

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ МНОГОФАЗНОЙ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д. А. Хнычев, В. В. Магин, М. Б. Панасюк

Представлен метод определения параметров схем замещения многофазных асинхронных двигателей, основанный на комплексном использовании конечно-элементного моделирования. Подробно описаны этапы численного моделирования ключевых экспериментов: опыта нагрузки, опыта с вынутым ротором, опыта холостого хода и опыта короткого замыкания. Разработанный метод позволяет определить параметры эквивалентной Т-образной схемы замещения, включая активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора, а также параметры ветви намагничивания. Для верификации предложенного подхода проведено сравнение результатов конечно-элементного моделирования с аналитическими расчетами, выполненными в специализированном программном обеспечении. Также составлена математическая модель Т-образной схемы замещения, позволяющая выполнить сравнительный анализ токов, полученных методами численного и математического моделирования. Экспериментальные исследования шестифазного асинхронного двигателя в режиме холостого хода демонстрируют высокую степень соответствия с результатами моделирования, что свидетельствует о корректности разработанной численной модели.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, многофазная машина, шестифазная машина, схема замещения, параметры, численное моделирование, метод конечных элементов.

Введение

Разработка многофазных частотно-регулируемых приводов началась в конце 1960-х годов. Основное внимание было сосредоточено на создании пяти- и шестифазных регулируемых приводов, питаемых как от инверторов тока, так и от инверторов напряжения. Во второй половине 1990-х годов наблюдался резкий рост интереса к исследованиям в этой области, связанный с разработкой электроприводов для судостроительной отрасли, где до сих пор активно используются многофазные системы [1, 2]. Многофазные электрические машины также нашли свое применение в авиационной технике и электромобилях [3 – 7].

Популярность многофазных машин объясняется рядом преимуществ перед традиционными трехфазными машинами. Увеличение количества фаз снижает токовые нагрузки на каждую фазу и уменьшает пульсации электромагнитного момента. Кроме того, повышается общая надежность системы, поскольку при обрыве одной или нескольких фаз машина сохраняет работоспособность, хотя и с пониженной мощностью. Отказоустойчивость многофазных машин является ключевым требованием во многих отраслях промышленности, где даже кратковременные остановки могут повлечь значительные экономические потери и нарушения производственного процесса. Однако среди недостатков многофазных машин можно выделить усложненную конструкцию и увеличение числа выводов обмоток статора, что увеличивает сложности производства и монтажа.

В последние годы распространение многофазных машин в современных системах электропривода сделало актуальной задачу точного определе-

ния параметров их схем замещения (СЗ). В работе [8] предложен алгоритм определения параметров СЗ многофазных асинхронных машин, примененный для шестифазного асинхронного двигателя (АД) малой мощности. Моделирование экспериментов холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) проводилось с помощью специализированного программного обеспечения (ПО) для электромагнитных расчетов. Результаты в виде нелинейных характеристик легли в основу нелинейной модели двигателя на базе Т-образной схемы замещения. Полученные данные в виде нелинейных характеристик являются основой для нелинейной модели АД на базе Т-образной схемы замещения. В другой работе [9] описан метод оценки параметров СЗ на основе моделифицированных стандартных испытаний для асимметричной шестифазной асинхронной машины. Параметры СЗ определяются через стандартные испытания ХХ и КЗ, а также тест нулевой последовательности. Еще один подход – использование метода конечных элементов для быстрого и систематического определения параметров эквивалентной СЗ шестифазного асинхронного двигателя [10], предполагающий выполнение трех основных экспериментов: опыта с вынутым ротором, опыта ХХ и опыта с вынутым статором.

Параметры схемы замещения АД необходимы для точной настройки систем управления двигателем, а также для математического моделирования переходных процессов. Однако производители зачастую не указывают полные данные этих параметров в технической документации, поэтому определение этих параметров является важной и актуальной задачей при разработке современных частотно-регулируемых приводов.

Целью данной работы является разработка метода определения параметров СЗ многофазного АД с короткозамкнутым ротором посредством применения конечно-элементного моделирования.

В рамках исследования были проведены следующие эксперименты: опыт нагрузки, опыт с вынутым ротором, опыт реального ХХ и опыт КЗ.

Кроме того, проведен сравнительный анализ параметров схемы замещения, полученных численным моделированием и аналитически с использованием методики [11], что подтверждает достоверность предложенного метода.

Конечно-элементное моделирование

Исследования проводились в программном комплексе конечно-элементного динамического моделирования электромагнитных полей.

Объектом исследования являлся асинхронный двигатель 5А180М8, переделанный из трехфазного исполнения в шестифазное с изменением числа полюсов ($2p = 10$). В двигателе применены две независимые трехфазные обмотки, сдвинутые на 30 электрических градусов, соединенные в «звезду».

С целью уменьшения времени расчетов область моделирования ограничивалась периодом симметрии обмотки. Двухмерная модель рассматриваемого электродвигателя представлена на рис. 1.

Основные параметры исследованного электродвигателя сведены в табл. 1.

Активное сопротивление обмотки статора приведено к рабочей температуре, поскольку этот параметр необходим для корректного проведения моделирования. Исследование проведено при нагретом состоянии двигателя, то есть при рабочей температуре обмоток статора и ротора.

Шестифазный источник питания двигателя реализован в симуляторе внешних электрических цепей, интегрированным с программой динамического моделирования электромагнитных полей (рис. 2). Данная электрическая схема содержит источник переменного напряжения U , сопротивление фазы обмотки статора R и индуктивность лобовых частей обмотки статора $L_{\text{лоб}}$. Фазовый сдвиг между одноименными фазами составляет 30 электрических градусов (рис. 3).

В работе использовалась Т-образная схема замещения асинхронной машины, в которой активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания включены последовательно (рис. 4).

