

Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.313.333

doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-84-92

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Дмитрий Владленович Дзюин^{1✉}, Валерия Валерьевна Дмитриева²

^{1,2} Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, г. Москва, Россия

¹ dziouin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-0411-9948>

² dm-valeriya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8740-9380>

Аннотация. *Статья посвящена разработке программы расчета параметров T-образной схемы замещения трехфазных асинхронных электродвигателей. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью получения достоверных результатов компьютерного имитационного моделирования систем электропривода в программных комплексах. Целью исследования является реализация в удобном программном интерфейсе аналитической методики расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с минимальными отклонениями от каталожных данных. Для программного расчета параметров схемы замещения рассматриваются аналитические аппроксимационные и итерационные методики счета, так как они не требуют проведения экспериментов на промышленном электрооборудовании. Выполнен сравнительный анализ таких методик на примере трёхфазного асинхронного двигателя марки ВА280S4 мощностью 110 кВт. Результаты сравнительного анализа показывают, что наибольшая достоверность механической и электромеханической характеристики достигается в случае применения итерационной методики счета с минимизацией целевой функции суммы взвешенных квадратов отклонений значений контрольных точек от каталожных данных. Программа расчета параметров схемы замещения по выбранной методике счета реализована в среде Embarcadero Delphi. Рассчитываемые программой достоверные значения параметров электродвигателей позволяют проводить максимально соответствующее реальным объектам компьютерное моделирование систем электропривода.*

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, схема замещения, расчет параметров, программа расчета, итерационная методика, многокритериальный подбор, целевая функция, механическая характеристика, моделирование

Для цитирования: Дзюин Д.В., Дмитриева В.В. Разработка программы расчета параметров схемы замещения трехфазного асинхронного электродвигателя // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №3 (25). С. 84-92. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-84-92.

Original article

Open Access Article

DEVELOPING A PROGRAM FOR CALCULATING THE EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS OF A THREE-PHASE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR

Dmitry V. Dzyuin^{1✉}, Valeriya V. Dmitrieva²

^{1,2} National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russia

¹ dziouin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-0411-9948>

² dm-valeriya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8740-9380>

Abstract. *The article is devoted to developing a program for calculating the parameters of a T-shaped equivalent circuit of three-phase asynchronous electric motors. The relevance of this work is due to the need to obtain reliable results of computer simulation modelling of electric drive systems in software packages. The aim of the study is to implement in*

a convenient software interface an analytical technique for calculating the parameters of an asynchronous motor equivalent circuit with minimal deviations from the catalogue data. For the software calculation of the equivalent circuit parameters the paper considers analytical approximation and iterative counting techniques, since they do not require experiments on industrial electrical equipment. A comparative analysis of such techniques is performed using the example of a three-phase asynchronous motor brand BA280S4 with a power of 110 kW. The results of the comparative analysis show that the highest reliability of the mechanical and electromechanical characteristics is achieved in the case of using the iterative counting technique with minimizing the objective function of the sum of the weighted squares of the deviations of the control point values from the catalogue data. The authors implement the program for calculating the equivalent circuit parameters according to the selected calculation method in the Embarcadero Delphi environment. The reliable values of the electric motor parameters calculated by the program will allow for computer to model electric drive systems that best matches real objects.

Keywords: asynchronous electric motor, equivalent circuit, calculation of parameters, calculation program, iterative method, multi-criteria selection, objective function, mechanical characteristic, modelling

For citation: Dzyuin D.V., Dmitrieva V.V. Developing a Program for Calculating the Equivalent Circuit Parameters of a Three-Phase Asynchronous Electric Motor. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 3 (25). pp. 84-92. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-84-92.

Введение

В настоящее время наиболее доступным и дешевым методом синтеза и исследования статических и динамических режимов работы электромеханических систем является компьютерное имитационное моделирование в программных комплексах, как например: ETAP, NI Multisim, MATLAB/Simulink, SimInTech. В связи с тем, что 80 % всей потребляемой в промышленности электрической энергии приходится на асинхронный электропривод [1], возникает актуальная задача наиболее точного приближения параметров математической и компьютерной модели трехфазного асинхронного двигателя (АД) к реальному оборудованию в целях повышения достоверности результатов моделирования.

