

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.313-57:621.313.3.025.3-78:621.313.333.2

EDN: QGNDOD

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-303-319



## Прототип автоматики контроля успешности пуска асинхронных двигателей в локальных системах энергоснабжения

И.В. Дулов<sup>1✉</sup>, А.Г. Фишов<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Резюме.** Цель – разработка и испытания прототипа интеллектуальной автоматики контроля успешности пусков асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором на физической модели локальной системы энергоснабжения. В прототипе реализован поэтапный прогностический контроль процесса, на каждом из которых на основе моделей критических параметров двигателя и питающей сети проверяются частичные условия его успешности. Разработка базируется на использовании программного комплекса LabVIEW, методов параметрической идентификации, физического моделирования, фильтрации аналоговых и цифровых сигналов, теории автоматического регулирования, математического анализа и статистики. Экспериментально доказана возможность и эффективность предиктивного контроля успешности пуска асинхронного двигателя в локальных системах энергоснабжения по величине, скорости и характеру изменения режимных параметров статорных обмоток двигателя без непосредственного измерения частоты вращения его вала. Показано, что погрешность разработанных моделей для определения критических параметров режима, определяющих успешность пуска асинхронного двигателя, не превышает 4%. Установлено, что погрешность прогностической оценки продолжительности пуска асинхронного двигателя не превышает 14%. Показано, что в 91% экспериментов с пусками асинхронного двигателя на физической модели локальной системы энергоснабжения при вариации схемно-режимных условий прототип автоматики достоверно идентифицировал успешность/неуспешность пуска двигателя на разных этапах процесса. При выявлении неуспешности прототип обеспечивал прерывание пусков на ранних стадиях. В результате проведенных исследований случаев отсутствия выдачи автоматикой команды на прерывание процесса пуска в условиях его неуспешности не зафиксировано. Таким образом, применение интеллектуальной автоматики контроля успешности пусков асинхронных двигателей в локальных системах энергоснабжения позволит снизить вероятности повреждения двигателей и оборудования питающих сетей, сохранить ресурс их работоспособности и повысить надежность электроснабжения потребителей.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, прямой пуск, контроль успешности пуска, локальная система энергоснабжения, критические параметры режима, автоматика, моделирование

**Для цитирования:** Дулов И.В., Фишов А.Г. Прототип автоматики контроля успешности пуска асинхронных двигателей в локальных системах энергоснабжения // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 303–319. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-303-319>. EDN: QGNDOD.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Prototype of an automatic system for monitoring the success of starting asynchronous motors in local power supply systems

Ilya V. Dulov<sup>1✉</sup>, Alexander G. Fishov<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** The present study aims to develop and test a prototype of an intelligent automatic system for monitoring the success of starting asynchronous motors with a squirrel-cage rotor using the physical model of a local power supply system. The prototype implements stepwise predictive control, which checks the partial conditions of the process success at each step based on critical parameter models of both the engine and the supply network. The development is based on the use of the LabVIEW software suite, parametric identification methods, physical simulation, analog and digital signal filtering, auto-regulation theory, mathematical analysis, and statistics. The study experimentally proved the possibility and effectiveness of predictive start-up control for asynchronous motors of local power supply systems in terms of the magnitude, rate, and pattern of variations in the operating parameters

of motor stator windings without a direct measurement of the shaft velocity. The error of the developed models for determining the critical mode parameters, affecting the success of starting the asynchronous motor, is demonstrated to be less or equal to 4%. The error in the predictive estimate of the start-up duration for an asynchronous motor did not exceed 14%. It is demonstrated that in 91% of experiments with the start-ups of an asynchronous motor using the physical model of a local power supply system under the variations of circuit-mode conditions, the automatic system prototype reliably identified the success/failure of the engine start at various stages of the process. If a failure was detected, the prototype ensured the interruption of start-ups in the early stages. The studies revealed no cases of non-issuance by the automatic system of a command to interrupt the start-up process under the conditions of its failure. Therefore, intelligent automatic systems for monitoring the success of starting asynchronous motors in local power supply systems will reduce the likelihood of damage to motors and equipment of power supply networks, preserve their serviceability, and improve the reliability of power supply to consumers.

**Keywords:** induction motor, direct-on-line-start, start-up success monitoring, local power supply system, critical mode parameters, automatic equipment, modeling

**For citation:** Dulov I.V., Fishov A.G. Prototype of an automatic system for monitoring the success of starting asynchronous motors in local power supply systems. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):303-319. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-303-319>. EDN: QGNDOD.

## ВВЕДЕНИЕ

Современная отечественная энергетическая отрасль развивается по пути декарбонизации, диджитализации и децентрализации. Декарбонизация предполагает снижение доли углеродного топлива при производстве электроэнергии и поэтапный переход к развитию и применению возобновляемой энергетики. Диджитализация (цифровая трансформация) предполагает переход к цифровым технологиям с новыми принципами и способами интеллектуального управления объектами. Под децентрализацией понимается развитие распределенной малой генерации (МГ) и переход от централизованного управления режимами энергосистем с иерархической структурой к децентрализованному (локальному) [1]. В результате преобразований будут формироваться интеллектуальные электроэнергетические системы SmartGrid с открытой архитектурой, базирующиеся на использовании инновационных технологий и решений.

Децентрализация энергоснабжения приводит к появлению значительного количества локальных систем энергоснабжения на базе новых источников электрической и тепловой энергии малой мощности или создаваемых путем реконструкции котельных с их преобразованием в когенерационные электростанции [2, 3]. Объекты с МГ могут быть нескольких видов: изолированные от внешних сетей, интегрированные с внешней сетью без возможности автономной работы и гибридные сбалансированные локальные системы энергоснабжения (ЛСЭ) с возможностями работы как в составе внешней сети, так и автономно [4, 5]. Проблема пуска круп-

ных асинхронных двигателей наиболее остро возникает в автономных режимах ЛСЭ, когда генераторные агрегаты должны самостоятельно обеспечивать возможность пусков асинхронных двигателей (АД) [6], при этом мощности суммарной генерации и крупных двигателей могут быть соизмеримыми.

Пуск АД оказывает сильное влияние на режим электрической сети, нарушая баланс активной и реактивной мощностей в ЛСЭ со значительными изменениями напряжения и частоты. Возникающие отклонения режимных параметров способны приводить к появлению аварийных режимов с каскадной потерей устойчивости работающих двигателей и/или отключением генераторных агрегатов с последующей потерей энергоснабжения всего энергорайона.

Следует учитывать, что в качестве первичных двигателей генераторов часто применяются газопоршневые (ГПУ) или газотурбинные (ГТУ) установки [7], крайне чувствительные к резким набросам/сбросам мощности, чувствительны к длительным отклонениям частоты от номинальной. Работа на пониженной частоте приводит к появлению дополнительной вибрации лопаток/поршней, которая может повредить двигатель энергоустановки [8].

Для снижения влияния пусков АД на питающую сеть разработан ряд способов [9–11], которые разделяются на две группы: классические (трансформаторный, реостатный и т.д.); на базе силовой электроники (частотный и плавный пуск). Для применения классических способов необходимы специализированные схемы подключения и дополнительное оборудование, комбинация которых

позволяет обеспечить его успешность путем создания подходящих условий для гарантированного пуска, зачастую без механической нагрузки. Для второй группы способов пуска требуется дополнительное дорогостоящее оборудование на базе силовой электроники, которое позволяет управлять процессом включения АД.

Контроль успешности пуска АД в представленных способах осуществляется либо элементами управления преобразовательных устройств (происходит опосредованно, например, при превышении уставки по предельному потребляемому току преобразовательное устройство отключается), либо при помощи визуального контроля (непосредственного наблюдения за скоростью при пуске двигателя). При этом отключение АД от ПС производится только по факту отклонения подконтрольных параметров (напряжение, ток, частота, продолжительность и т.д.) от допустимых значений без прогноза их изменения в процессе пуска, что является недостатком существующих способов.

Малозатратным средством обеспечения эффективности применения прямого пуска АД в ЛСЭ может служить специальная автоматика прогностического контроля его успешности с противоаварийным прерыванием при необходимости. Ее применение позволит предотвращать повреждение подконтрольного двигателя, оборудования ПС, а также сохранять их ресурс работоспособности, прерывая неуспешные пуски АД на ранних стадиях.

Ранее были обоснованы и в [12] представлены условия успешности пуска АД в ЛСЭ, модели прогностической оценки его успешности, а также результаты испытания реализующих их алгоритма способа поэтапного контроля на цифровой модели ЛСЭ.

