

УДК 621.311

Алексей Евгеньевич Петров

ООО «Лаборатория РЗА»; ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», программист; аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: usetheforcealex@yandex.ru

Владимир Дмитриевич Лебедев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Совершенствование алгоритма расчета параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя и сравнение с существующими промышленными программами¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Расчет параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя по паспортным данным широко применяется в инженерной практике и реализован в ряде программных комплексов (например, MATLAB, ETAP, Power Factory и др.). Однако такие средства не всегда обеспечивают достоверное воспроизведение пусковых характеристик и корректный контроль отклонений от паспортных значений. В отдельных случаях наблюдаются физически некорректные результаты, например появление двух экстремумов на кривой электромагнитного момента. В отечественной практике разработаны алгоритмы, пригодные для адаптации и внедрения в современные расчетные средства, а также реализован программный прототип для моделирования электромеханических переходных процессов.

Материалы и методы. В качестве модели использована схема замещения асинхронного электродвигателя. Для аппроксимации зависимости параметров схемы от скольжения применены различные математические методы. Материалами исследования послужили паспортные и экспериментальные данные по 45 электродвигателям различной мощности, скорости вращения и назначения.

Результаты. Рассмотрены альтернативные способы аппроксимации зависимости параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя от скольжения. Особое внимание уделено подбору таких математических выражений, которые обеспечивают более высокую точность воспроизведения пусковых и номинальных характеристик. Для оценки эффективности предложенного подхода проведена серия расчетов на выборке из 45 электродвигателей с различной номинальной мощностью, скоростью вращения и промышленным назначением. Выявлены некоторая нестабильность и специфические особенности в работе существующих алгоритмов, реализованных в распространенных программных продуктах, включая случаи, приводящие к недостоверной форме электромеханической характеристики.

Выводы. Проведенное исследование показало, что использование альтернативных способов аппроксимации параметров схемы замещения позволяет значительно снизить погрешность в расчете пусковых и рабочих характеристик асинхронных электродвигателей по сравнению с базовыми методами. Предложенный подход продемонстрировал более устойчивое и точное воспроизведение паспортных параметров на широком наборе электродвигателей различного типа, что позволяет охватить широкий диапазон типовых режимов эксплуатации и повысить достоверность полученных выводов. Модернизация алгоритма аппроксимации зависимости параметров ротора от скольжения позволяет существенно повысить точность расчетов схемы замещения асинхронного электродвигателя, особенно в области пусковых характеристик. Предложенные выражения обеспечивают более корректную форму зависимости без усложнения вычислений. Разработанный подход предназначен и рекомендован для включения в отечественные инженерные программы, ориентированные на моделирование электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, схема замещения электродвигателя, пусковые характеристики, идентификация параметров, электромеханическая модель, инженерное программное обеспечение

Aleksey Evgenovich Petrov

LLC RPA Laboratory, Ivanovo State Power Engineering University, Programmer; Post graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: usetheforcealex@yandex.ru

Vladimir Dmitrievich Lebedev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

¹ Проведенное исследование является логическим продолжением научно-технических разработок, выполненных в рамках программы поддержки малых инновационных предприятий «СТАРТ-1» договор № 311ГС1ЦТС10-D5/80265.

The conducted study is a logical extension of scientific and technical studies carried out within the framework of the program to support small innovative enterprises "START-1", contract No. 311GS1TsTS10-D5/80265.

Improvement of the algorithm for calculating the equivalent circuit parameters of an induction motor and comparison with existing industrial software tools

Abstract

Background. The calculation of equivalent circuit parameters of induction motors according to nameplate data is widely used in engineering practice and implemented in several software packages (such as MATLAB, ETAP, Power Factory, and others). However, such tools do not always provide reliable reproduction of starting characteristics or accurate control of deviations from nameplate values. In some cases, physically inconsistent results are observed, such as the appearance of two extrema on the electromagnetic torque curve. In domestic practice, algorithms have been developed that are suitable for adaptation and integration into modern calculation tools, as well as a software prototype for simulating electromechanical transients.

Materials and methods. The study is based on equivalent circuit models of induction motors. Various mathematical approximation methods have been applied to describe the dependence of circuit parameters on slip. The materials include nameplate and experimental data of 45 induction motors of different power ratings, rotational speeds, and applications.

Results. Several alternative approaches to approximating the dependence of the equivalent circuit parameters of induction motors on slip have been examined. Particular attention has been devoted to the selection of mathematical formulations capable of ensuring improved accuracy in reproducing both starting and rated characteristics. To assess the effectiveness of the proposed methodology, a series of computations has been carried out on a dataset of 45 motors with varying rated power, rotational speeds, and industrial applications. The results of the study have revealed certain instabilities and specific features of existing algorithms implemented in widely used software packages, including cases that resulted in an unreliable representation of the electromechanical characteristic.

Conclusions. The conducted study has shown that the use of alternative approaches to approximating the equivalent circuit parameters makes it possible to significantly reduce the error when calculating the starting and operating characteristics of induction motors compared with conventional methods. The proposed approach has demonstrated more stable and accurate reproduction of nameplate parameters across a wide range of motor types, thereby covering a broad spectrum of typical operating conditions and improving the reliability of the obtained results. The modification of the rotor parameter approximation algorithm with respect to slip substantially enhances the accuracy of equivalent circuit calculations, particularly in the field of starting characteristics. The proposed expressions provide a more consistent functional form without complicating computations. The developed approach is intended for and recommended to be incorporated into domestic engineering software tools aimed at simulating electromechanical transients in power systems.