Производители АД предоставляют информацию о технических характеристиках электрических машин в каталогах выпускаемого оборудования. Однако каталожные данные не содержат соответствующих параметров эквивалентной схемы замещения АД, составление которой требуется для расчета электромеханических переходных процессов [2]. Определение параметров схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя традиционно производится путем стандартных испытаний: измерение сопротивления обмоток постоянному току, измерение сопротивления обмоток на холостом ходу и измерение сопротивлений при заторможенном роторе [1, 3, 4]. Чтобы избежать нарушения режима работы электромеханической системы и не отключать АД от сети и нагрузки, в настоящее время, как свидетельствуют недавние исследования [4 – 8], актуально использование расчетных оптимизационных методов оценки параметров асинхронных машин. Используя предоставленные производителем данные в качестве контрольных точек, авторы работ [4 – 8] осуществляют в реальном времени непрерывное сравнение текущих значений идентифицируемых параметров схемы замещения с адаптивной эталонной моделью, с применением современных алгоритмов нелинейной оптимизации [4], алгоритма вихревого поиска [5], алгоритма роя сальп [6], расширенного наблюдателя Калмана [7] и нейронных сетей [7, 8]. Получаемая в результате оптимизации математическая модель двигателя индивидуальна для каждого объекта исследования и максимально ему соответствует. Но в условиях невозможности проведения тестов на промышленном оборудовании, например, при отсутствии доступа исследователей на производство, для оценки параметров схемы замещения АД требуются совершенно иные, аналитические методы счета с применением ЭВМ. К такому же выводу приходят авторы работ [2, 9].

Соответственно, целью данной работы является реализация в удобном программном интерфейсе аналитической методики расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с минимальными отклонениями от каталожных данных. В ходе работе выполнен обзор преимуществ и недостатков основных методик расчета параметров схемы замещения АД, проведён их сравнительный анализ на примере асинхронного двигателя марки BA280S4 мощностью 110 кВт, в среде Embarcadero Delphi 11 разработана программа расчета параметров схемы замещения по выбранной итерационной методике.

Методы расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя

Математическая и компьютерная модель АД строится по уравнениям для Г-образной (рис. 1) или Т-образной схемы замещения (рис. 2) обобщенной двухфазной электрической машины, приведённой к ортогональным осям. Моделируемая электрическая цепь АД характеризуется следующими электрическими и механическими величинами, обозначенными на рис. 1 и рис. 2: \dot{I}_1 – комплексная величина тока в фазе обмотки статора; \dot{I}'_2 – комплексная величина приведенного тока в фазе обмотки ротора; \dot{I}_0 – комплексная величина тока в ветви намагничивания; \dot{U}_1 – комплексная величина фазного напряжения, приложенного к обмотке статора; s – скольжение асинхронного двигателя.

Рассчитываемые параметры схемы замещения – это активные и индуктивные сопротивления обмоток, обозначенные на рис. 1 и рис. 2: R_1 – номинальное активное сопротивление статора; X_1 – индуктивное сопротивление рассеяния статора; R'_1 – приведенное активное сопротивление статора; X'_1 – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния статора; R'_2 – приведенное активное сопротивление ротора; X'_2 – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния ротора; R_0 – номинальное активное сопротивление намагничивания (опционально); X_0 – номинальное индуктивное сопротивление намагничивания.