С целью получения научно-технического задела (НТЗ), достаточного для перехода к стадии опытно-конструкторских работ по созданию опытного образца, в данной работе представлены результаты разработки и испытания на физической модели ЛСЭ прототипа автоматики контроля успешности пусков АД. При этом под прототипом понимается устройство, реализующее базовую функциональность будущего серийного изделия, достаточную для оценки его работоспособности и эффективности.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### ***Условия и работа прототипа автоматики прогностического контроля успешности пуска АД.***

Факторы, влияющие на успешность пуска АД в ЛСЭ, могут быть разделены на объектные и системные. Объектные, зависящие от параметров подконтрольного двигателя, определяют критические параметры для АД в необходимых и достаточных условиях успешности пуска. Системные, зависящие от параметров схемы энергоснабжения, определяют критические параметры для ПС, а также ее фактическое состояние в необходимых и достаточных условиях успешности пуска.

Под условиями успешности пуска понимаются требования к режиму ЛСЭ, при соблюдении которых за включением контролируемого АД последует его переход из статического состояния в установившееся с рабочей скоростью вращения, не приводящий к недопустимому отклонению режимных параметров с последующим нарушением устойчивой работы нагрузки или отключению генерирующих агрегатов. Соблюдение необходимых и достаточных условий в процессе пуска АД будет свидетельствовать о его успешности [13].

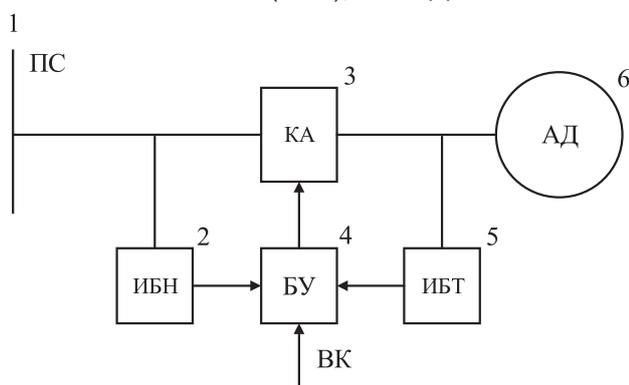
К условиям успешности следует отнести:

1. Допустимость частоты в ЛСЭ. Частота в ЛСЭ не должна выходить за допустимые границы, при нарушении которых происходит отключение генерирующих агрегатов. При этом она должна быть достаточна для успешного пуска АД.

2. Допустимость снижения напряжения в сети и его продолжительности для контролируемого двигателя и прочей двигательной нагрузки. При пуске АД возникает дополнительное падение напряжения в элементах сети, снижающее узловое напряжение потребителей. Работа на пониженном напряжении приводит к увеличению длительности разворота нагруженного двигателя и, как следствие, увеличению продолжительности воздействия пускового тока на тело статора и ротора. Причем чем продолжительнее процесс пуска, тем выше вероятность потери устойчивой работы смежных двигателей с последующим возникновением аварийного режима в ЛСЭ. В результате напряжение в процессе пуска должно быть выше критического, а также достаточным для обеспечения допустимой продолжительности пуска.

Работа разработанного прототипа устройства основана на способе поэтапного контроля соблюдения условий успешности пуска АД и поясняется схемой подключения двигателя к питающей сети с устройством контроля успешности пуска (рис. 1), структурой процесса контроля успешности пуска АД (рис. 2) [14].

Структурная схема рис. 1 содержит: 1 – ПС; 2 – измерительный блок напряжения (ИБН); 3 – коммутационный аппарат (КА); 4 – блок управления (БУ) пуском АД, в который поступает внешняя команда (ВК) на включение или отключение двигателя; 5 – измерительный блок тока (ИБТ); 6 – АД.



**Рис. 1.** Схема подключения двигателя с устройством контроля успешности пуска

**Fig. 1.** Connection diagram for a motor with a start-up

success monitoring device

Процесс контроля успешности пуска АД (рис. 2) разделен на пять этапов: 1 – блокировка пуска двигателя; 2 – экспресс оценка его допустимости по необходимым условиям; 3 – оценка допустимости по достаточным условиям; 4 – оценка допустимости длительности пуска; 5 – запрет повторного включения.

Работа устройства осуществляется следующим образом: в момент времени (А) АД находится в режиме ожидания ВК на включение. После ее получения на этапе 1 до момента (В) БУ производится оценка возможности пуска АД по данным ИКН. Напряжение в узле нагрузки и частота питающей сети для выполнения первого прямого пуска АД должны удовлетворять данным условиям:

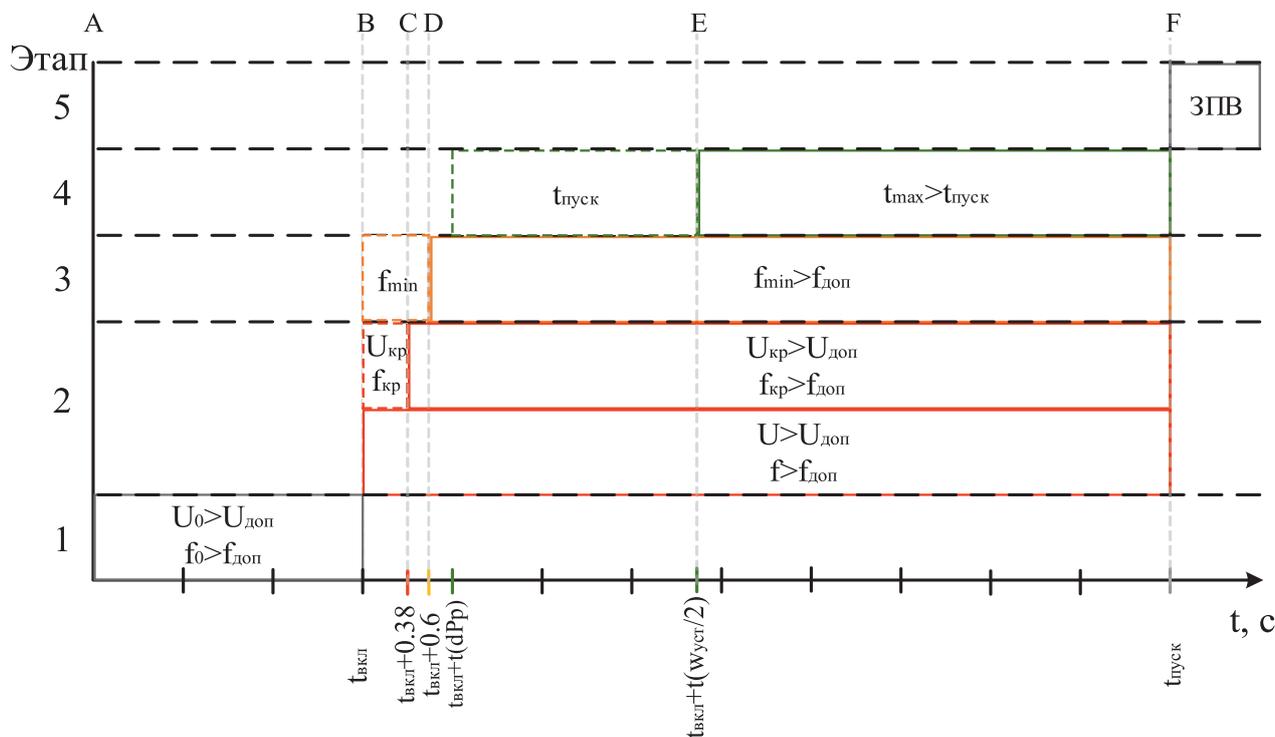
$$U_0 > U_{доп};$$

$$f_0 > f_{доп},$$

где  $U_0$  – напряжение на шинах АД до пуска, В;  $U_{доп}$  – минимально допустимое напряжение в узле нагрузки, В;  $f_0$  – значение частоты до пуска двигателя, Гц;  $f_{доп}$  – минимально допустимая частота питающей сети, Гц.

Для последующих пусков совместно учитываются следующие условия:

$$U_0 > U_{кр};$$



**Рис. 2.** Структура процесса контроля успешности пуска двигателя

**Fig. 2.** Structure of the motor start-up success monitoring

$$f_{кр} > f_0 > f_{min},$$

где  $U_{кр}$  – минимальное напряжение для успешного пуска АД, В;  $f_{кр}$  – предельное значение частоты в сети для успешного пуска АД, Гц;  $f_{min}$  – предельно допустимое минимальное значение частоты в сети по условию срабатывания технологической автоматики генерирующих агрегатов, Гц.