Key words: induction motor, equivalent circuit of an electric motor, starting characteristics, parameter identification, electromechanical model, engineering software

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.5.059-067

Введение. Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором широко применяются в различных отраслях промышленности благодаря своей надежности, простоте конструкции и высокой технологичности. Для эффективного анализа и проектирования систем электроснабжения, расчета режимов пуска, подбора пусковой аппаратуры и построения имитационных моделей необходимы точные данные о параметрах схемы замещения электродвигателя. Эти параметры, в частности активные и реактивные сопротивления статора и ротора, оказывают существенное влияние на расчет токов, моментов и энергетических показателей машины.

В инженерной практике и обучающих целях часто используются программные комплексы, такие как MATLAB, ETAP, Power Factory и др., в которых реализованы встроенные методы идентификации параметров схемы замещения по ограниченному набору исходных данных. Несмотря на удобство и распространенность, результаты таких расчетов не всегда отражают реальные характеристики конкретного двигателя, особенно в пусковых режимах. Это связано с тем, что используемые модели

ориентированы на обобщенные или типовые характеристики и не учитывают индивидуальные особенности конкретного оборудования.

Существующие методы [1–4] расчета схемы замещения включают в себя подходы на основе паспортных данных, опытов короткого замыкания и холостого хода, а также различные численные методы с подбором параметров. Однако классические реализации [5] зачастую имеют ограниченную точность, особенно при попытке воспроизвести пусковые характеристики. Это может привести к некорректной оценке токовых и нагрузочных режимов, а также к снижению достоверности результатов моделирования.

Ниже предложена модернизация существующего алгоритма расчета параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя [6]. Улучшенный алгоритм направлен на повышение точности воспроизведения рабочих характеристик двигателя за счет уточнения методики вычисления сопротивлений и реактивных составляющих, а также адаптации модели к паспортным данным. Для верификации предложенного подхода проведено сравнение рассчитанных по нему пусковых и рабочих характеристик с результатами, полученными с использованием MATLAB

и ЕТАР, а также с фактическими паспортными характеристиками.

Целью настоящего исследования является повышение точности определения параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя за счет модернизации вычислительного алгоритма и подтверждение его эффективности на практике. Полученные результаты могут быть применены при разработке специализированного программного обеспечения для инженерных расчетов и анализа режимов электроприводов.

Существующие подходы к расчету параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя могут основываться на различных методах, которые условно делятся на аналитические, экспериментальные и численно-итерационные. Каждый из подходов имеет свои преимущества и ограничения, зависящие от исходных данных и требуемой точности результата.

Наиболее широко распространен паспортный (аналитический) метод [1] и его производные методы [3, 4], основанный на использовании стандартных характеристик, указываемых производителем: номинальное напряжение, ток, мощность, коэффициент мощности, КПД и пусковые коэффициенты. При помощи упрощенных уравнений машин этот метод позволяет рассчитать эквивалентные параметры схемы замещения, но в силу обобщенности исходных данных он не обеспечивает высокой точности, особенно при анализе переходных процессов.

Другим распространенным и наиболее точным подходом является метод, построенный на основе двух опытов – холостого хода и короткого замыкания [7, 8], аналогичный тому, что применяется при определении параметров трансформаторов. Этот метод позволяет определить активные и реактивные составляющие сопротивлений, однако требует проведения испытаний на оборудовании, что не всегда возможно в условиях проектирования.

Современные программные комплексы реализуют автоматизированные процедуры идентификации параметров на основе сравнения с паспортными данными, а также на основе эмпирических моделей и встроенных библиотек типовых двигателей. Несмотря на то что такие решения удобны в использовании, точность их результатов может варьироваться: модели ориентированы на усредненные характеристики, а сами алгоритмы закрыты для пользователя и не поддаются адаптации под конкретные технические условия.

В этих системах имитационного моделирования применяются различные варианты схем замещения. Например, в MATLAB/Simulink (рис. 1) используется модель с параметрами, разделенными на стороны статора и ротора, включая трансформированные величины.

Математическое преобразование с допущением эквивалентных преобразований при условии $L_{21} = X_{21}$ и $L_{22} = X_{22}$, о.е., может быть записано в следующих выражениях:

$$R_2(s, R_{21}, X_{21}, R_{22}, X_{22}) = \frac{(R_{21} + R_{22})(R_{21}R_{22} - s^2 X_{21}X_{22})}{(R_{21} + R_{22})^2 + s^2 (X_{21} + X_{22})^2} + \frac{s^2 (X_{21} + X_{22})(R_{21}X_{22} + X_{21}R_{22})}{(R_{21} + R_{22})^2 + s^2 (X_{21} + X_{22})^2}, \quad (1)$$

$$X_2(s, R_{21}, X_{21}, R_{22}, X_{22}) = \frac{(R_{21} + R_{22})(R_{21}X_{22} + X_{21}R_{22})}{(R_{21} + R_{22})^2 + s^2 (X_{21} + X_{22})^2} + \frac{(X_{21} + X_{22})(R_{21}X_{22} - s^2 X_{21}X_{22})}{(R_{21} + R_{22})^2 + s^2 (X_{21} + X_{22})^2}. \quad (2)$$