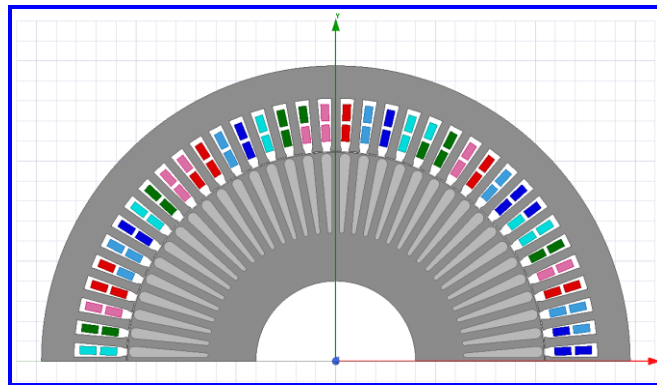


Рис. 1. Двухмерная модель асинхронного двигателя

Таблица 1

Основные параметры электродвигателя

Параметры	Значения
Номинальная мощность P_2 , кВт	15
Число фаз m	6
Номинальное фазное напряжение U_{ϕ} , В	85
Частота сети f , Гц	100
Число полюсов $2p$	10
Число пазов статора Z_1	72
Число пазов ротора Z_2	68
Количество параллельных ветвей a	1
Количество эффективных проводников в пазу $u_{\text{п}}$	6
Число витков фазы w_1	36
Активное сопротивление обмотки статора R_1 при температуре 20°C, Ом	0,077
Индуктивность лобовых частей обмотки статора $L_{\text{лоб}}$, мкГн	40

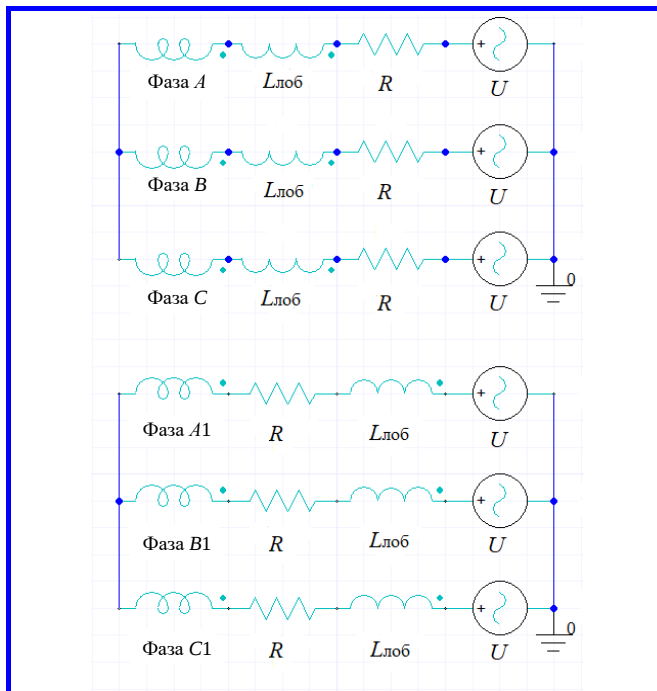


Рис. 2. Электрическая схема соединений обмотки статора

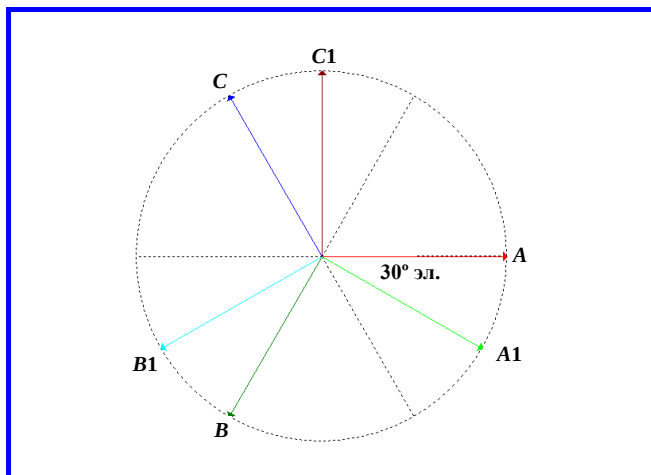


Рис. 3. Схема соединения обмотки статора

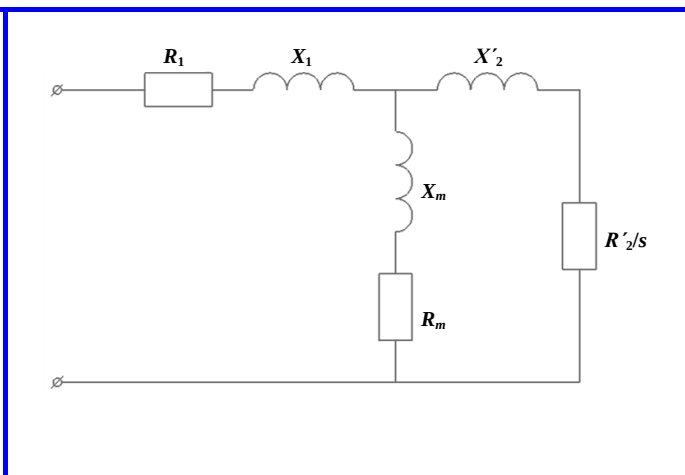


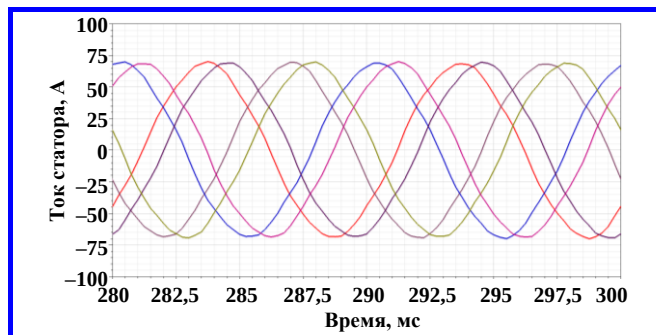
Рис. 4. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Определение параметров схемы замещения

Опыт нагрузки

Этот опыт проводится при номинальной нагрузке, номинальных значениях напряжения и частоты питания для определения номинального значения тока статора.