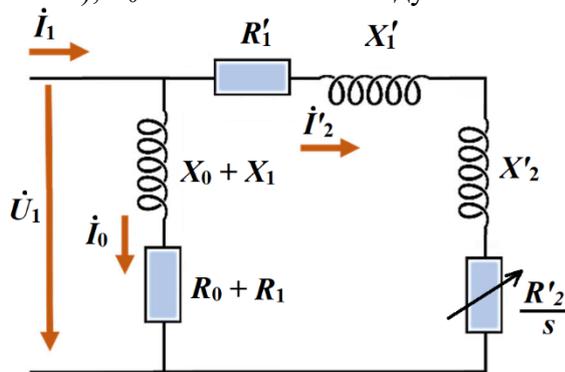


Рис. 1. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя

Fig. 1. L-shaped asynchronous motor equivalent circuit

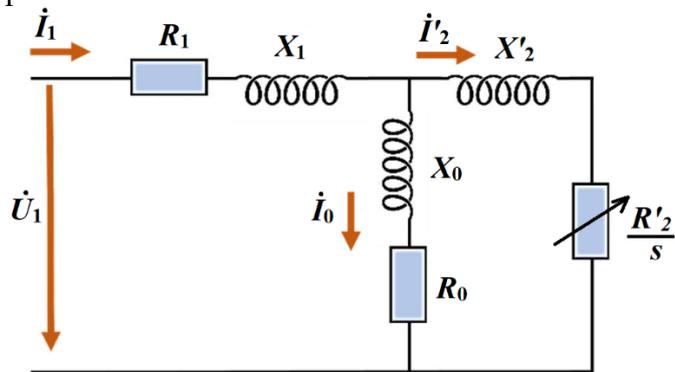


Рис. 2. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Fig. 2. T-shaped asynchronous motor equivalent circuit

В библиотеках большинства программных комплексов в структуре готовых блоков моделей АД используется именно Т-образная схема замещения. Поэтому в работе рассматриваются методики расчета значений активных и индуктивных сопротивлений обмоток статора, ротора и ветви намагничивания только на основании Т-образной схемы замещения.

Исходными данными для расчета параметров схемы замещения по любой методике обязательно являются номинальные параметры, приводимые в паспорте: номинальная мощность P_n , номинальное линейное напряжение U_n , номинальный ток статора I_n , номинальная скорость n_n , номинальный коэффициент полезного действия (КПД) η_n , номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_n$, а также кратность пускового тока i_n , кратность пускового момента m_n , кратность критического момента m_k . Значения этих параметров дают достоверную информацию о трёх точках механической и электромеханической характеристики АД: номинальный режим (при номинальном скольжении s_n), пусковой режим (при скольжении $s = 1$), режим максимального момента (при критическом скольжении s_k). В условиях отсутствия информации о эталонных значениях сопротивлений схемы замещения, степень адекватности их вычисления может быть оценена только по близости значений тока, момента, КПД и $\cos \varphi$ к паспортным данным, для чего выполняется расчет механической и электромеханической характеристики АД по полученной схеме замещения. Задача вычисления 5...6 параметров схемы замещения АД по трём точкам механической характеристики не имеет однозначного решения, отсюда следует несколько подходов к вычислению, и все они основаны на ряде допущений.

Одна группа аналитических методов, представленных в статьях Сафаряна В.С. [9], Макеева М.С. [10], Мощинского Ю.А. [11], Осипова В.С. [12], относится к безитерационным аппроксимационным. Данные методики отличаются последовательностью, простотой и быстротой счета, в случае необходимости расчет может быть выполнен вручную с использованием только калькулятора. Недостатком перечисленных методик является то, что аппроксимация

функции сопротивления цепи ротора в зависимости от скольжения требует дополнительных значений величин, отличных от паспортных данных для номинального режима. Такими данными выступают ток холостого хода [10], энергетические показатели (КПД и $\cos \varphi$) при загрузке 25 %, 50 %, 75 %, 80 % или 125 % номинальной [11], механические, магнитные и добавочные потери [12]. Все вышеперечисленные значения чаще всего задаются произвольно, как, например, активное сопротивление ротора [9]. Эти допущения приводят к расхождениям при аппроксимации характеристик и к значительным отклонениям расчетных значений параметров от каталожных. Как показано в [13], наибольшей точностью аппроксимации отличается методика Ю.А. Мощинского, в которой приводятся зависимости активного и индуктивного сопротивления ротора от скольжения $R'_2(s)$, $X'_2(s)$ с учетом эффекта вытеснения тока. Номинальные значения сопротивлений ротора достигаются в момент пуска при единичном скольжении: $R'_2(1) = R'_{20}$, $X'_2(1) = X'_{20}$.

Для подбора параметров в широком диапазоне значений применяются итерационные методы вычисления, такие, как методика С.Г. Германа-Галкина [14], В.Б. Терёхина [15], А.А. Усольцева и Д.В. Лукичёва [16]. В приведённых методиках значения активных и реактивных сопротивлений статора и ротора вычисляются с использованием коэффициента c_1 , являющегося коэффициентом пропорциональности индуктивностей обмотки статора и ветви намагничивания:

$$c_1 = 1 + \frac{X_1}{X_0}. \quad (1)$$

Вычисления параметров схемы замещения производятся в диапазоне $1,02 < c_1 < 1,2$, и на каждой итерации значение c_1 по формуле (1) сравнивается с исходным. Для сокращения числа итераций, как предложено в [15, 16], рассчитанное значение c_1 становится исходным для следующей итерации. Такой расчет сходится за 3...4 итерации, но получаемые по схеме замещения значения контрольных параметров обычно сильно отклоняются от каталожных данных, особенно в области скольжений, превышающих критическое.