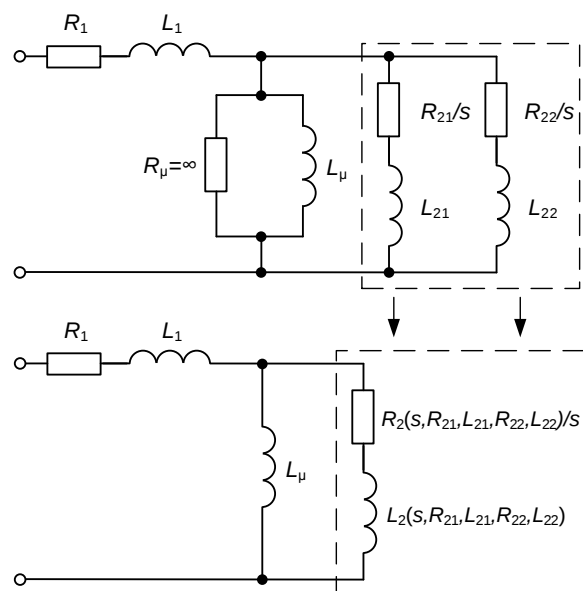


Рис. 1. Полная и эквивалентная схемы замещения АД, применяемые для расчетов в Simulink MATLAB: s – скольжение; R_1, L_1 – активное сопротивление и индуктивность рассеяния обмотки статора; L_μ – индуктивность цепи намагничивания; R_μ – активное сопротивление, моделирующее потери в цепи намагничивания; R_{21}/s и L_{21} – активное сопротивление и индуктивность рассеяния внутренней (рабочей) обмотки ротора; R_{22}/s и L_{22} – активное сопротивление и индуктивность рассеяния внешней (пусковой) обмотки ротора; $R_2(s, R_{21}, L_{21}, R_{22}, L_{22})/s$ – эквивалентное активное сопротивление пусковой и рабочей обмоток ротора; $L_2(s, R_{21}, L_{21}, R_{22}, L_{22})$ – эквивалентная индуктивность рассеяния пусковой и рабочей обмоток ротора

В MATLAB для расчета параметров электродвигателей часто используется подход, основанный на паспортных данных, таких как номинальная мощность, напряжение, ток и коэффициент мощности. Этот метод описан в [6] и позволяет получить оценку параметров схемы замещения

исходя из общедоступных характеристик двигателя. Однако программа не всегда предупреждает пользователя о возможных отклонениях от паспортных значений. Если в ходе расчета параметры, рассчитанные для схемы замещения, существенно отклоняются от паспортных данных, это может указывать на проблемы в модели или некорректность исходных данных.

Кроме того, программа требует значительных вычислительных мощностей от ПК, особенно при расчете сложных схем, что может приводить к длительному времени обработки и замедлению работы при моделировании больших систем или учете множества параметров.

В ЕТАР (рис. 2) применяется упрощенная модель с возможностью выбора параметров в соответствии с данными пользователя. Алгоритм расчета параметров использует итерационные методы для решения уравнений схемы замещения, при этом кроме паспортных значений необходимо задаваться дополнительными параметрами – требуемой точности (*Precision*) и фактора ускорения (*Acceleration Factor*).

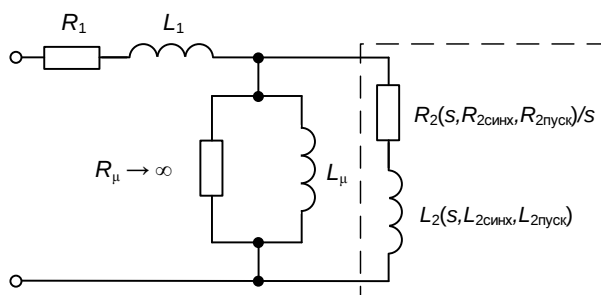


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения АД, применяемая для автоматизированных расчетов в ЕТАР: $R_2(s, R_{2\text{синх}}, R_{2\text{пуск}})/s$ – эквивалентное активное сопротивление пусковой и рабочей обмоток ротора; $L_2(s, L_{2\text{синх}}, L_{2\text{пуск}})$ – эквивалентная индуктивность рассеяния пусковой и рабочей обмоток ротора

Результаты расчета получаются достаточно близкими к номинальным параметрам, хотя при повторных расчетах получаются отличиями от данных предыдущего расчета. Дальнейшая работа с моделью возможна только после полного обновления паспортных значений на достигнутые значения, фактически программа изменяет ранее введенные паспортные данные, что может вводить в заблуждение неопытных пользователей. В сравнении с MATLAB, моделирование в программе ЕТАР – это более безупречный подход для ведения сложных инженерных расчетов – инженер в курсе ситуации и может принимать решение о допустимости или недопустимости отклонений параметров.

Однако для эффективного использования ЕТАР требуется уровень подготовки, включающий в себя базовые знания в области электротехники, опыт работы с программами для расчета и моделирования, а также понимание численных методов и точность вычислений.

Одним из современных программных решений, реализующих расчет пусковых характеристик асинхронных электродвигателей, является модуль самозапуска в составе программного комплекса DigSILENT PowerFactory [6]. Данный модуль предназначен для анализа динамики восстановления напряжения и оценки возможности самозапуска электродвигателей после кратковременного обесточивания. Он учитывает электромеханические переходные процессы и позволяет получать детализированные кривые тока и момента на пуске. Однако в силу лицензионных ограничений и высокой стоимости доступ к этому программному обеспечению затруднен, что ограничивает возможность его использования в исследовательских и учебных целях.

Выбор конкретной схемы влияет на точность расчета переходных и установившихся режимов, особенно в пусковой области.