При соблюдении условий успешности до пуска БУ разрешает исполнение команды на включение КА, запускается процесс прямого пуска двигателя. После включения с момента времени (В) БУ начинает формировать базу ретроспективных данных о значении частоты в ЛСЭ для прогноза ее минимального значения на 3 этапе и рассчитывать угловую скорость вращения ротора АД. Угловая скорость вращения ротора АД определяется из уравнения движения ротора следующим образом [15]:

$$\omega_2 = \sum_{i=0}^n \frac{(M_{эмi} - M_{сопрmi})w_{ном}}{M_{ном} \cdot T_j} \Delta t_i$$

где  $M_{эм}$  – электромагнитная мощность АД, Н·м;  $M_{ном}$  – номинальный момент АД, Н·м;  $M_{сопрm}$  – момент сопротивления приводного механизма на валу АД, Н·м;  $w_{ном}$  – номинальная угловая скорость магнитного поля статора АД, рад/с;  $T_j$  – постоянная времени нагруженного ротора АД, с;  $\Delta t$  – интервал дискретизации БУ, с;  $\omega_2$  – угловая скорость вращения ротора АД, рад/с.

Расчет скорости вращения ротора АД заканчивается по достижении ее установившегося значения.

При наличии ретроспективных данных момент сопротивления приводного механизма принимается равным электромагнитному моменту в нормальном квазиустановившемся режиме, предшествующем текущему пуску двигателя, в противном случае – номинальному.

На этапе 2 БУ известным методом определяет параметры математической модели АД и критические значения параметров (напряжения и частоты) режима питающей сети для успешного пуска двигателя, проверяет выход параметров за критические и нормативно допустимые значения, при выходе за нормативно допустимые значения отключает двигатель.

Определение электрических параметров математической модели АД производится по методу наименьших квадратов по выраже-

ниям [16]:

$$R_1 = R_2' = \frac{\sum(P \cdot I^2)}{6 \sum I^4};$$

$$X_1 = X_2' = \frac{\sum(Q \cdot I^2)}{6 \sum I^4},$$

где  $X_1$  – реактанс статора, Ом;  $X_2'$  – приведенный к статору реактанс ротора, Ом;  $R_1$  – активное сопротивление статора, Ом;  $R_2'$  – приведенное к статору активное сопротивление ротора, Ом;  $P$  – активная мощность, потребляемая двигателем, Вт;  $Q$  – реактивная мощность, потребляемая двигателем, вар;  $I$  – действующее значение фазного тока двигателя, А.

Критическое напряжение определяется по выражению [17, 18]:

$$U_{кр} = \sqrt{\frac{M_{сопрm} (X^2 + R^2) w_c}{R_2'}}$$

где  $X$  – суммарный реактанс ротора и статора, Ом;  $R$  – суммарное активное сопротивление ротора и статора, Ом;  $w_c$  – угловая скорость магнитного поля статора, рад/с.

Критическая частота для пуска АД определяется по следующему выражению:

$$X^2 \frac{w^3}{w_{ном}^2} + R^2 w - \frac{U^2 R_2'}{M_{сопрm}} = 0,$$

где  $W$  – критическая угловая скорость магнитного поля статора для успешного пуска АД, рад/с.

В момент (С) БУ проверяет соблюдение следующих условий:

$$U > U_{дон}; \quad (1)$$

$$f > f_{дон}; \quad (2)$$

$$U > U_{кр}; \quad (3)$$

$$f < f_{кр}; \quad (4)$$

где  $f$  – значение частоты при пуске двигателя, Гц;  $U$  – напряжение на шинах АД при пуске, В.

На этапе 3 БУ по ретроспективным данным производит прогностический расчет

квазиустановившегося значения частоты с учетом работы регуляторов скорости генерирующих агрегатов путем экстраполяции зависимостей частоты от времени, характер изменения которой описывается аппроксимирующей функций [19]:

$$f = f_{pez} + (f_0 - f_{pez})e^{\alpha t}, \quad (5)$$

где  $f_0$  – частота ПС на момент пуска, Гц;  $f_{pez}$  – минимальное значение частоты ПС при пуске АД, Гц;  $\alpha$  – декремент затухания частоты, о.е.;  $t$  – время относительно начала определения результирующего значения частоты при пуске АД, с;  $f$  – фактическое значение частоты ПС, Гц.

Минимальное значение частоты сети при пуске АД определяется по выражению (5):

$$f_{pez} = \frac{\frac{1}{4}\alpha^3 f_0(a_4) + \alpha^2 f_0(a_3)}{\frac{1}{4}\alpha^3(a_4) + \alpha^2(a_3) + \alpha(a_2)} + \frac{\alpha(\frac{3}{2}f_0(a_2) - \frac{1}{2}(b_2)) + c_1}{\frac{1}{4}\alpha^3(a_4) + \alpha^2(a_3) + \alpha(a_2)},$$

в котором

$$\alpha = -\frac{2(a_3c_1 + a_2c_2)}{(a_4c_1 + a_3c_2)},$$

где:  $a_1 = \sum t$ ;  $a_2 = \sum t^2$ ;  $a_3 = \sum t^3$ ;  $a_4 = \sum t^4$ ;  
 $b_2 = \sum f \cdot t$ ;  $c_1 = f_0(a_1) - (b_1)$ ;  $c_2 = f_0(a_1) - (b_1)$ ;  
 $c_2 = (b_2) - f_0(a_2)$ .

Значение напряжения с учетом действия регуляторов возбуждения принимается равным фактическому на момент окончания зондирующего интервала.

В момент (D) БУ выполняет проверку соблюдения условий (1)–(4) с учетом влияния регуляторов генерирующих агрегатов, а также следующего условия:

$$f_{pez} > f_{min}. \quad (6)$$

На этапе 4 БУ определяет прогностическую длительность пуска и знак скорости изменения потребляемой активной мощности, при выявлении положительного значения

которой по экстраполяции зависимости угловой скорости вращения ротора от времени определяет продолжительность разгона до нормальной установившейся скорости, определяемой в соответствии со значением момента сопротивления и электрическими параметрами двигателя. При выявлении устойчивого знака скорости изменения активной мощности производит расчет продолжительности пуска:

$$t_{пуск} = \frac{\ln(\frac{\omega_{ycm}}{\omega_0})\sum t^2}{\sum \ln(\omega_2)t - \ln(\omega_0)\sum t},$$

где  $t_{пуск}$  – время, за которое двигатель достигнет нормальных рабочих оборотов, с;  $\omega_{ycm}$  – значение угловой скорости ротора двигателя, соответствующее установившемуся режиму при заданном моменте сопротивления, рад/с;  $\omega_0$  – значение угловой скорости ротора на момент выявления устойчивого разгона двигателя, рад/с;  $\omega_2$  – текущая угловая скорость ротора, определяемая исходя из величины небаланса моментов двигателя, рад/с.

Для получения достоверного значения продолжительности пуска АД интервал ретроспективы должен соответствовать времени от выявления устойчивого знака скорости изменения активной мощности до достижения ротором двигателя половины расчетной установившейся угловой скорости. При снижении количества ретроспективных данных возрастает погрешность определения продолжительности пуска двигателя.

В момент (E) в БУ выполняется проверка допустимости длительности пуска АД,

$$t_{пуск} < t_{max},$$

где  $t_{max}$  – максимально допустимое время пуска АД по условию допустимости снижения напряжения в смежных нагрузочных узлах или по условию предельного термического воздействия, с.

На этапе 5 до момента времени (F) БУ находится в режиме ожидания команды на запрет повторного пуска (ЗПВ) двигателя для предотвращения бесконечности циклов пуска АД или исключения включения после принудительного основа.

При несоблюдении условий успешности пуска АД в представленные моменты БУ выдает команду на отключение двигателя с последующим запретом повторного включения двигателя без улучшения условий его пуска.

### **Техническая и программная реализация прототипа устройства контроля успешности пусков асинхронного двигателя в локальных системах энергоснабжения**

#### **1. Аппаратные средства.**

Прототип автоматики реализован на процессорном блоке RAPTOR-x86, являющемся специализированной аппаратной платформой для построения устройств противоаварийной автоматики и исполнения технологических алгоритмов, а также дополнительными устройствами расширения, осуществляющими информационный обмен с БУ через интерфейс RS-485 по специализированному протоколу:

1) трехканальный модуль ввода аналоговых сигналов от цепей тока REXT-I3, предназначенный для измерения его мгновенных значений во вторичных цепях трансформаторов тока (ТТ) на 1 А и 5 А;

2) трехканальный модуль ввода аналоговых сигналов от цепей напряжения REXT-U8, предназначенный для измерения его мгновенных значений во вторичных цепях трансформаторов напряжения (ТН) на 100 В.

3) модуль вывода дискретных сигналов REXT-DO220 с коммутационной способностью контактов при напряжении 220 В постоянного тока 0,2 А, предназначенный для управления состоянием выключателя АД.