Полученное значение номинального тока статора $I_1 = 48,4$ А. На рис. 5 показан график тока статора при номинальной нагрузке.

Рис. 5. Ток статора I_1

Опыт с вынутым ротором

Этот опыт проводится при токе, соответствующем номинальному значению или близком к нему, и при номинальной частоте питания. Модель ротора заменяется расчетной областью (рис. 6). Целью является определение индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора.

Результаты моделирования представлены в табл. 2 и включают необходимые параметры для дальнейших расчетов.

Таблица 2

Параметры из опыта с вынутым ротором

Параметры	Значения
Напряжение U , В	17,5
Ток I , А	48,4

Для нахождения индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора необходимо определить среднюю магнитную энергию фазы обмотки статора W_1 в момент времени, когда амплитуда тока в одной из фаз максимальная.

Картина распределения плотности магнитной энергии w_{m1} в обмотке статора изображена на рис. 7.

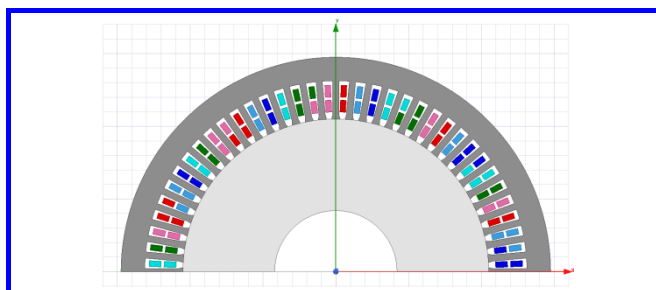
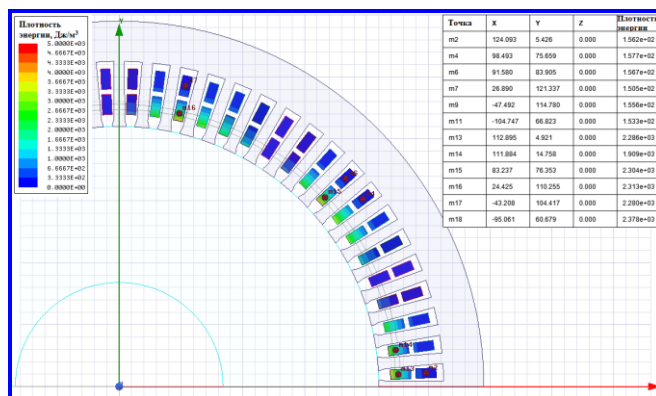


Рис. 6. Расчетная модель асинхронного двигателя для опыта с вынутым ротором

Рис. 7. Распределение плотности магнитной энергии w_{m1} в обмотке статора

Средняя плотность магнитной энергии фазы обмотки статора, Дж/м³:

$$w_{M1} = 0,75 \frac{\sum w_{\text{нижн.кат}}}{N_{\text{нижн.кат}}} + 0,25 \frac{\sum w_{\text{верх.кат}}}{N_{\text{верх.кат}}}, \quad (1)$$

где $w_{\text{нижн.кат}}$ – плотность магнитной энергии нижней части катушки, Дж/м³; $N_{\text{нижн.кат}}$ – количество нижних частей катушки фазы; $w_{\text{верх.кат}}$ – плотность магнитной энергии верхней части катушки, Дж/м³; $N_{\text{верх.кат}}$ – количество верхних частей катушки фазы.

Верхней частью катушки считается часть, расположенная на дне паза, а нижней – ближе к зазору.

Средняя магнитная энергия фазы обмотки статора, Дж:

$$W_1 = w_{M1} N_{\text{кат}} S_{\text{кат}} l_{\text{полувитка}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{кат}}$ – общее количество частей катушек всей фазы; $S_{\text{кат}}$ – площадь одной части катушки фазы, м²; $l_{\text{полувитка}}$ – длина полувитка, м.

Индуктивность фазы статора, Гн:

$$L_1 = \frac{2W_1}{I^2}. \quad (3)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом:

$$X_1 = 2\pi f L_1. \quad (4)$$

Опыт холостого хода

Опыт ХХ проводится без нагрузки с учетом механических потерь при номинальных значениях напряжения и частоты питания. Данные, полученные в этом опыте, позволяют определить активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания.

Результаты моделирования опыта ХХ, используемые в дальнейших расчетах, приведены в табл. 3.

График тока ХХ приведен на рис. 8.

Таблица 3

Параметры из опыта холостого хода

Параметры	Значения
Ток холостого хода I_0 , А	25,74
Потери в стали $P_{\text{ст}}$, Вт	302,5
Механические потери $P_{\text{мех}}$, Вт	100
Потокосцепление фазы Ψ , Вб	0,134

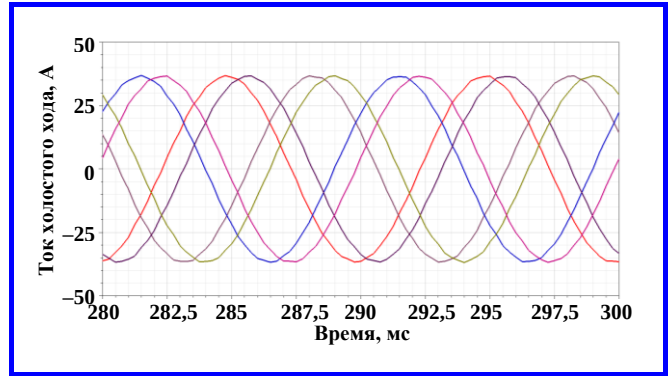


Рис. 8. Ток холостого хода I_0

Определение активного сопротивления ветви намагничивания осуществляется с использованием формул (5) – (11) в соответствии с методикой, изложенной в [12].