Многочисленные исследования в области определения параметров схемы замещения асинхронных электродвигателей были проведены отечественными учеными [1, 2], а также их коллегами [6] и [9]. Результаты их трудов составили основу разработки алгоритмов для определения параметров схемы замещения АД. Эти алгоритмы разрабатывались с учетом специфики эксплуатации и проектирования электродвигателей, используемых в отечественной промышленности. В отличие от коммерческих решений, отечественные разработки подробно описаны в научной литературе и технических руководствах. Описание включает в себя подробные математические модели и шаги расчета, что позволяет их легко реализовать в различных программных средах. Благодаря этому они становятся доступными для использования в промышленной практике, а также для разработки собственных программных решений, соответствующих специфическим требованиям и условиям эксплуатации.

С учетом задач технологического суверенитета и необходимости независимости от зарубежных программных решений целесообразно рассматривать разработку собственного специализированного программного обеспечения для расчета параметров электродвигателей и моделирования их рабочих режимов.

Один из реализованных алгоритмов в облачном сервисе «Лаборатория РЗА» подробно описан в [3] и основывается на расчете параметров по схеме (рис. 3).

Точный подход к нахождению зависимостей $R_2(s)$ и $X_2(s)$ подробно описан и экспериментально подтвержден в [1], однако для упрощения автоматизированных расчетов в [2, 3] предлагается использовать следующие аппроксимации:

$$R_2(s, R_{2\text{пуск}}, R_{2\text{синх}}) = R_{2\text{синх}} + (R_{2\text{пуск}} - R_{2\text{синх}})s^{0.5}; \quad (3)$$

$$X_2(s, X_{2\text{пуск}}, X_{2\text{синх}}) = \frac{X_{2\text{пуск}} X_{2\text{синх}}}{X_{2\text{пуск}} + (X_{2\text{синх}} - X_{2\text{пуск}})s^{0.5}}. \quad (4)$$

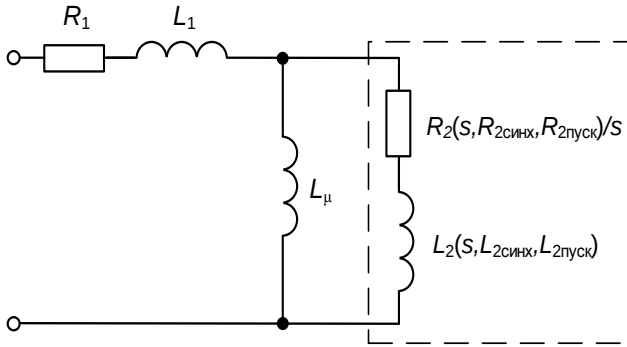


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения АД, предложенная для автоматизированного расчета по [3]

При правильно рассчитанных параметрах схемы замещения АД параметры режима должны быть равны соответствующим каталожным данным $M_{пуск}$, $I_{пуск}$, $M_{ном} = 1$, $Q_{ном} = \sin \varphi_{ном}$, $M_{макс}$:

$$P = U^2 \operatorname{Re} \left[\frac{1}{Z(\text{slip})} \right]; \quad (5)$$

$$Q = U^2 \operatorname{Im} \left[\frac{1}{Z(\text{slip})} \right]; \quad (6)$$

$$I_1 = \frac{U}{|Z(\text{slip})|}; \quad (7)$$

$$M = \frac{1}{\eta_{ном} \cos \varphi_{ном}} [P - I_1^2 R_1]; \quad (8)$$

$$Z(\text{slip}) = R_{2c} + jX_1 + \left(\frac{1}{jX_\mu} + \frac{1}{\frac{R_2(\text{slip})}{s} + jX_2(\text{slip})} \right)^{-1}. \quad (9)$$

Для решения системы пяти нелинейных алгебраических уравнений применяется метод Гаусса–Зейделя с ускорением сходимости итерационного процесса решения. Для этого в каждом из уравнений системы определяется доминирующий в этом уравнении параметр схемы замещения и на каждом шаге работы алгоритма вычисляется отклонение и сравнивается с ε :

$$R_{2пуск}^{(i+1)} = R_{2пуск}^{(i)} \left(1 + \frac{\Delta M_{пуск}}{M_{пуск}} \right), \quad (10)$$

где $\Delta M_{пуск} = M_{пуск} - M_{пуск}^{(i)}$;

$$X_{пуск}^{(i+1)} = X_{пуск}^{(i)} \left(1 - \frac{\Delta I_{пуск}}{I_{пуск}} \right), \quad (11)$$

где $\Delta I_{пуск} = I_{пуск} - I_{пуск}^{(i)}$;

$$R_{2синх}^{(i+1)} = R_{2синх}^{(i)} (1 + \Delta M_{ном}), \quad (12)$$

где $\Delta M_{ном} = M_{ном} - M_{ном}^{(i)}$;

$$X_\mu^{(i+1)} = X_\mu^{(i)} \left(1 - \frac{\Delta Q_{ном}}{Q_{ном}} \right), \quad (13)$$

где $\Delta Q_{ном} = Q_{ном} - Q_{ном}^{(i)}$;

$$X_{кр}^{(i+1)} = X_{кр}^{(i)} \left(1 - \frac{\Delta M_{макс}}{M_{макс}} \right), \quad (14)$$

где $\Delta M_{макс} = M_{макс} - M_{макс}^{(i)}$;

$$|\Delta M_{пуск}| \cup |\Delta I_{пуск}| \cup |\Delta M_{ном}| \cup |\Delta Q_{ном}| \cup |\Delta M_{макс}| < \varepsilon, \quad (15)$$

где ε – требуемая точность расчетов последовательных приближений ($\varepsilon = 0,0001$).