Подбор параметров схемы замещения АД для совпадения расчетной характеристики со всеми контрольными точками является задачей многокритериальной нелинейной оптимизации, поэтому к её решению применим подход, представленный в [17]. В данной методике, помимо активных и индуктивных сопротивлений статора, ротора и ветви намагничивания, оценке подлежат ещё три параметра АД: a – доля магнитных потерь ротора; h' – приведенная глубина паза ротора; α – доля неактивной части обмотки ротора. Начальные приближения всех 9 параметров определяются по классическим формулам для Т-образной схемы замещения [17]. Итерационный подбор выполняется методом покоординатного спуска, при котором значение каждого из 9 параметров изменяется в $(1 \pm \Delta)$ раз в большую и в меньшую сторону, где Δ – точность счёта, по умолчанию принимаемая $\Delta = 0,005$. Для каждого изменённого значения параметра при всех неизменных остальных вычисляется вектор критериев (контрольных точек) – значения номинального и пускового момента и тока, критического момента, КПД и коэффициента мощности в относительных единицах (о.е.):

$$A = [m_n; i_n; m_p; i_p; m_k; \eta_n; \cos \varphi_n]. \quad (2)$$

Из вектора критериев (2) на каждой итерации формируется и сохраняется в матрице обций критерий оптимизации – целевая функция. В качестве целевой функции выступает аддитивная свертка взвешенных квадратов отклонений значений контрольных точек от каталожных данных:

$$F(A) = \sum_{i=1}^7 v_i \left(\frac{A_{ni} - A_i}{A_{ni}} \right)^2 \rightarrow \min; \quad (3)$$

где v_i , о.е. – вес i -го критерия; A_{ni} , A_i , о.е. – каталожное и текущее значение i -го контрольного параметра АД из (2).

Из полученной матрицы критериев (значений минимизируемой целевой функции) выбирается наименьшее значение, и соответствующее ему изменённое значение параметра схемы замещения сохраняется, заменяя собой исходное. На этом завершается одна итерация, и далее начинается следующая. Расчет останавливается, когда минимизируемая целевая функция (3) перестаёт уменьшаться, т.е. на текущей итерации нет улучшений.

Если в процессе подбора параметров какой-либо из них выходит за границы ограничений: $0 < R_1$; $0 < X_1$; $0,05X_0 < R_0 < 0,2X_0$; $0 < X_0 < 1000X_1$; $0 < c_1 < 1000X'_{20}$; $0 < R'_{2(s)}$; $0 < X'_{2(s)}$; $0,2 < a < 0,8$; $0,005 < \alpha < 0,2$; $1 < h' < 7$; то соответствующее ему значение целевой функции (3) в матрице критериев приравнивается к 10^6 , что практически соответствует бесконечности [17].

Результаты работы и их обсуждение

Итерационная методика многокритериальной оптимизации параметров схемы замещения АД [17] реализована в программной среде Embarcadero Delphi [18]. Блок-схема её алгоритма приведена на рис. 3.