#### **2. Программная реализация алгоритмов контроля успешности пуска АД.**

Алгоритм контроля успешности пуска АД на RAPTOR-x86, оснащенный процессорной платформой Intelx86 и операционной системой (ОС) Windows 10, был реализован в среде разработки Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench (LabVIEW) с применением специализированного драйвера, позволяющего обмениваться сигналами с модулями расширения через LabVIEW в обход процессов и процедур ОС для повышения быстродействия БУ.

Программное обеспечение (ПО) в среде разработки LabVIEW состоит из двух частей: пользовательской и управляющей. На рис. 3 приведен пользовательский интерфейс

ПО, на котором располагаются: 1 – переключатель, изменение положения которого приводит к инициализации алгоритма автоматики; 2 – световые индикаторы для визуального контроля критерия (критериев), по которому (которым) произведено прерывание пуска АД; 3 – поля для вывода фактических параметров режима; 4 – поля для ввода минимально допустимых значений напряжения и частоты в ЛСЭ, а также интервала поиска оптимального момента включения АД; 5 – поля для вывода критических параметров режима; 6 – поля для ввода электрических и механических параметров АД; 7 – окна с осциллограммами действующего напряжения и частоты; 8 – поле для ввода частоты дискретизации БУ. На данной стадии разработки устройства контроля успешности пусков введено допущение, что электрические параметры АД заведомо известны и заданы, параметрическая идентификация двигателя не требуется.

Управляющая программа реализована на языке C++ с применением функциональных блоков LabVIEW в соответствии с алгоритмом контроля успешности пусков АД в ЛСЭ рис. 4 с введением дополнительных алгоритмов определения действующих значений тока, напряжения, фазы между ними, активной и реактивной мощностей, а также частоты ПС. В табл. 1 приведены переменные алгоритма контроля успешности пуска АД (рис. 4).

По сути, ПО состоит из 10 блоков:

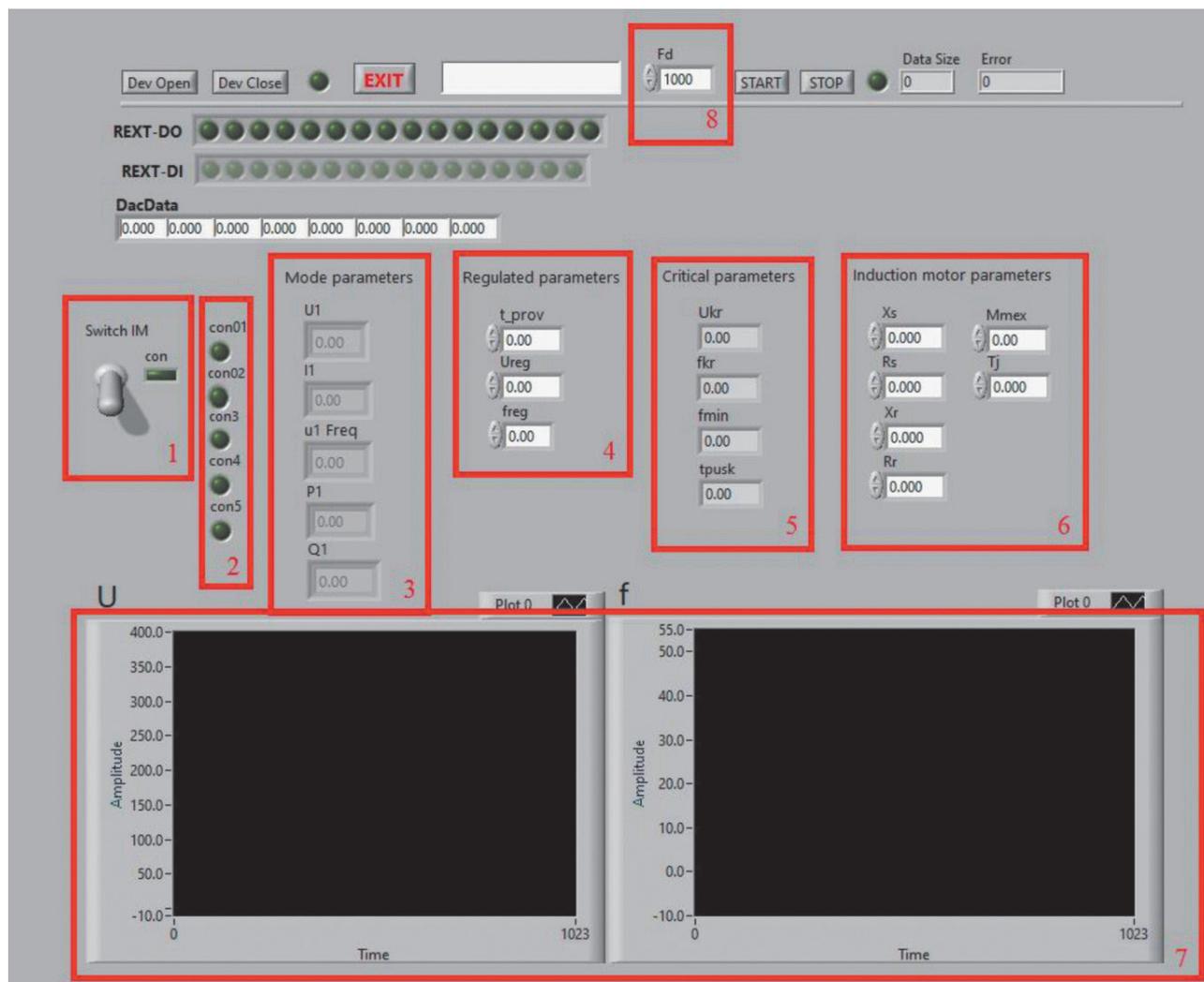
1. Блок расчета действующего значения напряжения, его частоты и фазы относительно опорного сигнала RAPTOR на основе мгновенных значений напряжения фазы А.

2. Блок расчета действующего значения тока, его частоты и фазы относительно опорного сигнала RAPTOR на основе мгновенных значений тока фазы А.

3. Блок расчета активной и реактивной мощностей.

4. Блок реализации алгоритма 1-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором оценивается нормальность режимных параметров на интервале 5 с до пуска с возможностью включения двигателя при их соответствии.

5. Блок реализации 1-й части алгоритма 2-го этапа контроля успешности пуска АД,



**Рис. 3.** Пользовательский интерфейс программного обеспечения  
**Fig. 3.** Software user interface

в котором оценивается нормальность режимных параметров в процессе пуска и определяются значения критических параметров режима (критического напряжения и частоты).

6. Блок реализации 2-й части алгоритм 2-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором оценивается допустимость напряжения и частоты для успешного пуска АД.

7. Блок реализации алгоритма 3-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором оценивается допустимость снижения частоты в ЛСЭ.

8. Блок реализации алгоритма определения угловой скорости вращения ротора АД.

9. Блок реализации алгоритма 4-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором производится прогностическое определение продолжительности пуска двигателя под механической нагрузкой.

10. Блок реализации алгоритма 5-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором осуществляется ЗПВ.

Из рис. 4 видно, что для определения актуального состояния двигателя разработанный прототип автоматики ориентируется на положение переключателя на пользовательском интерфейсе. При отключенном переключателе ( $sostV=0$ ) автоматика не активна, а алгоритмы не инициализированы. Изменение положения переключателя ( $sostV = 1$ ) приводит к инициализации алгоритма поиска допустимого режима питающей сети для включения АД на заданном интервале при фиксации установившегося режима длительностью до 5 с. Далее, все процедуры алгоритмов ориентируются на внутренний таймер, который запускается при пуске двигателя и обнуляется при его