Модернизированный алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя. В процессе выполнения таких расчетов важную роль играют методы аппроксимации, применяемые для определения эквивалентных сопротивлений двигателя в [3]. В базовом алгоритме, используемом для расчетов, применяются две аппроксимационные формулы, позволяющие связать паспортные данные двигателя с параметрами схемы замещения. Однако при выполнении серии расчетов была выявлена чувствительность результатов расчета к форме используемой функции.

Основная проблема заключается в том, что существующий алгоритм обеспечивает требуемую сходимость, однако качественная оценка рабочих характеристик может показать значительное отклонение от паспортных данных. Особенно это заметно для кратности максимального и пускового моментов ЭД, что может привести к ошибочной оценке результатов при моделировании переходных процессов.

Стандартное выражение $s^{0,5}$, применяемое в базовом алгоритме, не обеспечивает необходимого соответствия между расчетными и паспортными характеристиками электродвигателя. В связи с этим предложено два альтернативных варианта:

1) выражение s^{1-s} , которое обеспечивает более точное приближение к реальным нелинейным зависимостям $R_2(s)$ и $X_2(s)$:

$$R_2(s, R_{2пуск}, R_{2синх}) = R_{2синх} + (R_{2пуск} - R_{2синх}) s^{1-s}; \quad (16)$$

$$X_2(s, X_{2пуск}, X_{2синх}) = \frac{X_{2пуск} X_{2синх}}{X_{2пуск} + (X_{2синх} - X_{2пуск}) s^{1-s}}; \quad (17)$$

2) упрощенный линейный вариант s , обладающий минимальной математической сложностью и приемлемой точностью для ряда типовых задач:

$$R_2(s, R_{2пуск}, R_{2синх}) = R_{2синх} + (R_{2пуск} - R_{2синх}) s; \quad (18)$$

$$X_2(s, X_{2пуск}, X_{2синх}) = \frac{X_{2пуск} X_{2синх}}{X_{2пуск} + (X_{2синх} - X_{2пуск}) s}. \quad (19)$$

Оба подхода были реализованы в расчетной модели и использованы для сравнительного анализа, что позволило оценить баланс между точностью и вычислительной эффективностью при выборе конкретной аппроксимации.

Сравнительный анализ алгоритмов.

Для количественной оценки точности предложенных решений был выполнен анализ на основе паспортных данных по 45 АД с номинальным напряжением 6–10 кВ, различающихся по номинальной скорости вращения, мощности и назначению. В рассмотренный набор вошли машины с частотой вращения от 600 до 3000 об/мин, что охватывает как тихоходные, так и высокоскоростные двигатели. Мощностной диапазон включал как электродвигатели средней мощности, используемые в насосных и вентиляторных установках, так и мощные агрегаты, применяемые для привода дробильного и обогащительного оборудования. Такой состав выборки позволил оценить универсальность и точность модернизированного алгоритма в условиях разнообразных режимов работы и типов нагрузки.

Сравнение модернизированного алгоритма с существующими решениями выполнялось по двум основным критериям: точность расчета пусковых характеристик и эффективность вычислений. В качестве эталонных данных использовались паспортные значения кратностей пускового тока $I_{\text{пуск}}$, пускового момента $M_{\text{пуск}}$ и максимального момента $M_{\text{макс}}$, представленные в технической документации на электродвигатели.

Для оценки точности были сопоставлены результаты, полученные по модернизированному алгоритму, с расчетами, выполненными по исходной версии алгоритма, а также с результатами, полученными в средах MATLAB и ETAP. Расчетные значения демонстрируют хорошее согласование с паспортными данными: отклонения по ключевым характеристикам не превышают допустимых инженерных пределов.

Эффективность алгоритма оценивалась по устойчивости численного решения при варьировании параметров двигателя и питающей сети. Отказ от вычисления корня в критических участках расчета позволил повысить надежность метода: при отрицательных значениях скольжения отсутствует переход к комплексным величинам, что предотвращает срыв сходимости и повышает общую стабильность расчетов.

Обобщенные статистические данные, характеризующие точность различных методов расчета по отношению к паспортным значениям, представлены в таблице. Проведенный анализ свидетельствует о заметном снижении погрешности при использовании модернизированных расчетных выражений, особенно в части определения пускового и максимального электромагнитных моментов. Полученные результаты подтверждают обоснованность и эффективность предложенной модификации алгоритма.

Сравнение погрешности расчета моментов по различным алгоритмам расчета параметров

$\varepsilon, \%$	Рассматриваемые алгоритмы аппроксимации			ETAP	MATLAB Simulink
	$s^{0.5}$	s	s^{1-s}		
1	43	0	0	0	14
5	11	0	0	0	2
10	2	0	0	0	0

Двигатели, для которых результат расчета пусковых параметров дал погрешность, превышающую 10 %, представлены двумя образцами: ВА3-215-109-6 и HXUR-1005G1-1MB3. Сравнительный анализ результатов, полученных с использованием модифицированных аппроксимационных выражений, а также данных из широко используемых программных комплексов MATLAB и ETAP, представлен на рис. 4, 5.