Потери в меди статора, Вт:

$$P_{M10} = m I_0^2 R_1. \quad (5)$$

Потери ХХ, Вт:

$$P_0 = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{M10}. \quad (6)$$

Коэффициент мощности на ХХ:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{m U_{\Phi} I_0}; \quad (7)$$

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0}. \quad (8)$$

Намагничивающий ток, А:

$$I_m = I_0 \sin \varphi_0; \quad (9)$$

$$Z_0 = \frac{U_{\Phi}}{I_m}. \quad (10)$$

Активное сопротивление ветви намагничивания, Ом:

$$R_m = \frac{P_{\text{ст}}}{m I_m^2}. \quad (11)$$

Индуктивность ветви намагничивания, Гн:

$$L_m = \frac{\Psi}{I_m} - L_1. \quad (12)$$

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом:

$$X_m = 2\pi f L_m. \quad (13)$$

Также индуктивное сопротивление ветви намагничивания можно рассчитать по формуле (14), согласно [13]:

$$X_m = \frac{U}{I_m} - X_1. \quad (14)$$

Опыт короткого замыкания

Опыт КЗ проводится с заторможенным ротором при пониженном напряжении, номинальном токе и частоте питания. В ходе этого опыта определяются приведенные активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора.

В табл. 4 представлены параметры, полученные при моделировании опыта КЗ, которые требуются для последующих вычислений.

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора рассчитывается по формулам (15) – (22). Для этого используются эквивалентные активное сопротивление и индуктивность [10] (рис. 9).

Таблица 4

Параметры из опыта короткого замыкания

Параметры	Значения
Напряжение короткого замыкания U_k , В	27,6
Ток короткого замыкания I_k , А	48,4
Ток ротора I_2 , А	277,8
Электрические потери в роторе P_p , Вт	779,4
Средняя индукция в зазоре B_δ , Тл	0,0655

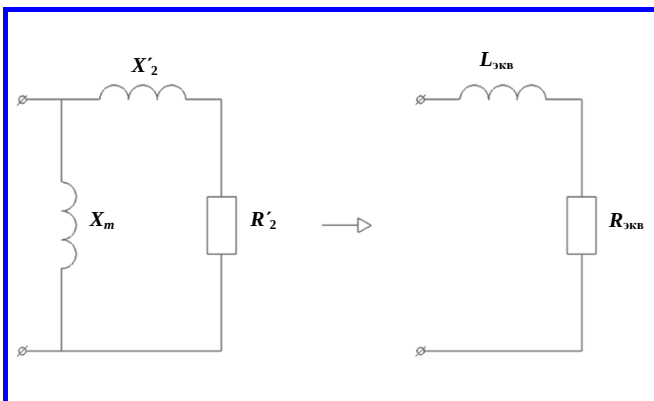


Рис. 9. Преобразования схемы замещения для опыта короткого замыкания

Эквивалентное активное сопротивление [10], Ом:

$$R_{\text{экв}} = \frac{P_p}{m I_k^2}. \quad (15)$$

Напряженность магнитного поля, А/м:

$$H = \frac{B_\delta}{\mu_0}, \quad (16)$$

где B_δ – средняя индукция в зазоре в момент времени, когда амплитуда тока в одной из фаз максимальна, Тл; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Плотность энергии в зазоре, Дж/м³:

$$w_3 = \frac{\mu_0 H^2}{2}. \quad (17)$$

Площадь воздушного зазора, м²:

$$S_3 = \pi (R_{\text{внутр.1}}^2 - R_{\text{внеш.2}}^2), \quad (18)$$

где $R_{\text{внутр.1}}$ – внутренний радиус статора, м; $R_{\text{внеш.2}}$ – внешний радиус ротора, м.

Объем воздушного зазора, м³:

$$V_3 = S_3 l, \quad (19)$$

где l – длина магнитопровода, м.

Эквивалентная индуктивность [10], Гн:

$$L_{\text{экв}} = \frac{2w_3 V_3}{m I_k^2}. \quad (20)$$

Угловая частота ротора, рад/с:

$$\omega_p = 2\pi f s, \quad (21)$$

где $s = 1$ – скольжение при КЗ.

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора [10], Ом:

$$R'_2 = 0,5 \frac{I_m^2 R_{\text{экв}}}{\left(\frac{R_{\text{экв}}}{\omega_p}\right)^2 + (L_m - L_{\text{экв}})^2}. \quad (22)$$

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора определено с учетом эффекта вытеснения тока в стержнях беличьей клетки (рис. 10).

Аналитически приведенное активное сопротивление обмотки ротора можно определить по методике [14] (23) – (26).

Активное сопротивление стержня, Ом:

$$R_b = \rho_2 \frac{l_b}{A_b}, \quad (23)$$

где ρ_2 – удельное электрическое сопротивление материала стержня, Ом·м; l_b – длина стержня, м; A_b – площадь поперечного сечения стержня, м².

Активное сопротивление короткозамкнутого кольца, Ом:

$$R_a = \rho_2 \frac{\pi D_a}{A_a}, \quad (24)$$

где D_a – средний диаметр короткозамкнутого кольца, м; A_a – площадь поперечного сечения короткозамкнутого кольца, м².

Активное сопротивление обмотки ротора, Ом:

$$R_2 = R_b + \left(\frac{2R_a}{4Z_2 \sin^2\left(\frac{p\beta_r}{2}\right)} \right), \quad (25)$$

где p – число пар полюсов; β_r – угол между двумя соседними стержнями, градусов.

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора, Ом:

$$R'_2 = R_2 \gamma_{12}, \quad (26)$$

где $\gamma_{12} = \frac{m}{z_2} (w_1 k_{06})^2$ – коэффициент приведения

параметров ротора к статору; w_1 – число витков фазы статора; k_{06} – обмоточный коэффициент.

Приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора многополюсной машины ($2p \geq 6$) вычисляется приведенным ниже способом с использованием формул (27) – (30).

Объем беличьей клетки, м³:

$$V_{б.к} = 2\pi \left(R_{кз.внеш}^2 - R_{кз.внутр}^2 \right) b_{кз} + S_2 Z_2 l_2, \quad (27)$$

где $R_{кз.внеш}$ – внешний радиус короткозамкнутого кольца, м; $R_{кз.внутр}$ – внутренний радиус короткозамкнутого кольца, м; $b_{кз}$ – ширина короткозамкнутого кольца, м; S_2 – площадь паза ротора, м²; l_2 – длина стержня, м.

