilation system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 208–214. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-208-214.

3. Malyar, Vasyl, and Andriy Malyar. “Mathematical model of single-phase induction motors with auxiliary winding resistance.” *Przeglad Elektrotechniczny* 94 (2018): 33–37. DOI: 10.15199/48.2018.12.08.

4. Alshamasin, Mahdi Salman. “Optimization of the Performance of Single -Phase Capacitor-Run Motor.” *American Journal of Applied Sciences* 6.4 (2009): 745–751. DOI: 10.3844/ajassp.2009.745.751.

5. Drubetskiy, A. Yu. “Approximation of universal magnetic characteristic for modelling electric traction machines.” *Nauka i progress transporta* 1(67) (2017): 106–116. DOI: 10.15802/stp2017/94031.

6. Baranov, M. V., and O. A. Korchagin. “High torque synchronous motor mathematical model development under the design of precision drives.” *Engineering Journal: Science and Innovation* 8(20) (2013): 23.

7. Kopylov, I. P. *Matematicheskoe modelirovaniye elektricheskikh mashin*. M.: Vysshaya shkola, 2001.

8. Karakaev, A. B. “Uchet poter’ v stali pri raschete kharakteristik odnofaznogo asinkhronnogo dvigatelya bez fazosdvigayushchikh ustroystv.” *Elektromekhanicheskie preobrazovateli i ustroystva* 2 (1984): 156.

9. Batovrin, A. A., and A. B. Karakaev. “Elektromagnitnyi moment odnofaznogo asinkhronnogo dvigatelya bez vneshnikh fazosdvigayushchikh ustroystv.” *Elektromekhanicheskie preobrazovateli i ustroystva* 5 (1985): 156.

10. Kazakov, Yu. B., and N. K. Shvetsov. “Calculating analysis of steel losses in induction motors fed by frequency converters with non-sinusoidal output voltage.” *Vestnik IGEU* 5 (2015): 42–46. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.042-046.

11. Bagich, G. L. RU 2 680 372 C1, IPC H 02 J 1/00. Sposob polucheniya fazovogo sdviga napryazhenii generatorov i ustroystvo ispol’zovaniya fazovogo sdviga dlya preobrazovaniya mekhanicheskoi energii v ellipsoidnoye izlucheniye. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Feb. 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каракаев Александр Бахтыреевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: Aleksandr.Karakaev@list.ru,
kaf_ose@gumrf.ru

Костенко Александр Васильевич — аспирант
Научный руководитель:
Каракаев Александр Бахтыреевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: svarshikrylit@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Karakaev, Aleksandr B. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: Aleksandr.Karakaev@list.ru,
kaf_ose@gumrf.ru

Kostenko, Aleksandr V. — Postgraduate
Supervisor:
Karakaev, Aleksandr B.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: svarshikrylit@gmail.com

Статья поступила в редакцию 28 мая 2019 г.

Received: May 28, 2019.