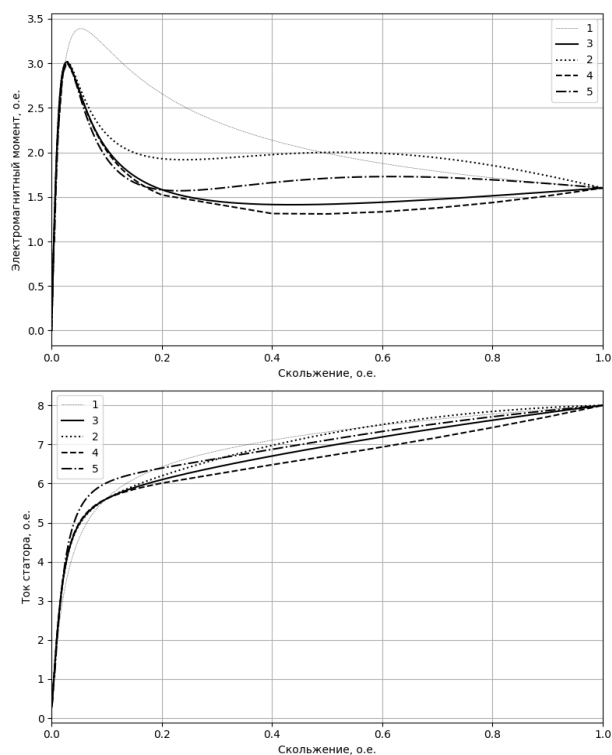


Рис. 4. Пусковые характеристики электродвигателя ВА3-215-109-6 ($I_{\text{пуск}} = 8$; $M_{\text{пуск}} = 1,6$; $M_{\text{макс}} = 3,0$): 1 – оригинальный алгоритм, $s^{0.5}$; 2 – нелинейная модификация алгоритма, s^{1-s} ; 3 – линейная модификация алгоритма, s ; 4 – алгоритм ETAP; 5 – алгоритм MATLAB/Simulink

В ходе расчетов на ЭД марки WEG-355J-H-06 алгоритм, реализованный в MATLAB, продемонстрировал anomalous results: на кривой электромагнитного момента было зафиксировано два локальных экстремума при разных скольжениях: $M_{\text{макс}}(0,043) = 2,07416179$ о.е. и $M_{\text{макс}}(0,28) = 2,0741633$ о.е., что не соответствует форме кривой, описанной в [1]. Пусковые характеристики ЭД WEG-355J-H-06 представлены на рис. 6.

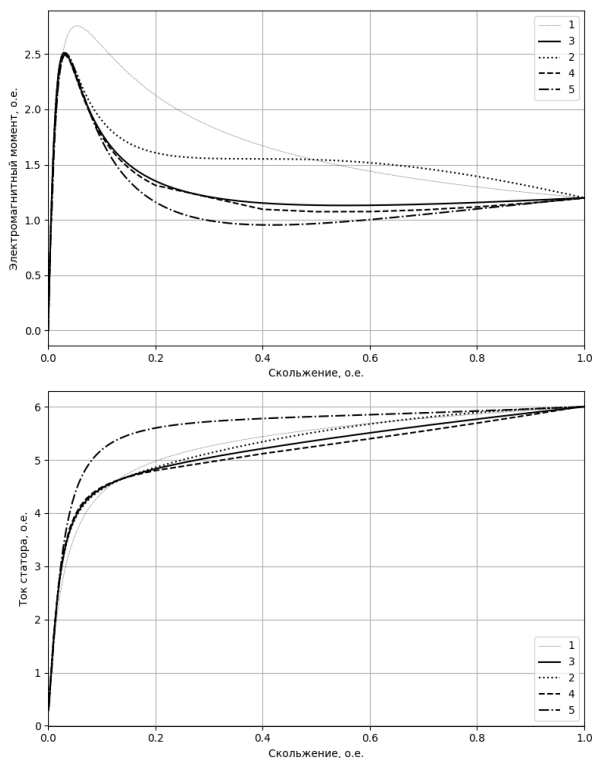


Рис. 5. Пусковые характеристики электродвигателя НХUR-1005G1-1МВ3 ($I_{\text{пуск}} = 6$; $M_{\text{пуск}} = 1,2$; $M_{\text{макс}} = 2,5$): 1 – оригинальный алгоритм, $s^{0,5}$; 2 – нелинейная модификация алгоритма, s^{1-s} ; 3 – линейная модификация алгоритма, s ; 4 – алгоритм ЕТАР; 5 – алгоритм MATLAB/Simulink

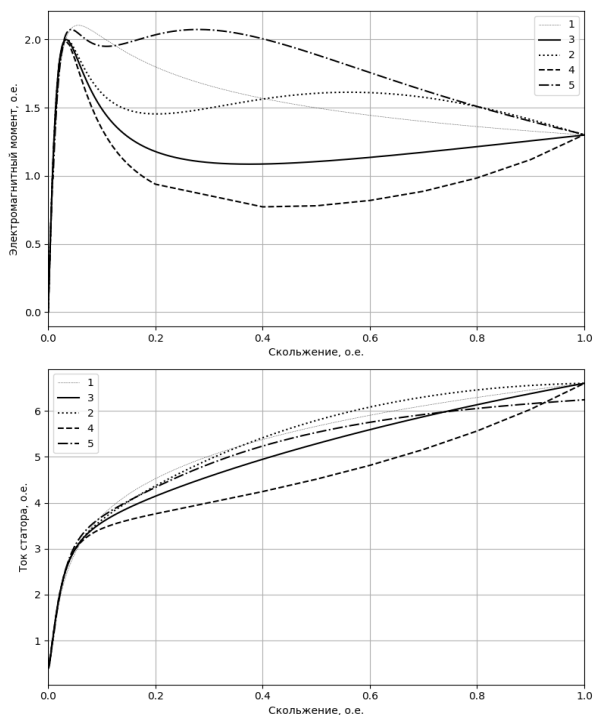


Рис. 6. Пусковые характеристики электродвигателя WEG-355J-H-06 ($I_{\text{пуск}} = 6,6$; $M_{\text{пуск}} = 1,3$; $M_{\text{макс}} = 2$): 1 – оригинальный алгоритм, $s^{0,5}$; 2 – нелинейная модификация алгоритма, s^{1-s} ; 3 – линейная модификация алгоритма, s ; 4 – алгоритм ЕТАР; 5 – алгоритм MATLAB/Simulink

Подобное поведение может быть обусловлено некорректной интерполяцией или аппроксимацией параметров схемы замещения, особенно при автоматическом подборе сопротивлений ротора без учета ограничений на монотонность характеристик.