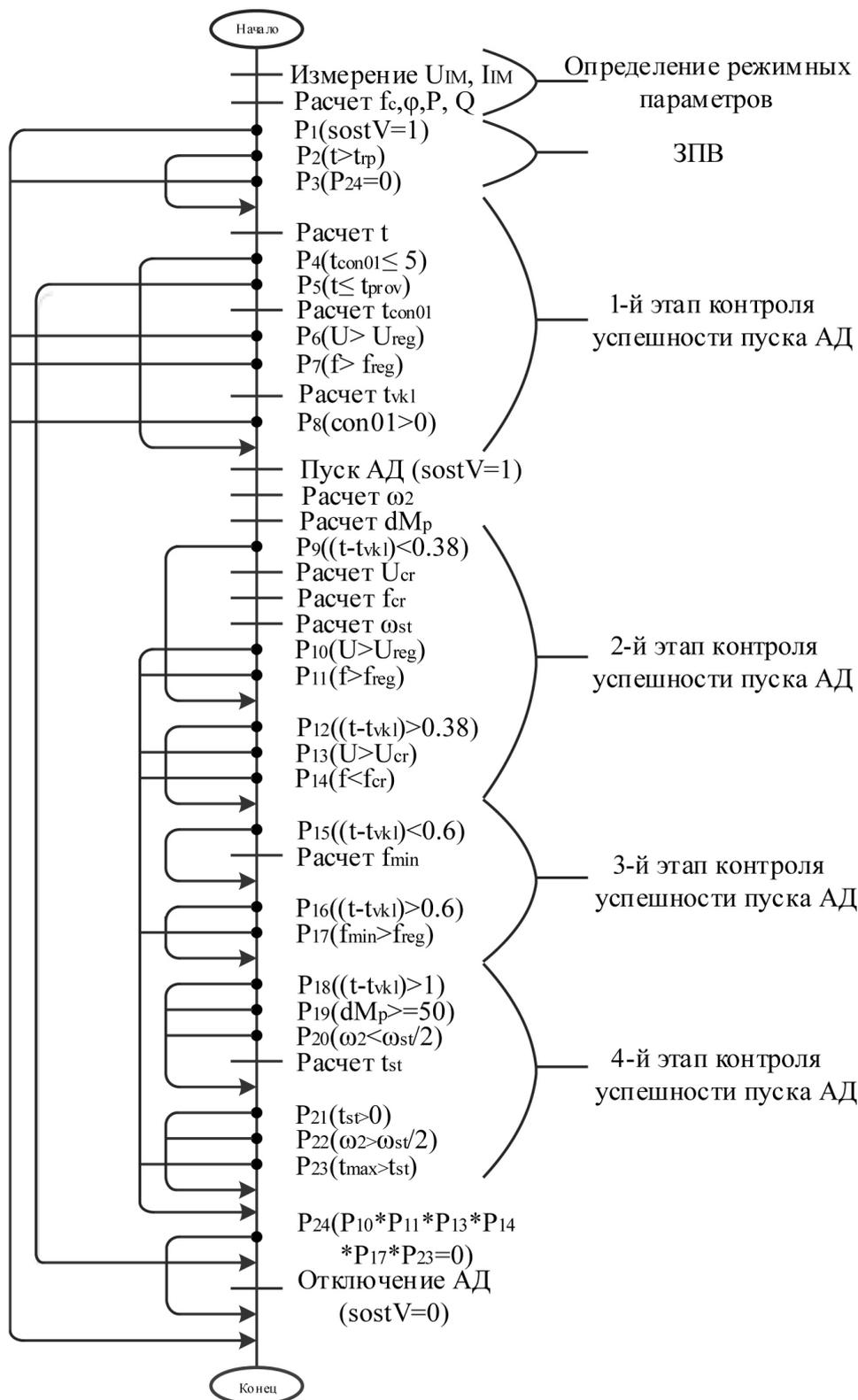


Рис. 4. Алгоритм контроля успешности пуска асинхронного двигателя в локальной системе энергоснабжения  
 Fig. 4. Algorithm of induction motor start-up success monitoring in a local power supply system

отключении. Дополнительно для определения времени пуска АД в алгоритме установлен счетчик, фиксирующий количество приращений скорости вращения ротора,

при превышении заданного значения которого инициализируется алгоритм прогнозирования продолжительности пуска АД.

**Таблица 1.** Переменные алгоритма контроля успешности пуска асинхронного двигателя  
**Table 1.** Variables of the induction motor start-up success monitoring algorithm

Характер		Технологическое содержание	Обозначение (Тип)
Входные		Линейное мгновенное напряжение на шинах двигателя	UIM (A)
		Фазный мгновенный ток двигателя	IIM (A)
Внутренние	Определяемые	Угол между фазным током и фазным напряжением	$\varphi$ (D)
		Частота питающей сети	fc (D)
		Активная мощность двигателя	P (D)
		Реактивная мощность двигателя	Q (D)
		Счетчик относительного времени работы алгоритма	t (D)
		Счетчик времени оценки нормальности режима до пуска двигателя	tcon01 (D)
		Относительное время включения двигателя	tvkl (D)
		Угловая скорость вращения ротора	w2 (D)
		Счетчик положительной разницы ускоряющего и тормозящего моментов	dMp (D)
		Действующее критическое напряжение	Ucr (D)
		Предельно допустимое максимальное значение частоты для успешного пуска	fcr (D)
		Нормальное установившееся значение угловой скорости ротора	wst (D)
	Минимальная частота в ЛСЭ при пуске АД	fmin (D)	
	Продолжительность пуска АД	tst (D)	
	Состояние проверки по нормальности исходного режима ЛСЭ (необходимые условия) для пуска АД	con01 (D)	
	Задаваемые	Состояние переключателя	sostV (L)
		Относительное время до запрета повторного включения двигателя	trp (D)
		Интервал проверки нормальности режимных параметров до пуска АД	tprov (D)
Предельно допустимое минимальное действующее значение напряжения для ЛСЭ		Ureg (D)	
Предельно допустимое минимальное значение частоты в ЛСЭ		freg (D)	
Допустимая длительность пуска двигателя		tmax (D)	

В соответствии с заданными временными задержками и счетчиками внутри алгоритмов формируются команды на отключение/продолжение пуска АД на выделенных этапах. При выявлении условий неуспешности соответствующий блок выдает команду на логический выход промышленного контроллера БУ, отключая двигатель от питающей сети.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

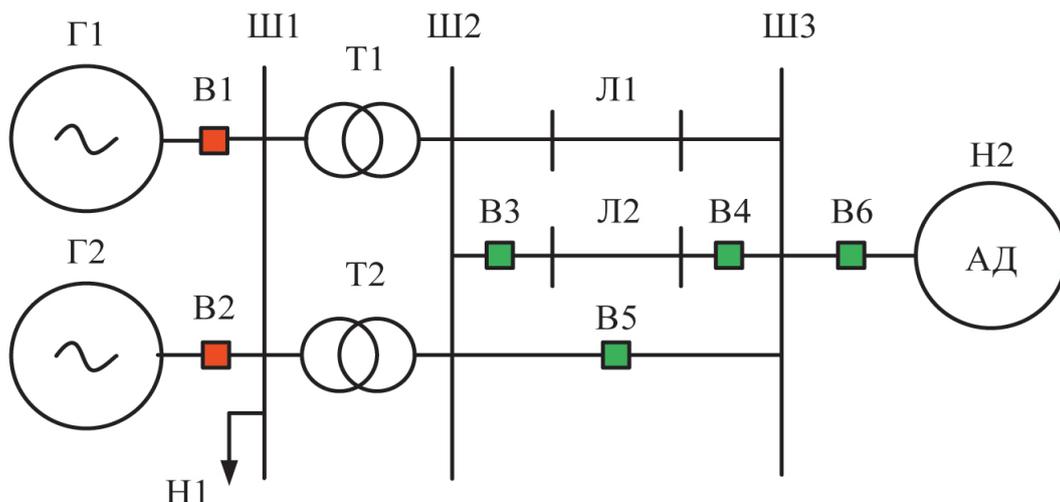
**Испытания прототипа автоматики контроля успешности пуска асинхронного двигателя на физической модели локальных систем энергоснабжения.**

**Электродинамическая модель ЛСЭ с АД.** Экспериментальная проверка работоспособности прототипа автоматики проведена на базе электродинамической модели (ЭДМ) центра коллективного пользования, называемого «Центр испытаний устройств

контроля и управления режимами электроэнергетических систем» Новосибирского государственного технического университета. В состав ЭДМ входят три основные группы оборудования: силовое и коммутационное; измерительные и регистрирующие приборы и аппараты; системы управления силовым и коммутирующим оборудованием.

Для испытания разработанного прототипа автоматики была создана физическая модель ЛСЭ с АД, приведенная на рис. 5. Основные элементы модели приведены в табл. 2.