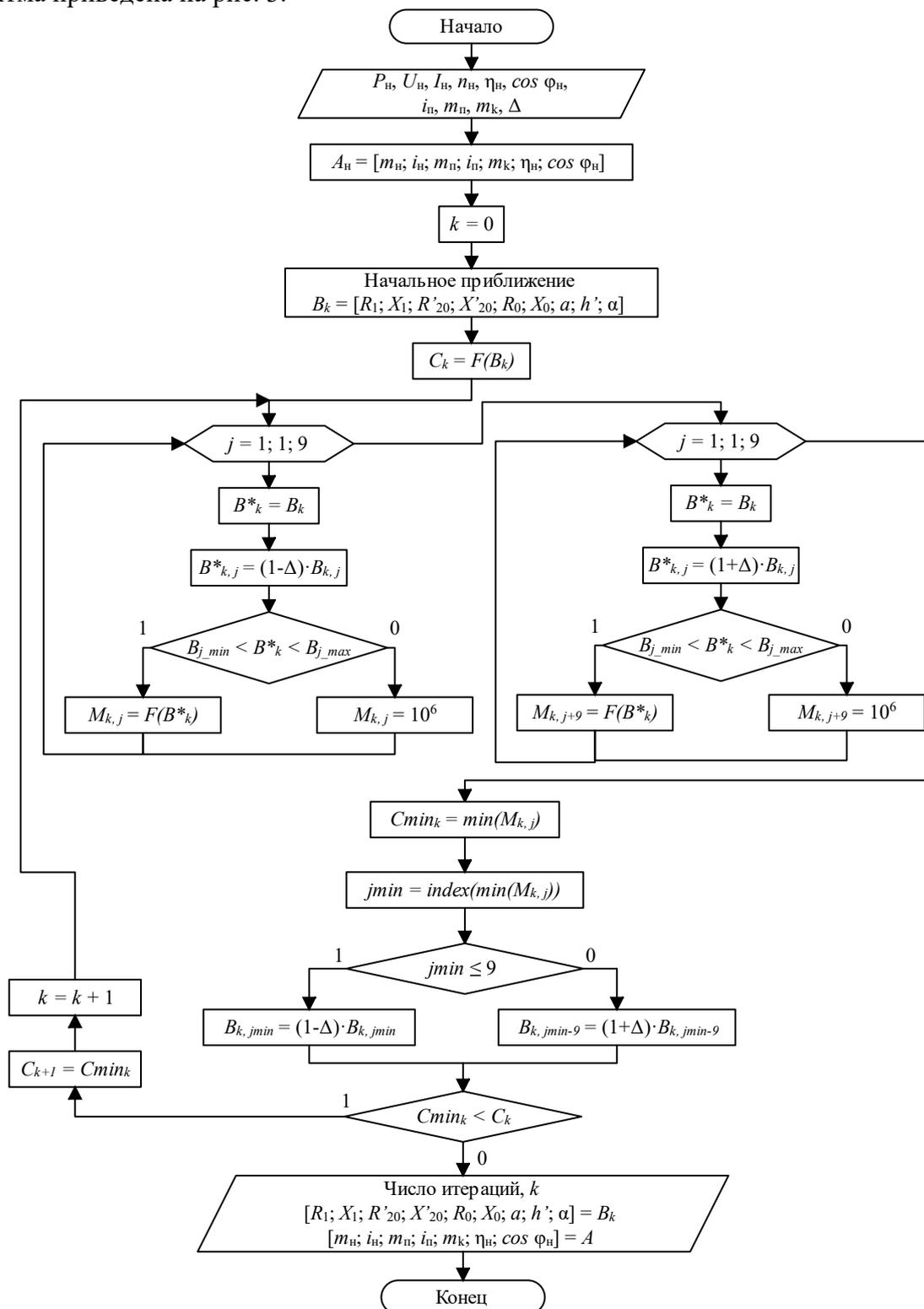


Рис. 3. Блок-схема алгоритма разработанной программы
Fig. 3. Block diagram of the algorithm for the developed program

Результаты работы программы показали, что используемая методика, благодаря учёту активного сопротивления ветви намагничивания и эффекта вытеснения тока в роторе, отличается наибольшим количеством совпадений с каталожными данными. Для примера асинхронного двигателя марки BA280S4 мощностью 110 кВт в табл. 1 представлены результаты программного расчёта сопротивлений схемы замещения АД в сравнении с результатами расчета по методикам Мощинского Ю.А., Германа-Галкина С.Г., Терёхина В.Б., Усольцева А.А.

Таблица 1

Расчетные значения сопротивлений схемы замещения асинхронного двигателя BA280S4

Table 1

Calculated values of the BA280S4 asynchronous motor equivalent circuit resistances

Методика	R_1 , Ом	R'_{20} , Ом	X_1 , Ом	X'_{20} , Ом	X_0 , Ом	R_0 , Ом
Многокритериальная	0,057698	0,010811	0,081539	0,140675	3,283204	0,164457
Мощинский Ю.А. и др. [11]	0,030319	0,012625	0,123251	0,170204	3,467416	-
Герман-Галкин С.Г. [14]	0,023253	0,009213	0,041623	0,041623	2,173841	-
Терёхин В.Б. [15]	0,011843	0,046936	0,079600	0,079600	4,562045	-
Усольцев А.А. и др. [16]	0,010948	0,010948	0,177112	0,088562	3,413093	-