Такое расхождение указывает на необходимость более строгой проверки адекватности полученных характеристик даже при использовании проверенных программных комплексов и подчеркивает актуальность разработки альтернативных, устойчивых алгоритмов с контролируемой точностью. На этом же ЭД расчетное значение $I_{\text{пуск}}$ не достигло паспортного значения, что может привести к заниженной оценке пусковых токов и, как следствие, некорректной настройке защит и снижению надежности работы оборудования.

Анализ результатов. Результаты, полученные с применением исходного алгоритма, выявили значительное расхождение с паспортными значениями. Так, для двух двигателей погрешность по кратности $M_{\text{макс}}$ превысила 10 %, у 12 двигателей отклонение составило более 5 %, а в 43 из 45 случаев (96 % от общего числа) расхождение по $M_{\text{пуск}}$ и/или $M_{\text{макс}}$ превышало 1 %.

Такие значения свидетельствуют о недостаточной точности исходных аппроксимационных зависимостей, используемых в алгоритме, особенно в области низких скольжений, где поведение ротора определяется сложными нелинейными эффектами, не учтенными в оригинальной версии алгоритма [3].

Расчеты, выполненные с использованием функционала MATLAB, показали существенно лучшие результаты. В частности, лишь у двух двигателей погрешность по кратности $M_{\text{макс}}$ превысила 5 %, а у 12 двигателей была зафиксирована погрешность более 1 % по $M_{\text{пуск}}$ и $M_{\text{макс}}$. Хотя это говорит о приемлемом уровне точности, достигнутом в MATLAB, сохраняется вероятность появления значимых отклонений, особенно в случае нестандартных двигателей или при отсутствии точной корректировки входных данных. Кроме того, среда MATLAB не всегда информирует пользователя о накоплении значительных отклонений от паспортных значений, что требует дополнительной верификации полученных результатов.

Усовершенствованный алгоритм, предложенный в рамках настоящего исследования, показал высокую степень соответствия паспортным данным. Ни в одном из 45 случаев отклонение по пусковому моменту ($M_{\text{пуск}}$) или максимальному моменту ($M_{\text{макс}}$) не превысило 1 %, что демонстрирует его сопоставимую точность с широко используемым программным обеспечением ЕТАР, которое также показало стабильные результаты без превышения 1 % погрешности.

Важно отметить, что в рамках проектной деятельности и эксплуатационного анализа ЭД

основной интерес, как правило, представляет электромеханическое поведение агрегатов, а не внутренние электромагнитные переходные процессы. В связи с этим более корректным и прикладным представляется сравнение результатов усовершенствованных алгоритмов именно с промышленным пакетом ETAP, который также ориентирован на расчет установившихся и квазистационарных режимов. Высокая точность и стабильность результатов усовершенствованного алгоритма при существенно меньших требованиях к вычислительным ресурсам и прозрачности расчета подтверждают его практическую применимость для широкого круга задач, включая проектирование, технический аудит и цифровое моделирование систем электроснабжения с электродвигательными нагрузками.

Выводы. На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная модернизация алгоритма расчета параметров схемы замещения АД основана на замене аппроксимации $s^{0.5}$ на более точные выражения s^{1-s} и s .

2. Проведенный сравнительный анализ показал значительное снижение погрешности расчета пусковых характеристик по сравнению с исходным алгоритмом – ни в одном из 45 случаев отклонение не превысило 1 %, что сопоставимо с промышленными программами ETAP и MATLAB.

3. Разработанный подход универсален и применим для широкого класса АД 6–10 кВ, эксплуатируемых в тяжелых условиях, включая обогатительные предприятия.

4. Модернизированный алгоритм отличается прозрачностью математического описания, не требует высоких вычислительных ресурсов и может быть реализован в инженерных расчетных комплексах без необходимости в дорогостоящем программном обеспечении.

5. Результаты подтверждают возможность практического использования предложенного решения в задачах проектирования и технического анализа режимов работы электродвигательных нагрузок, включая расчет самозапуска на основе существующих методик [10].

Сравнение результатов, полученных с использованием модернизированных алгоритмов, с данными, рассчитанными в промышленных программных комплексах, уже демонстрирует положительный эффект: точность воспроизведения ключевых характеристик электродвигателей значительно повышается. Однако, несмотря на успешную верификацию в программной среде, проведение натурных испытаний остается необходимым этапом для окончательной оценки достоверности предложенного подхода.

В перспективе планируется использование записей реальных пусков электродвигателей, полученных с помощью регистраторов аварийных событий или систем мониторинга. Анализ таких осциллограмм позволит оценить

динамику изменения электрических и механических параметров в условиях реальной эксплуатации, а также сравнить ее с результатами расчета по усовершенствованному алгоритму. Это даст возможность не только подтвердить его точность, но и адаптировать модель под конкретные типы машин, режимы работы, а также реализовать модель АД для расчета электромагнитных переходных процессов.