Для определения индуктивного сопротивления рассеяния обмотки ротора необходимо определить

среднюю магнитную энергию обмотки ротора W_2 в момент времени, когда амплитуда тока в одной из фаз статора максимальная.

Распределение плотности магнитной энергии $w_{м2}$ в обмотке ротора показано на рис. 11.

Паз ротора делится на три равные части, и измерительная линия проходит посередине верхней трети паза (фиолетовая линия на рис. 11).

На каждом полюсе берется максимальное значение плотности магнитной энергии, полученной вдоль измерительной линии (рис. 12).

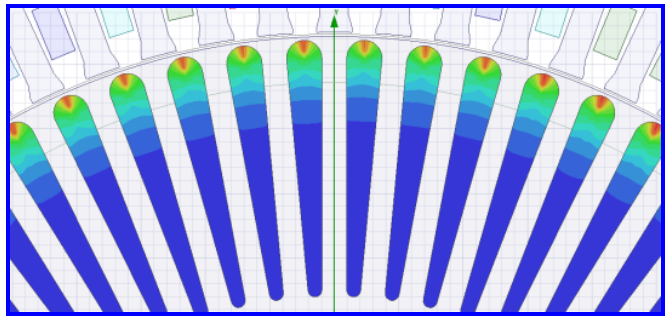


Рис. 10. Вытеснение тока в стержнях беличьей клетки

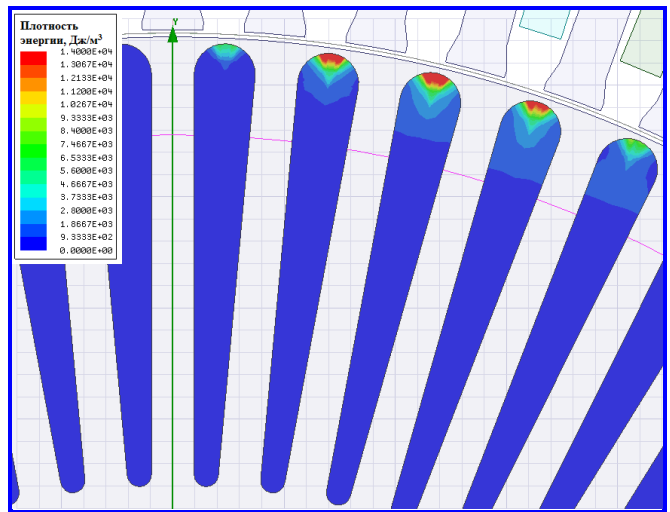


Рис. 11. Распределение плотности магнитной энергии $w_{м2}$ в обмотке ротора

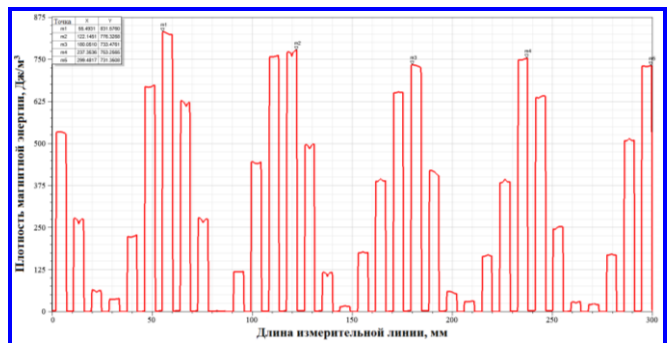


Рис. 12. Распределение плотности магнитной энергии $w_{м2}$ в обмотке ротора вдоль измерительной линии

Средняя магнитная энергия обмотки ротора определяется как сумма максимальных плотностей магнитной энергии обмотки ротора на всех полюсах, Дж:

$$W_2 = \sum_{i=1}^{2p} w_{M2i} V_{6,к}. \quad (28)$$

Индуктивность ротора, Гн:

$$L_2 = \frac{2W_2}{I_2^2}, \quad (29)$$

где I_2 – ток ротора в режиме КЗ, А.

Приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора, Ом:

$$X'_2 = 2\pi f L_2. \quad (30)$$

Приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора для машин с малым количеством полюсов ($2p \leq 4$) определяется согласно методу, изложенному в [15].

Для начала рассчитывается полное сопротивление фазы в режиме КЗ, Ом:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}. \quad (31)$$

Затем выполняются преобразования СЗ для опыта КЗ, как показано на рис. 13. Выполнена замена активных и индуктивных сопротивлений на полные сопротивления. Суммарное полное сопротивление ветви намагничивания и ротора Z_{m-r} определяется как параллельное соединение полного сопротивления ветви намагничивания Z_m и полного сопротивления ротора Z_2 . Следовательно, зная полное сопротивление фазы в режиме КЗ Z_k и полное сопротивление фазы статора Z_1 , можно определить суммарное полное сопротивление ветви намагничивания и ротора.

Полное сопротивление фазы статора, Ом:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1'^2}. \quad (32)$$

Суммарное полное сопротивление ветви намагничивания и ротора, Ом:

$$Z_{m-r} = Z_k - Z_1; \quad (33)$$

$$Z_{m-r} = \frac{Z_m Z_2}{Z_m + Z_2}. \quad (34)$$

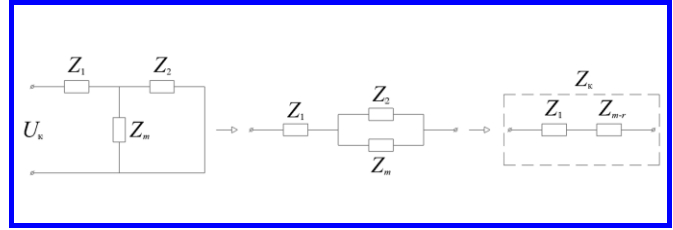


Рис. 13. Преобразования схемы замещения для опыта короткого замыкания

Из формулы (34) выражаем полное сопротивление ротора, Ом:

$$Z_2 = \frac{Z_{m-r} Z_m}{Z_m - Z_{m-r}}. \quad (35)$$

Приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора, Ом:

$$X'_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2'^2}. \quad (36)$$

Верификация параметров схемы замещения шестифазного асинхронного двигателя

Для верификации разработанного метода расчета параметров СЗ шестифазного АД была составлена математическая модель Т-образной схемы замещения (см. рис. 4). Параметры СЗ рассчитаны предложенным выше методом. Моделирование проводилось для двух режимов работы двигателя: опыта КЗ и опыта ХХ.