Расчитанные значения контрольных параметров АД BA280S4 и их максимальные и минимальные относительные отклонения от каталога сведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения контрольных параметров асинхронного двигателя BA280S4 и их относительные отклонения от каталога

Table 2

Values of the BA280S4 asynchronous motor check parameters and their deviations from the catalog

Методика\Параметр	m_n , о.е.	i_n , о.е.	m_k , о.е.	i_k , о.е.	m_c , о.е.	η_n , о.е.	$\cos \varphi_n$, о.е.
Каталожные значения	1	1	2,1	6,4	2,2	0,951	0,87
Итерационная многокритериальная	1,0433	1,0468	0,2598	4,9800	2,2616	0,9280	0,8886
Многокритериальная с учетом вытеснения тока	0,9927	1,0098	2,1195	6,2812	2,2181	0,9149	0,8891
Мощинский Ю.А. и др. [11]	1,0254	1,0285	1,3737	6,2080	2,2206	0,9633	0,8563
Герман-Галкин С.Г. [14]	1,3315	1,2848	1,4996	12,6131	5,9239	0,9595	0,8936
Терёхин В.Б. [15]	0,2752	0,3341	2,1198	6,6200	3,7893	0,9848	0,6920
Усольцев А.А. и др. [16]	1,1002	1,0671	0,2002	4,3759	2,3471	0,9778	0,8724
Мин. отклонение ε_{min} , о.е.	0,0073	0,0098	0,0093	0,0186	0,0082	0,0089	0,0028
Макс. отклонение ε_{max} , о.е.	0,7248	0,6659	0,9047	0,9708	1,6927	0,0380	0,2046

Полученные результаты (выделенные темно-серым цветом) подтверждают, что используемая в программе итерационная многокритериальная методика с учетом вытеснением тока отличается приемлемой точностью счета: расхождение для двигателей средней мощности не превышает 2 % для механических и электромеханических характеристик и достигает максимум 4 % для энергетических характеристик (КПД), что укладывается в допустимый заводской разброс характеристик, равный 5 %. Как иллюстрируют приведённые на рис. 4 естественные механические характеристики, построенные для примера BA280S4, расчёт по программе [18] даёт полное совпадение всех трёх точек номинального, пускового и критического режима, в то время как остальные рассмотренные методики позволяют достичь совпадения только одной или двух контрольных точек.

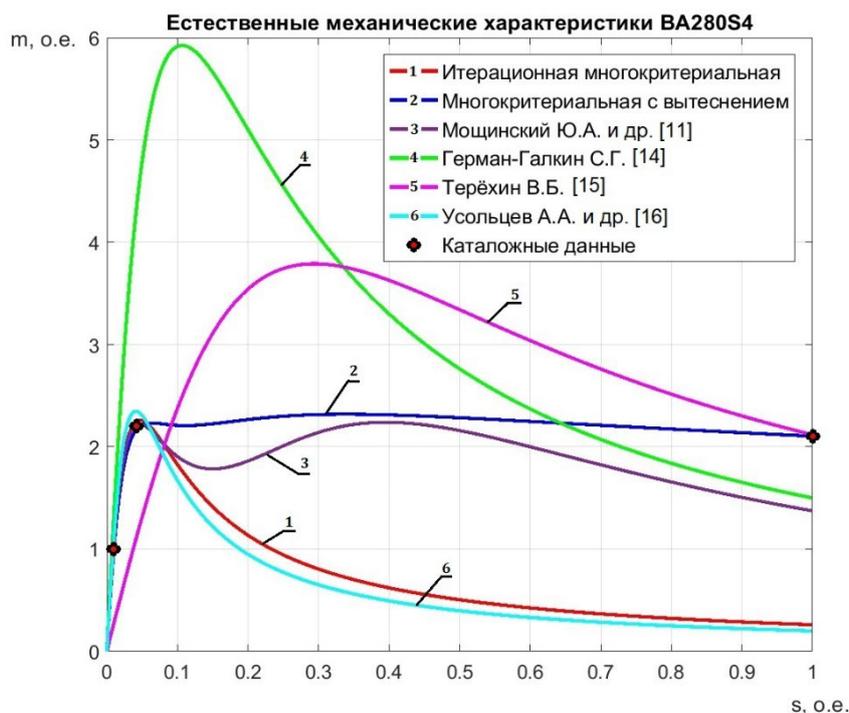


Рис. 4. Естественные механические характеристики асинхронного двигателя BA280S4
Fig. 4. Natural mechanic characteristics of the BA280S4 asynchronous motor