Проведенное исследование является логическим продолжением научно-технических разработок, выполненных в рамках программы поддержки малых инновационных предприятий «СТАРТ-1». На текущий момент описанные алгоритмы реализованы на сайте компании <https://labrza.ru> в составе облачного сервиса «Лаборатория РЗА». Получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [11, 12], что подтверждает юридическую защиту и авторское право компании на разработанное программное обеспечение. Сервис обеспечивает доступ к инструментам расчета режимов работы сетей промышленного электроснабжения и способствует практическому применению разработанных алгоритмов в инженерной и проектной деятельности.

Список литературы

1. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
2. Жуков В.В. Короткие замыкания в узлах комплексной нагрузки электрических систем / под ред. проф. А.Ф. Дьякова. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – 224 с.
3. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 424 с.
4. Дмитренко А.М., Казакова Е.Ю., Атаманов М.Н. Анализ переходных процессов дифференциальных защит трансформаторов с мощной двигательной нагрузкой // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1(6). – С. 38–42.
5. Шуйн В.А., Фролова О.В. Моделирование режимов самозапуска электродвигателей собственных нужд электростанций: УМП / ИГЭУ. – Иваново, 2004. – 64 с.
6. Pedra Joaquin. On the Determination of Induction Motor Parameters From Manufacturer Data for Electromagnetic Transient Programs // IEEE® Transactions on Power Systems. – 2008. – Vol. 23, No. 4. – P. 1709–1718.
7. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергия, 1968. – 575 с.
8. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2007.
9. Hossein-Ali Kakai. Dynamic Analysis of Three Phase Induction Motor in DigSilent Powerfactory. ENG460 Engineering Thesis, School of Engineering and Information Technology, Murdoch University. – Perth, Australia, 2014. – 76 p.

10. **Методика** расчета режимов перерыва питания и самозапуска электродвигателей 3–10 кВ собственных нужд электростанций упрощенными методами / сост. В.Х. Георгиади. – М.: ОРГРЭС, 1992. – 144 с.

11. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619089 Российская Федерация. Облачный сервис «Лаборатория РЗА» / А.С. Лифшиц, А.А. Яблоков, А.Ю. Мурзин, А.Е. Петров, А.В. Панащенко; опубл. 14.04.2025.

12. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664870 Российская Федерация. Программа расчета параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя с номинальным напряжением до и выше 1 кВ / А.Е. Петров; опубл. 2024.

References

1. Syromyatnikov, I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh elektrodvigatelay* [Operating Modes of Induction and Synchronous Motors]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 240 p.

2. Zhukov, V.V. *Korotkie zamykaniya v uzлах kompleksnoy nagruzki elektricheskikh sistem* [Short circuits in complex load nodes of electrical systems]. Moscow: Izdatel'stvo MPEI, 1994. 224 p.

3. Gamazin, S.I., Stavtsev, V.A., Tsyruk, S.A. *Perekhodnye protsessy v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya, obuslovlennye elektrodvigatel'noy nagruzkoy* [Transient Processes in Industrial Power Supply Systems Caused by Motor Loads]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 1997. 424 p.

4. Dmitrenko, A.M., Kazakova, E.Yu., Atamanov, M.N. *Analiz perekhodnykh protsessov differentsial'nykh zashchit transformatorov s moshchnoy dvigatel'noy nagruzkoy* [Analysis of Transient Processes in Transformer Differential Protection with Heavy Motor Loads]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2012, no. 1(6), pp. 38–42.

5. Shuin, V.A., Frolova, O.V. *Modelirovanie rezhimov samozapuskа elektrodvigatelay sobstvennykh*

nuzhd elektrostantsiy: UMP / IGEU [Modeling of self-starting modes of electric motors for auxiliary needs of power plants: UMP / ISPU]. Ivanovo, 2004. 64 p.

6. Pedra, Joaquin. On the Determination of Induction Motor Parameters From Manufacturer Data for Electromagnetic Transient Programs. *IEEE® Transactions on Power Systems*, November 2008, vol. 23, no. 4, pp. 1709–1718.

7. Zherve, G.K. *Promyshlennyye ispytaniya elektricheskikh mashin* [Industrial Testing of Electrical Machines]. Leningrad: Energiya, 1968. 575 p.

8. Vol'dek, A.I., Popov, V.V. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electric Machines. AC Machines]. Saint-Petersburg: Piter, 2007.

9. Hossein-Ali, Kakai. *Dynamic Analysis of Three Phase Induction Motor in DigSilent Powerfactory*. ENG460 Engineering Thesis, School of Engineering and Information Technology, Murdoch University. Perth, Australia, 2014. 76 p.

10. Georgiadi, V.Kh. (ed.) *Metodika rascheta rezhimov pereryva pitaniya i samozapuskа elektrodvigatelay 3–10 kV sobstvennykh nuzhd elektrostantsiy uproshchennymi metodami* [Methodology for Calculating Power Interruption and Self-Start Modes of 3–10 kV Auxiliary Power Motors at Power Plants Using Simplified Methods]. Moscow: ORGRES, 1992. 144 p.

11. Lifshits, A.S., Yablokov, A.A., Murzin, A.Yu., Petrov, A.E., Panashchenko, A.V. *Oblachnyy servis «Laboratoriya RZA»* [Cloud service “Laboratory RZA”]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM RF* [Certificate of State Registration of Computer Program in Russia]. No. 2025619089, 2025.

12. Petrov, A.E. *Programma rascheta parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo elektrodvigatelya s nominal'nyim napryazheniem do i vyshe 1 kV* [Program for calculating the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous electric motor with a rated voltage of up to and above 1 kV]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM RF* [Certificate of State Registration of Computer Program in Russia]. No. 2024664870, 2024.