В табл. 5 приведены сравнительные данные токов, полученных при численном и математическом моделировании.

Результаты демонстрируют высокую сходимость между численным и математическим моделированием, что подтверждает работоспособность предложенного метода расчета параметров схемы замещения.

Таблица 5

Результаты численного и математического моделирования

Параметры	Численное моделирование	Математическое моделирование	Погрешность, %
Ток короткого замыкания I_k , А	48,4	49,5	2,27
Ток холостого хода I_0 , А	25,74	25,83	0,35

Результаты моделирования и расчетов

Также выполнен аналитический расчет параметров СЗ с использованием специализированного ПО.

На рис. 14 представлен общий вид шестифазного АД в радиальном (а) и аксиальном (б) направлениях, полученный на основе ввода геометрических параметров магнитной системы.

Для анализа электромагнитных процессов использовалась Т-образная схема замещения, приведенная на рис. 15.

В соответствии с разработанным методом были определены параметры СЗ асинхронных двигателей различной мощности. Результаты моделирования и последующих расчетов сравнивались с данными, полученными аналитически с использованием ПО, что позволило оценить точность предложенного подхода.

Для корректного сопоставления результатов учтено различие в схемах замещения: поскольку в двух методах используются разные схемы (см. рис. 4 и 15), параметры ветви ротора и индуктивное сопротивление ветви намагничивания в схеме на рис. 15 были увеличены в два раза [9, 10].

В табл. 6 приведены рассчитанные параметры СЗ шестифазного АД, полученные предложенным методом и аналитическим расчетом в ПО. Оценка точности расчетов для другого шестифазного двигателя представлена в табл. 7 в виде значений погрешностей.

Анализ результатов показывает, что расхождения между расчетами по предложенному методу и аналитически в ПО, за исключением параметров ротора, не превышают 9,27%. Высокая погрешность (до 17,57%) в определении параметров ротора связана с влиянием эффекта вытеснения тока в стержнях, который достаточно сложно учесть с использованием аналитических подходов.

Экспериментальные исследования шестифазного асинхронного двигателя в режиме холостого хода

С целью проверки адекватности разработанной численной модели проведено экспериментальное исследование рассматриваемого шестифазного АД. Исследование проводилось в режиме холостого хода при пониженном напряжении ($U_{\phi} = 29$ В) и частоте питания ($f = 50$ Гц).

Экспериментальная установка состоит из шестифазного асинхронного двигателя (рис. 16), подключенного к шестифазному преобразователю частоты. Для измерения основных электрических параметров использовался осциллограф. Все данные регистрировались в цифровом виде и обрабатывались с использованием специализированного ПО.

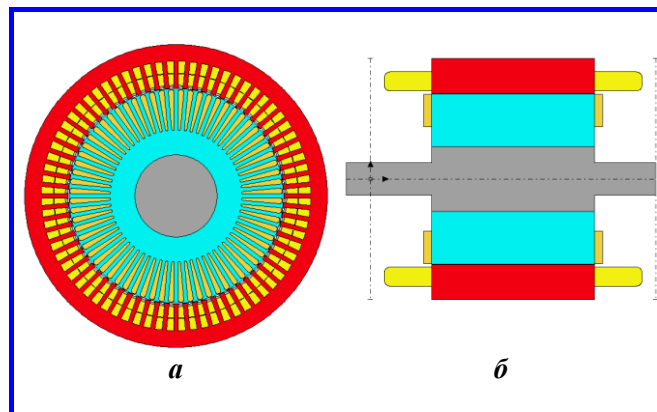


Рис. 14. Общий вид двигателя в радиальном (а) и аксиальном (б) направлениях

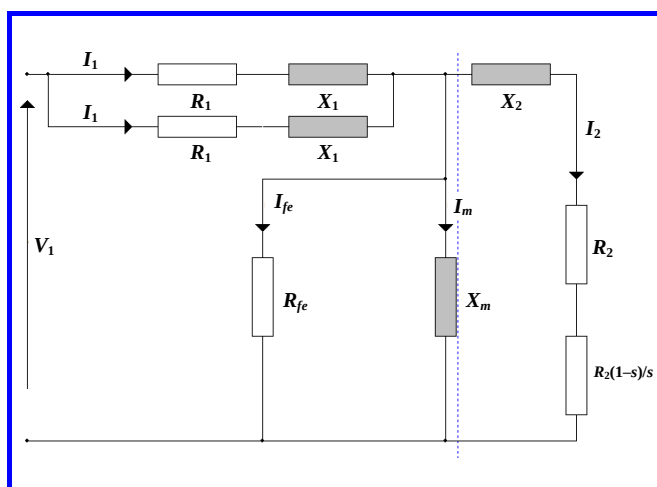


Рис. 15. Схема замещения шестифазного асинхронного двигателя

Таблица 6

Параметры схемы замещения шестифазного асинхронного двигателя

Тип двигателя	Мощность, кВт	Параметры СЗ, Ом	Разработанный метод	Аналитический расчет	Погрешность, %
5A180M8 (2p = 10)	15	X_1	0,256	0,246	4,07
		R'_2	0,029	0,027	7,41
		X'_2	0,31	0,304	1,97
		R_m	0,076	—	—
		X_m	3,022	3,066	1,44

Таблица 7

Погрешность расчета параметров схемы замещения шестифазного асинхронного двигателя

Тип двигателя	Мощность, кВт	Параметры СЗ	Погрешность, %
Многополюсный АД (2p = 10)	60	X_1	2,69
		R'_2	17,57
		X'_2	1,95
		R_m	—
		X_m	9,27