Модель ЛСЭ представляет собой совокупность специального оборудования, имитирующего работу основных элементов оригинала. Исключением являются первичные двигатели (вместо газопоршневых двигателей/турбин использованы двигатели постоянного тока) и воздушные линии электропередачи (имеют не распределенные, а сосредоточенные параметры). Остальные элементы



**Рис. 5.** Схема локальной системы энергоснабжения с асинхронным двигателем для испытания прототипа автоматики

**Fig. 5.** Diagram of the local power system with an induction motor to test an automation equipment prototype

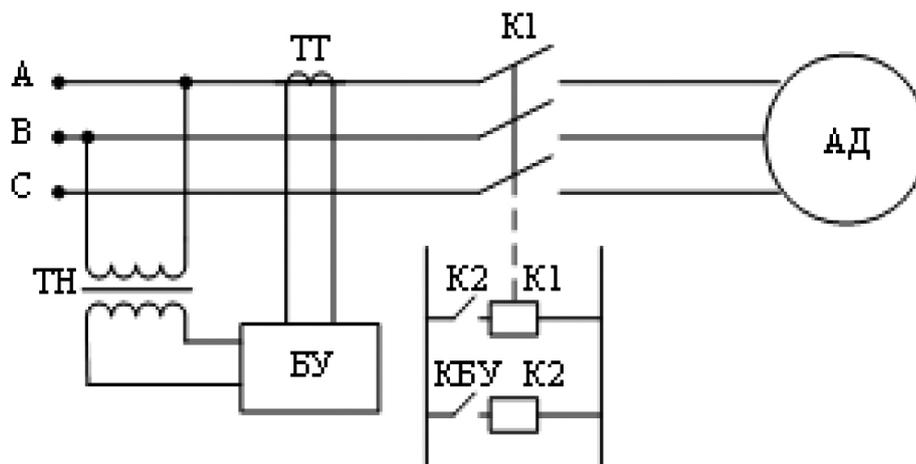
ЛСЭ и внешней электрической сети на ЭДМ представлены масштабными физическими моделями. Параметры и конструкция силовых элементов модели подобраны таким образом, чтобы по возможности максимально удовлетворить критериям подобия при моделировании, прежде всего, переходных электромеханических процессов.

Сопряжение прототипа автоматики с объектом управления выполнено в соответствии с рис. 6, где сигнал с ТТ, расположенный на

фазе А, поступает на REXT-I3; сигнал с ТН, подключенный к линейному напряжению АВ, поступает на REXT-U8; КБУ – контакты REXT-DO220; К2 – катушка промежуточного реле, контакты которой подают/снимают напряжение на/с катушки магнитного пускателя К1, контакты которого подключают/отключают АД к/от питающей сети. Сами блоки расширения REXT-U8, REXT-I3, REXT-DO220 монтируются на тыльной стороне корпуса RAPTOR-x86.

**Таблица 2.** Основные элементы модели локальной системы энергоснабжения с асинхронным двигателем  
**Table 2.** Main elements of the local power supply system model with an induction motor

	Элемент схемы	Тип	Кол-во	Примечание
1	Модельный синхронный генератор (СГ)	МКЗ-1500	2	U <sub>ном</sub> = 220 В P <sub>ном</sub> = 3 кВт
2	Группа модельных однофазных силовых трансформаторов	МТО-1.7	2	K <sub>т</sub> = 220/380 S <sub>ном</sub> = 1,7 кВт
3	Осветительная нагрузка	-	1	U <sub>ном</sub> =220 В P <sub>ном</sub> = 0,9 кВт
4	АД	АИР90Л2	1	U <sub>ном</sub> = 380 В P <sub>ном</sub> = 3 кВт M <sub>ном</sub> = 10 Нм
5	Модель линии электропередачи (ЛЭП)	-	2	X <sub>л</sub> = 16 Ом C <sub>ф</sub> = 1мкФ C <sub>фз</sub> = 2,27мкФ U <sub>ном</sub> =380
6	Модель силового выключателя	-	6	-
7	Шина	-	3	-
8	ТТ	И508М	1	K <sub>т</sub> = 100/5
9	ТН	УТН-1	1	K <sub>т</sub> = 380/100
	Автоматика беспилотного управления режимами ЛСЭ [9]	ПТК Торнадо	1	Применялся для синхронизации и регулирования работы СГ
	БУ	RAPTOR-x86	1	Прототип автоматики контроля успешности пусков АД



**Рис. 6.** Схема сопряжения прототипа автоматики с объектом управления

**Fig. 6.** Interface circuit of the automation equipment prototype and the control object

**Программа и результаты испытаний прототипа автоматики контроля успешности пуска асинхронного двигателя на физической модели локальных систем энергоснабжения.** Программа испытаний предусматривала проверку работы прототипа автоматики в условиях изменения напряжения, частоты и сопротивления связи между источником и нагрузкой в ЛСЭ, а также механической загрузки двигателя. Пуск АД в схеме рис. 6 производился только после создания нормального установившегося режима ЛСЭ (Г1 и Г2 работают на выделенную нагрузку Н1) и подключения необходимых для пункта программы элементов, образующих требуемые схемно-режимные условия.

Содержание программы испытаний:

1. Проверка блокировки пуска АД на 1-м этапе при выходе параметров за допустимые значения для нормального режима.

2. Проверка отключения АД на 2-м этапе по условию снижения напряжения в ЛСЭ ниже допустимого уровня.

3. Проверка отключения АД при превышении допустимой механической нагрузки на валу в заданных схемно-режимных условиях.

4. Проверка отключения АД по условию снижения напряжения питания ниже допустимого уровня в процессе пуска при вариации уставки автоматического регулятора возбуждения (АРВ) СГ в исходном режиме (номинальное фазное напряжение 127 В).

5. Проверка отключения АД на 2-м этапе по условию превышения допустимой частоты ПС в процессе пуска при вариации уставки автоматического регулятора скорости (АРС) СГ в исходном режиме.

6. Проверка отключения АД на 3-м этапе по условию снижения частоты в ПС в процессе пуска ниже допустимого значения (минимально допустимое значение частоты в ЛСЭ задавалось 45 Гц) при вариации уставки АРС СГ в исходном режиме.

7. Проверка отключения АД на 2-м этапе по условию снижения напряжения питания ниже допустимого уровня в процессе пуска при вариации сопротивления связи между СГ и АД.

Для проведения испытаний пунктов 1–6 в схеме рис. 4 вводился в работу выключатель В5 для усиления электрической связи между генераторным и нагрузочным узлами. В пункте 7 для изменения схемных условий в ЛСЭ при отключенном выключателе В5 вводились в работу В3 и В4.

Описание программы и результаты испытаний прототипа автоматики контроля успешности пусков АД на физической модели ЛСЭ приведены в табл. 3. В представленных пунктах программы испытаний прототипа были определены критические параметры режима и значения времени пуска и минимальной частоты в ЛСЭ. Погрешность определения минимальной частоты в ЛСЭ не превысила 4%, продолжительности пуска двигателя – 14%.

**Таблица 3.** Программа и результаты испытаний  
**Table 3.** Test program and test results

№	Смысл	Примечание	Результат
1	Выход параметров за допустимые значения для нормального режима на заданном интервале до включения АД	Интервал – 10 с	На заданном 10-секундном интервале напряжение на шинах АД до пуска было ниже допустимого, команда на пуск была заблокирована
2	Выход параметров за допустимые значения для ЛСЭ после включения АД	Минимально допустимое напряжения для ЛСЭ – 300 В	Пуск прерван по условию (1) за 0,2 с
3	Изменение режимных условий ЛСЭ	Вариация момента сопротивления в диапазоне от 0,076 до 0,24 Мном	Пуск прерван по условию (3) при моменте сопротивления 0,21 Мном за 0,6 с
4		Вариация уставки АРВ СГ в диапазоне от 1,1 до 0,85 Уном при моменте сопротивления 0,18 Мном	Пуск прерван за 1,25 с по условию (3) при напряжении на СГ 0,95 Уном. Фактическое недопустимое снижение напряжения в сети соответствовало напряжению на СГ 0,85 Уном
5		Вариация уставки АРС СГ в диапазоне от 50 до 54 Гц при моменте сопротивления 0,18 Мном	Определяющим условием для прерывания пуска на 2-м этапе из-за слабой электрической связи является (3)
6		Вариация уставки АРС СГ в диапазоне от 50 до 46 Гц при моменте сопротивления 0,18 Мном	Пуск прерван из-за наличия низкочастотных колебаний при частоте 49 Гц по условию (2) за 6 с. При отсутствии колебаний пуск прерван при частоте 48 Гц по условию (6) за 0,6 с.
7	Изменение схемных условий ЛСЭ	Изменение числа ЛЭП между АД и СГ при моменте сопротивления 0,18 Мном	Пуск прерван по условию (3) за 0,479 с и 0,508 с для одной и двух ЛЭП соответственно