Заключение

Разработанная компьютерная программа объемом 16 МБ – это новый, удобный инструмент, совместимый с любой 32-битной и 64-битной версией Windows, не имеющий особых требований к процессору и оперативной памяти. Программа осуществляет вывод исходных данных и результатов расчета (параметров схемы замещения, контрольных точек и относительных отклонений) в текстовые поля, в файл и на график механической характеристики.

Программа может применяться: для расчета параметров двигателей в условиях отсутствия доступа к промышленному оборудованию в целях верификации; для разработки продвинутых компьютерных моделей трехфазных асинхронных двигателей с динамическими постоянными времени ротора; для составления каталогов исходных данных по двигателям для расчетно-графических и контрольных работ; для расчета недостающих и точных значений сопротивлений обмоток в целях построения достоверных естественных и искусственных механических характеристик при исследовании регулирования асинхронных двигателей. Быстрота и доступность расчетов с помощью разработанной программы обеспечит наибольшую достоверность математического и компьютерного моделирования систем электропривода для решения учебно-методических и научно-исследовательских задач.

Список источников:

1. Khalaf M. M., Ali A. M. Parameters Estimation Tests of Induction Machine Using Matlab/Simulink. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021;1973(1):012109.
2. Gör H. Feasibility of Six Metaheuristic Solutions for Estimating Induction Motor Reactance. Mathematics. 2024; 12(3):483.
3. Ершов М.С., Комков А.Н., Гамидов О.М. Определение параметров схемы замещения и основных характеристик короткозамкнутых асинхронных двигателей малой мощности на основе анализа сигналов тока и напряжения // Электротехника. – 2022. – № 2. – С. 63-68.

References:

1. Khalaf M.M., Ali A.M. Parameters Estimation Tests of Induction Machine Using Matlab/Simulink. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2021;1973(1):012109.
2. Gör H. Feasibility of Six Metaheuristic Solutions for Estimating Induction Motor Reactance. Mathematics. 2024;12(3):483.
3. Ershov M.S., Komkov A.N., Gamidov O.M. Determination of the Equivalent-Circuit Parameters and the Main Characteristics of Squirrel-Cage Low-Power Induction Motors Based on Analysis of Current and Voltage Signals. Electrical Engineering. 2022;2:63-68.