Рис. 16. Макетный образец шестифазного асинхронного двигателя

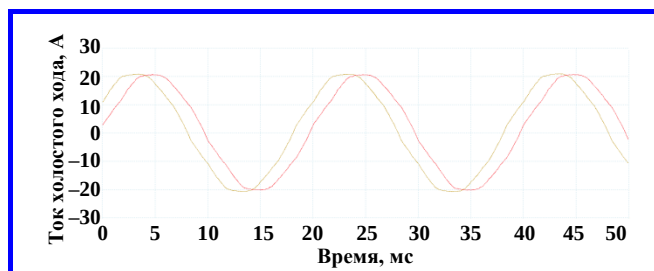


Рис. 17. Осциллограмма токов холостого хода I_0 фаз А и А1

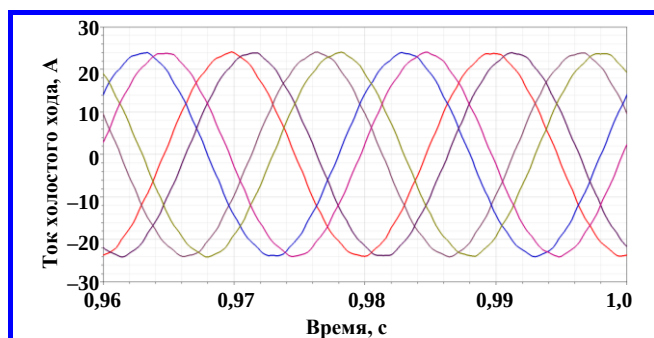


Рис. 18. Ток холостого хода I_0

На рис. 17 представлена осциллограмма токов XX фаз А и А1, позволяющая выявить фазовый сдвиг между одноименными фазами. Как видно из графика, сдвиг составляет 30 электрических градусов, что соответствует параметрам двигателя.

На рис. 18 показан график тока XX, полученный при моделировании с теми же параметрами питания.

Экспериментальные данные показали высокую степень соответствия параметров токов (амплитуда и фазовый сдвиг) с результатами моделирования.

Заключение

Разработан метод определения параметров схем замещения многофазных асинхронных двигателей, основанный на численном анализе электромагнитных процессов с использованием конечно-элементного моделирования. Предложенный метод позволяет учесть эффект вытеснения тока в обмотке ротора, что позволяет провести более точный расчет параметров схемы замещения по сравнению с аналитическими методами. Проведенная верификация расчетных параметров на XX показала высокую сходимость с экспериментальными значениями. Разработанный метод может повысить точность моделирования и настройки электроприводов с многофазными АД.

Литература

1. Levi, E. Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications / E. Levi. – DOI : 10.1109/TIE.2008.918488 // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55. – No. 5. – P. 1893–1909.

2. Nanoty, A. S. Design of multiphase induction motor for electric ship propulsion / A. S. Nanoty, A. R. Chudasama. – DOI : 10.1109/ESTS.2011.5770882 // 2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. – 2011. – P. 283–287.
3. Kuang, Z. Five-phase permanent magnet synchronous motor drive for aircraft applications / Z. Kuang, T. Zhao, S. Cui. – DOI : 10.1109/CONTROL.2016.7737511 // 2016 UKACC 11th International Conference on Control (CONTROL). – 2016. – P. 1–6.
4. Parsa, L. Five-phase interior permanent magnet motor for hybrid electric vehicle application / L. Parsa, A. Goodarzi, H. A. Toliyat. – DOI : 10.1109/VPPC.2005.1554573 // 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. – 2005. – P. 631–637.
5. Priyanka, C. P. Analysis of Pole Phase Modulated Multiphase Induction Motor for EV Applications / C. P. Priyanka, J. Kumar, G. Jagdanand [et al.]. – DOI : 10.1109/ITEC48692.2020.9161710 // 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). – 2020. – P. 1056–1061.
6. Anvari, B. Design of multiphase exterior rotor switched reluctance motor for traction applications / B. Anvari, Y. Li, H. A. Toliyat. – DOI : 10.1109/ISIE.2016.7744883 // 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). – 2016. – P. 161–166.
7. Taha, M. Design of a high power-low voltage multiphase permanent magnet flux switching machine for automotive applications / M. Taha, J. Wale, D. Greenwood. – DOI : 10.1109/IEMDC.2017.8002107 // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). – 2017. – P. 1–8.
8. A simple circuit-oriented model for predicting six-phase induction machine performances / G. Aroquiadassou, H. Henao, G. A. Capolino [et al.]. – DOI : 10.1109/IECON.2006.347469 // IECON 2006 – 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. – 2006. – P. 1441–1446.

9. Parameter Estimation of Asymmetrical Six-Phase Induction Machines Using Modified Standard Tests / H. S. Che, A. S. Abdel-Khalik, O. Dordevic [et al.]. – DOI : 10.1109/TIE.2017.2677349 // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Vol. 64. – No. 8. – P. 6075–6085.
10. Coupled Finite Element-Circuit Modelling and Parameter Estimation of Six-Phase Induction Motor / B. S. Abdel-Mageed, S. S. A. Mohamed, K. F. Ali [et al.]. – DOI : 10.1109/MEPCON47431.2019.9008048 // 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). – 2019. – P. 645–649.
11. 112TM IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Power Engineering Society / Electric Machinery Committee. – IEEE, 2004. – 79 p.
12. ГОСТ Р 53472-2009. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 декабря 2009 г. № 639-ст : введен впервые : дата введения 2011–01–01 / разработан Государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)» (ГОУВПО «МЭИ (ТУ)»). – Москва : Стандартиформ, 2011. – 41 [1] с.
13. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров / И. П. Копылов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ЮРАЙТ, 2015. – 767 с.
14. Boglietti, A. Computational algorithms for induction-motor equivalent circuit parameter determination – Part I: Resistances and leakage reactances / A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari. – DOI : 10.1109/TIE.2010.2084974 // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 58. – No. 9. – P. 3723–3733.
15. Хнычев, Д. А. Определение параметров схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя на основе результатов численного моделирования электромагнитного поля / Д. А. Хнычев, А. А. Кирякин // Вопросы электротехнологии. – 2025. – №1(46). – С. 66–73.