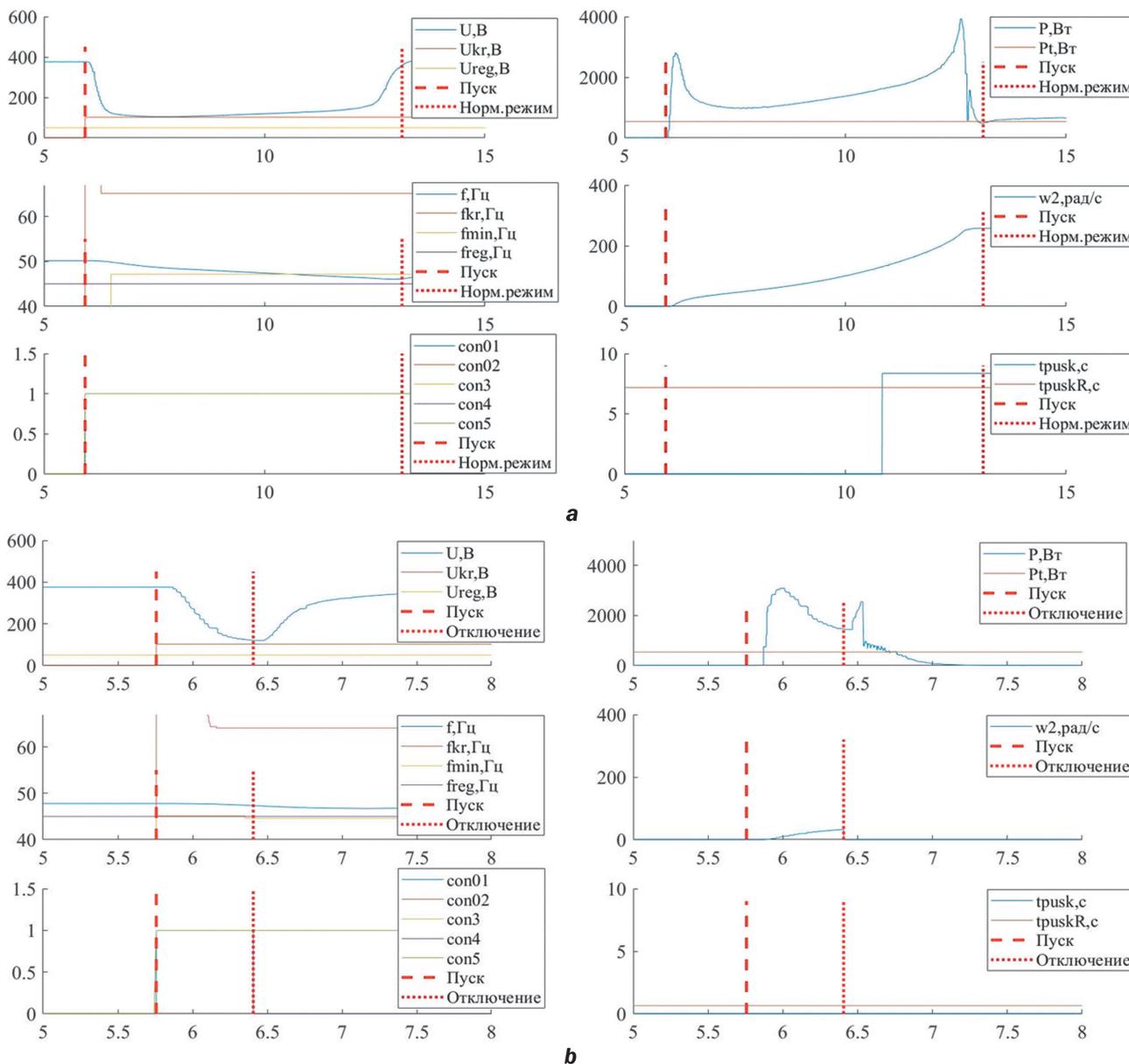
**Таблица 4.** Результаты испытания автоматики по 23 пускам асинхронного двигателя при вариации условий  
**Table 4.** Automation equipment test results for 23 induction motor start-ups under varying conditions

Величина	Значение	Оценка успешности пуска прототипом автоматики	Фактическая успешность пуска	Условие прерывания
Mсопрт, о.е.	0,076	+	+	-
	0,115	+	+	-
	0,136	+	+	-
	0,178	+	+	-
	0,21	-	-	(3)
	0,24	-	-	(3)
Uг, о.е.	1,10	+	+	-
	1,05	+	+	-
	1,00	+	+	-
	0,98	+	+	-
	0,95	-	+	(3)
	0,90	-	+	(3)
	0,85	-	-	(3)
fс, Гц	50,00	+	+	-
	49,50	+	+	-
	49,00	-	-	(2)
	49,00	+	+	-
	48,00	-	-	(6)
	50,00	+	+	-
	51,00	+	+	-
	53,00	+	+	-
	54,00	+	+	-
Количество линий связи, шт.	1	-	-	(3)
	2	-	-	(3)

В качестве примеров на рис. 7 а, b приведены осциллограммы процессов при пуске АД в ЛСЭ с критическими параметрами режима для пункта 6 программы испытаний. На рис. 7 а представлен процесс успешного пуска АД при частоте предшествующего режима, рав-

ной 50 Гц с моментом сопротивления 0,18 Мном (все условия успешности соблюдены).

На рис. 7 b представлен процесс прерванного через 0,7 с по условию (6) 3-го этапа контроля пуска АД при частоте предшествующего режима, равной 48 Гц с момен-



**Рис. 7.** Осциллограмма процесса при пуске асинхронного двигателя в локальных системах энергоснабжения с критическими параметрами режима при частоте предшествующего режима 50 Гц (а) и 48 Гц (b): U – напряжение; P – активная мощность; Pt – механическая мощность; f – частота; Ukr – критическое напряжение; fmin – расчетное предельное снижение частоты; tpusk – расчетное время пуска; Ureg– минимально допустимое напряжение; freg – минимально допустимая частота; tpuskR – фактическая продолжительность пуска; w2 – расчетная угловая скорость; con01 – условие 1-го этапа; con02 – условие 2-го этапа (нормальность напряжения и частоты); con3 – условие 2-го этапа (допустимость снижения напряжения и частоты); con4 – условие 3-го этапа; con5 – условие 4-го этапа

**Fig. 7.** Oscillogram of the induction motor start-up in the local power supply systems with mode critical parameters when the frequency of the previous mode is 50 Hz (a) and 48 Hz (b): U – voltage; P – active power; Pt – mechanical power; f – frequency; Ukr – critical voltage; fmin – calculated maximum frequency reduction; tpusk – estimated start-up time; Ureg– minimum permissible voltage; freg – minimum permissible frequency; tpuskR – actual start-up duration; w2 – calculated angular velocity; con01 – 1st stage condition; con02 – 2nd stage condition (normality of voltage and frequency); con3 – 2nd stage condition (tolerability of voltage and frequency reduction); con4 – 3rd stage condition; con5 – 4th stage condition

том сопротивления 0,18 Мом. В интервал отключения входили: предиктивная оценка БУ величины минимальной частоты продолжительностью 0,6 с; время срабатывания модельного выключателя 0,1 с.

В табл. 4 приведены результаты испытаний прототипа автоматики при вариации схемно-режимных условий. В 91% случаев прототип корректно прогностически определял успешность/неуспешность пуска АД в ЛСЭ (случаев отсутствия выдачи команды на прерывание процесса пуска в условиях его неуспешности не зафиксировано).

Результаты проведенных испытаний прототипа автоматики контроля успешности пусков АД на базе RAPTOR-x86 на физической модели ЛСЭ подтвердили его работоспособность. Применение автоматики в ЛСЭ позволит предотвращать повреждение двигателей или оборудования питающих сетей, сохранить их ресурс работоспособности в процессах неуспешных прямых пусков путем их выявления на ранних этапах и прерывания.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В связи с вышеизложенным можно сделать следующие выводы:

1) предиктивный контроль успешности пуска АД в ЛСЭ возможен;

2) поэтапный контроль пуска позволяет прерывать процесс на ранних стадиях выявления его неуспешности;

3) высокая достоверность прогностической оценки контроля успешности пуска АД подтверждает возможность ее осуществления на базе предложенной модели по определению критических параметров режима, погрешность которой в испытаниях не превышала 4%, а погрешность оценки продолжительности пуска не превышала 14%.

Значительных запас обеспечения надежности локальных систем энергоснабжения с крупными асинхронными двигателями содержится в возможностях автоматического контроля успешности их пуска с прогностическим прерыванием на ранних стадиях выявления неуспешности.

Полученные при выполнении НИОКР теоретические и экспериментальные результаты разработки прототипа автоматики контроля успешности пуска АД в системах соизмеримой мощности позволяют перейти к созданию опытных образцов с их применением на реальных объектах.