4. Simba K.G., Quilumba F.L., Granda N.V. Parameter Estimation of a Three-Phase Induction Motor from Direct Starting Stator Transient Measurements. 2020 IEEE ANDESCON, Quito, Ecuador. IEEE, 2020. Pp. 1-5.
5. Montano J., Garzón O.D., Herrera-Jaramillo D.A., Montoya O.D., Andrade F., Tobón A. Estimating the Parameters of a Three-Phase Induction Motor using the Vortex Search Algorithm. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering. 2023;48:337-347.
6. Zorig A., Belkheiri A., Bendjedia B., Kouzi K., Belkheiri M. New identification of induction machine parameters with a meta-heuristic algorithm based on least squares method. COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. 2023;42(6):1852-1866.
7. Tang J., Yang Y., Blaabjerg F., Chen J., Diao L., Liu Z. Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A Review. Energies. 2018;11(9):2194.
8. Омельченко Е.Я., Лымарь А.Б. Идентификация параметров схемы замещения асинхронных двигателей при помощи нейронных сетей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19. – № 4. – С. 31-44.
9. Сафарян В.С., Геворгян С.Г. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 6. – С. 20-34.
10. Макеев М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013. – №1 (23). – С. 108-112.
11. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным // Электричество. – 1998. – №4. – С. 38-42.
12. Осипов В.С. Аналитический метод расчета параметров схемы замещения трехфазных асинхронных двигателей серии АИР // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2017. – №2 (54). – С. 108-120.
13. Пиляев С.Н., Афоничев Д.Н. Обоснование параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 13. – № 4(67). – С. 129-138.
14. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК: учеб. пособие для вузов / С.Г. Герман-Галкин. Санкт-Петербург: КОРОНА Век, 2008. – 368 с.
15. Терёхин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
16. Усольцев А.А., Лукичёв Д.В. Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным // Приборостроение. – 2008. – №10. – С. 35-41.
4. Simba KG, Quilumba FL, Granda NV. Parameter Estimation of a Three-Phase Induction Motor From Direct Starting Stator Transient Measurements. In: Proceedings of 2020 IEEE ANDESCON; Quito, Ecuador: IEEE: 2020. p. 1-5.
5. Montano J., Garzón O.D., Herrera-Jaramillo D.A., Montoya O.D., Andrade F., Tobón A. Estimating the Parameters of a Three-Phase Induction Motor Using the Vortex Search Algorithm. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering. 2023;48:337-347.
6. Zorig A., Belkheiri A., Bendjedia B., Kouzi K., Belkheiri M. New Identification of Induction Machine Parameters With a Meta-Heuristic Algorithm Based on Least Squares Method. COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 2023;42(6):1852-1866.
7. Tang J., Yang Y., Blaabjerg F., Chen J., Diao L., Liu Z. Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A Review. Energies. 2018;11(9):2194.
8. Omelchenko E.Ya., Lyman A.B. Identification of the Parameters of an Induction Motor Equipment Circuit Using Neural Networks. Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2023;19(4):31-44.
9. Safaryan V.S., Gevorgyan S.G. Ascertainment of the Equivalent Circuit Parameters of the Asynchronous Machine. Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2015;6:20-34.
10. Makeev M.S., Kuvshinov A.A. Algorithm for Calculating the Parameters of the Equivalent Circuit of the Asynchronous Engine at the Catalogue Data. Science Vector of Togliatti State University. 2013;1(23):108-112.
11. Moshchinsky Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryakin A.A. Determining the Asynchronous Motor Equivalent Circuit From the Catalogue Data. Electricity. 1998;4:38-42.
12. Osipov V.S. Analytical Calculation of Equivalent Circuit Parameters for Three Phase Asynchronous Motors of AIR-Series. Vestnik of Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2017;2(54):108-120.
13. Pilyaev S.N., Afonichev D.N. Substantiation of Parameters of the Asynchronous Electric Motor Replacement Circuit. Vestnik of Voronezh State Agrarian University. 2020;13-4(67):129-138.
14. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Design of Mechatronic Systems on a PC. Saint Petersburg: KORONA Vek; 2008.
15. Terekhin V.B. Simulating Electric Drive Systems in Simulink (Matlab 7.0.1). Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University; 2008.
16. Usoltsev A.A., Lukichev D.V. Definition of Parameters of Model of the Asynchronous Engine on the Help Data. Journal of Instrument Engineering. 2008;10:35-41.

17. Ершов М.С., Егоров А.В., Трифонов А.А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. М.: Недра, 2010. – 318 с.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611993 Российская Федерация. Программа расчета параметров Т-образной схемы замещения трехфазного асинхронного электродвигателя : № 2024611028 : заявл. 22.01.2024 : опубл. 26.01.2024 / Д. В. Дзюин.

Информация об авторах:

Дзюин Дмитрий Владленович

аспирант, ассистент кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, Author-ID-РИНЦ 1190013

Дмитриева Валерия Валерьевна

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, Scopus-Author ID 56007868500, Author-ID-РИНЦ 312404

17. Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. Stability of the Industrial Electrical Systems. Moscow: Nedra; 2010.

18. Dzyuin D.V. Program for Calculating the Parameters of a T-shaped Equivalent Circuit of a Three-Phase Asynchronous Electric Motor. The Certificate on Official Registration of the Computer Program in Russia. No. 2024611993; 2024 Jan 26.

Information about the authors:

Dzyuin Dmitry Vladlenovich

Postgraduate student, Assistant at the Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Author-ID-RSCI: 1190013.

Dmitrieva Valeria Valerievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Scopus-Author ID: 56007868500, Author-ID-RSCI: 312404

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

Статья поступила в редакцию 09.04.2024; одобрена после рецензирования 21.05.2024; принята к публикации 26.06.2024.

The article was submitted 09.04.2024; approved after reviewing 21.05.2024; accepted for publication 26.06.2024.

Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: aim-ru@mail.ru

Вёрстка А.Г. Малаханова. Редактор Д.А. Петраченко.

Сдано в набор 15.09.2024. Выход в свет 30.09.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,7.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