Поступила в редакцию 15.05.2025

*Данила Андреевич Хнычев, магистрант, инженер, e-mail: danila.khnychiov@mail.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»; Национальный исследовательский университет «МЭИ»).*

Вячеслав Валерьевич Магин, начальник лаборатории.

Максим Борисович Панасюк, ведущий инженер.

Т. 8 (495) 365-26-14.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE EQUIVALENT CIRCUIT OF A MULTIPHASE INDUCTION MACHINE USING FINITE ELEMENT MODELING

D. A. Khnychev, V. V. Magin, M. B. Panasyuk

The article presents a method for determining the parameters of equivalent circuits of multiphase induction motors, based on the combined use of finite element modeling. The stages of numerical simulation of key experiments are described in detail: the load test, the test with removed rotor, the no-load test, and the short-circuit test. The developed methodology allows determining the parameters of the equivalent T-circuit, including the active and inductive resistances of the stator and rotor windings, as well as the magnetization branch parameters. To verify the proposed approach, a comparison was made between the finite element simulation results and analytical calculations performed in specialized software. Additionally, a mathematical model of the equivalent T-circuit was developed, enabling a comparative analysis of currents obtained through numerical and mathematical modeling methods. Experimental studies of a six-phase induction motor in no-load mode demonstrate a high degree of agreement with the simulation results, confirming the correctness of the developed numerical model.

Key words: induction motor, multiphase machine, six-phase machine, equivalent circuit, parameters, numerical simulation, finite element method.

References

1. Levi, E. Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications / E. Levi. – DOI : 10.1109/TIE.2008.918488 // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55. – No. 5. – P. 1893–1909.
2. Nanoty, A. S. Design of multiphase induction motor for electric ship propulsion / A. S. Nanoty, A. R. Chudasama. – DOI : 10.1109/ESTS.2011.5770882 // 2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. – 2011. – P. 283–287.
3. Kuang, Z. Five-phase permanent magnet synchronous motor drive for aircraft applications / Z. Kuang, T. Zhao, S. Cui. – DOI : 10.1109/CONTROL.2016.7737511 // 2016 UKACC 11th International Conference on Control (CONTROL). – 2016. – P. 1–6.
4. Parsa, L. Five-phase interior permanent magnet motor for hybrid electric vehicle application / L. Parsa, A. Goodarzi, H. A Toliyat. – DOI : 10.1109/VPPC.2005.1554573 // 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. – 2005. – P. 631–637.
5. Priyanka, C. P. Analysis of Pole Phase Modulated Multiphase Induction Motor for EV Applications / C. P. Priyanka, J. Kumar, G. Jagdanand [et al.]. – DOI : 10.1109/ITEC48692.2020.9161710 // 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). – 2020. – P. 1056–1061.

6. Anvari, B. Design of multiphase exterior rotor switched reluctance motor for traction applications / B. Anvari, Y. Li, H. A. Toliyat. – DOI : 10.1109/ISIE.2016.7744883 // 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). – 2016. – P. 161–166.
7. Taha, M. Design of a high power-low voltage multiphase permanent magnet flux switching machine for automotive applications / M. Taha, J. Wale, D. Greenwood. – DOI : 10.1109/IEMDC.2017.8002107 // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). – 2017. – P. 1–8.
8. A simple circuit-oriented model for predicting six-phase induction machine performances / G. Aroquiadassou, H. Henao, G. A. Capolino [et al.]. – DOI : 10.1109/IECON.2006.347469 // IECON 2006 – 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. – 2006. – P. 1441–1446.
9. Parameter Estimation of Asymmetrical Six-Phase Induction Machines Using Modified Standard Tests / H. S. Che, A. S. Abdel-Khalik, O. Dordevic [et al.]. – DOI : 10.1109/TIE.2017.2677349 // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Vol. 64. – No. 8. – P. 6075–6085.
10. Coupled Finite Element-Circuit Modelling and Parameter Estimation of Six-Phase Induction Motor / B. S. Abdel-Mageed, S. S. A. Mohamed, K. F. Ali [et al.]. – DOI : 10.1109/MEPCON47431.2019.9008048 // 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). – 2019. – P. 645–649.
11. 112TM IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Power Engineering Society / Electric Machinery Committee. – IEEE, 2004. – 79 p.
12. GOST R 53472-2009. Rotating electrical machines. Asynchronous motors. Test methods: national standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 9, 2009 No. 639-st : introduced for the first time : date of introduction 2011–01–01 / developed by the State Educational Institution of Higher Professional Education «Moscow Power Engineering Institute (Technical University)» (GOUVPO «MPEI (TU)»). – Moscow : Standartinform, 2011. – 41 [1] p.
13. Kopylov, I. P. Electrical Machine Design: A Bachelor's Textbook / I. P. Kopylov. – 4th edition, revised and supplemented. – Moscow : URAIT, 2015. – 767 p.
14. Boglietti, A. Computational algorithms for induction-motor equivalent circuit parameter determination – Part I: Resistances and leakage reactances / A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari. – DOI : 10.1109/TIE.2010.2084974 // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 58. – No. 9. – P. 3723–3733.
15. Khnychev, D. A. Determining parameters of the equivalent circuit of a three-phase induction motor based on the results of numerical simulation of the electromagnetic field / D. A. Khnychev, A. A. Kiryakin // Journal of Electrotechnics. – 2025. – №1(46). – P. 66–73.

Danila Andreevich Khnychev, Master's student, engineer, e-mail: danila.khnychiov@mail.ru.
(JC «VNIIEM Corporation»; National Research University «Moscow Power Engineering Institute»).

Vyacheslav Valer'evich Magin, Head of laboratory.
Maxim Borisovich Panasyuk, Lead engineer.
T. 8 (495) 365-26-14.
(JSC «VNIIEM Corporation»).