## **Список источников**

1. Маркова В.М., Чурашев В.Н. Децентрализация энергетики: интеграция и инновации // ЭКО. Всероссийский экономический журнал. 2020. Т. 50. № 4. С. 8–27. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2020-4-8-27>. EDN: QCCJKR.
2. Гуревич Ю.Е., Илюшин П.В. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. 280 с. EDN: YWRPSP.
3. Илюшин П.В. Перспективные направления развития распределительных сетей при интеграции локальных интеллектуальных энергосистем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 4. С. 70–80. EDN: JVMAIL.
4. Tungadio D.H., Sun Yanxia. Predictive controller for interconnected microgrids // Generation, Transmission & Distribution. 2020. Vol. 14. Iss. 19. P. 4273–4283. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1257>.
5. Litwin M., Zielinski D., Gopakumar K. Remote micro-grid synchronization without measurements at the point of common coupling // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 212753–212764. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3040697>.
6. Илюшин П.В., Куликов А.А. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией: монография. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. 364 с. EDN: UBJFNT.
7. Бык Ф.А., Мышкина Л.С. Эффекты интеграции локальных интеллектуальных энергосистем // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. 24. № 1. P. 3–15. <https://doi.org/10.30724/19989903-2022-24-1-3-15>. EDN: QZOPWN.
8. Илюшин П.В., Филиппов С.П., Новиков Н.А. Требования к маневренности газотурбинных и газопоршневых генерирующих установок // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: труды XI Заседания Междунар. науч. семинара им. Ю.Н. Руденко (г. Ташкент, 23–27 сентября 2019 г.). Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2019. Т. 1. С. 343–352. EDN: WSAUCX.
9. Gouichiche A., Safa A., Chibani A., Tadjine M. Global fault-tolerant control approach for vector control of an induction motor // Electrical Energy Systems. 2020. Vol. 30. Iss. 8. P. e12440. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12440>.
10. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2014. № 1. С. 64–73. EDN: SBKDQB.
11. Ozpineci B., Bose B.K. Soft-switched performance-enhanced high frequency non-resonant link phase-controlled converter for AC motor drive // Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Aachen, 31 August – 4 September 1998). Aachen, 1998. Vol. 2. P. 733–739. <https://doi.org/10.1109/IECON.1998.724184>.

12. Фишов А.Г., Дулов И.В., Фролов М.Ю. Контроль успешности пусков асинхронных двигателей в локальных энергосистемах // Релейная защита и автоматизация. 2023. № 3. С. 4–17. EDN WVCNSL.
13. Fishov A.G., Dulov I.V., Khatylenko R.M. The induction motor model for control starting in small-scale power systems // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Magnitogorsk, 24–26 September 2021). Magnitogorsk: IEEE, 2021. P. 255–260. <https://doi.org/10.1109/UralCon52005.2021.9559568>.
14. Fishov A.G., Dulov I.V., Khatylenko R.M., Frolova Y.A. The algorithm for controlling the success of induction motor starting in small-scale power systems // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (Novosibirsk – Yekaterinburg, 11–13 November 2022). IEEE, 2022. P. 1690–1696. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017083>.
15. Булычев А.В., Грибков М.А. Анализ процессов самозапуска электродвигателей в современных электрических распределительных сетях с позиций релейной защиты // Релейная защита и автоматизация. 2023. № 1. С. 30–38. EDN: QIODPZ.
16. Мугалимов Р.Г., Храмшин Р.Я., Мугалимова А.Р. Сравнительный анализ методик расчета параметров электрических схем замещения асинхронных двигателей // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3. № 1. С. 36–40. EDN: VOXRPT.
17. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод: монография. М.: Академия, 2004. 256 с. EDN: QMIONV.
18. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под ред. Л.Г. Мамиконянца. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
19. Фишов А.Г., Осинцев А.А., Какоша Ю.В., Одинабеков М.З. Активные распределительные электрические сети с децентрализованным мультиагентным управлением режимом // Электричество. 2022. Ч. 2. № 11. С. 29–45. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-11-29-45>. EDN: HYXXZS.
20. Фишов А.Г., Ивкин Е.С., Гилев О.В., Какоша Ю.В. Режимы и автоматика Минигрид, работающих в составе распределительных электрических сетей ЕЭС // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 3. С. 22–37. EDN: YPYCDG.

### References

1. Markova V.M., Churashev V.N. Energy decentralization: integration and innovation. *ECO*. 2020;50(4):8-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2020-4-8-27>. EDN: QCCJKR.
2. Gurevich Yu.E., Ilyushin P.V. *Features of mode calculations in energy regions with distributed generation*. Nizhnij Novgorod: The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration; 2018, 280 p. (In Russ.). EDN: YWRPSP.
3. Ilyushin P.V. Advanced trends of distribution network development when integrating local intelligent power systems. *Electric Power. Transmission and distribution*. 2021;4:70-80. (In Russ.). EDN: JVMAIL.
4. Tungadio D.H., Sun Yanxia. Predictive controller for interconnected microgrids. *Generation, Transmission & Distribution*. 2020;14(19):4273-4283. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1257>.
5. Litwin M., Zielinski D., Gopakumar K. Remote micro-grid synchronization without measurements at the point of common coupling. *IEEE Access*. 2020;8:212753-212764. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3040697>.
6. Ilyushin P.V., Kulikov A.L. *Automatic control of normal and emergency modes in energy districts with distributed generation*. Nizhnij Novgorod: The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration; 2019, 364 p. (In Russ.). EDN: UBJFNT.
7. Byk F.L., Myshkina L.S. Effects of local intelligent energy systems integration. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(1):3-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/19989903-2022-24-1-3-15>. EDN: QZOPWN.
8. Ilyushin P.V., Filippov S.P., Novikov N.L. Maneuverability requirements for gas turbine and gas piston generating installations. In: *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki: XCI Zasedanie Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara im. Yu.N. Rudenko = Methodological issues in studying large energy system reliability: proceedings of the 91<sup>st</sup> Meeting of the International scientific seminar named after Yu.N. Rudenko*. 23–27 September 2019, Tashkent. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute SB RAS; 2019, vol. 1, p. 343-352. (In Russ.). EDN: WSAUCX.
9. Gouichiche A., Safa A., Chibani A., Tadjine M. Global fault-tolerant control approach for vector control of an induction motor. *Electrical Energy Systems*. 2020;30(8):e12440. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12440>.
10. Voropaj N.I., Stennikov V.A. Integrated smart energy systems. *Thermal Engineering*. 2014;1:64-73. (In Russ.). EDN: SBKDQB.
11. Ozpineci B., Bose B.K. Soft-switched performance-enhanced high frequency non-resonant link phase-controlled converter for AC motor drive. In: *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 31 August – 4 September 1998, Aachen. Aachen; 1998, vol. 2, p. 733-739. <https://doi.org/10.1109/IECON.1998.724184>.
12. Fishov A.G., Dulov I.V., Frolov M.Yu. Controlling the success of induction motor starting in local power systems. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2023;3:4-17. (In Russ.). EDN WVCNSL.
13. Fishov A.G., Dulov I.V., Khatylenko R.M. The induction motor model for control starting in small-scale power systems. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering*. 24–26 September 2021, Magnitogorsk. Magnitogorsk: IEEE; 2021, p. 255-260. <https://doi.org/10.1109/UralCon52005.2021.9559568>.

14. Fishov A.G., Dulov I.V., Khatylenko R.M., Frolova Y.A. The algorithm for controlling the success of induction motor starting in small-scale power systems. In: *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences*. 11–13 November 2022, Novosibirsk – Yekaterinburg. IEEE, 2022. P. 1690–1696. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017083>.
15. Bulychev A.V., Gribkov M.A. Analysis of self-starting processes of electric motors in modern electrical distribution networks from the perspective of relay protection. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2023;1:30-38. (In Russ.). EDN: QIODPZ.
16. Mugalimov R.G., Hramshin R.Ya., Mugalimova A.R. Comparative analysis of methods for calculating the parameters of the electrical equivalent circuit of asynchronous motors. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal*. 2016;3(1):36-40. (In Russ.). EDN: VOXRPT.
17. Braslavskij I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energy-saving induction motor drive*. Moscow: Akademiya; 2004, 256 p. (In Russ.). EDN: QMIONV.
18. Syromyatnikov I.A. *Operating modes of induction and synchronous motors*. Moscow: Energoatomizdat; 1984, 240 p. (In Russ.).
19. Fishov A.G., Osintsev A.A., Kakosha Yu.V., Odinabekov M.Z. Active power distribution networks with decentralized multi-agent control mode. Part 2. *Elektrichestvo*. 2022;2(11):29-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-11-29-45>. EDN: HYXXZS.
20. Fishov A.G., Pivkin E.S., Gileva O.V., Kakosha Yu.V. Modes and automation of minigrid operating as part of the UPS distribution electric networks. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2021;3:22-37. (In Russ.). EDN: YPYCDG.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **Дулов Илья Вадимович,**

ассистент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия  
✉ [dulov.96@mail.ru](mailto:dulov.96@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-3736-2411>

##### **Ilya V. Dulov,**

Assistant Professor of the Automated Electric Power Systems Department, Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia  
✉ [dulov.96@mail.ru](mailto:dulov.96@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-3736-2411>

##### **Фишов Александр Георгиевич,**

д.т.н., профессор, профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия  
[agfishov@yandex.ru](mailto:agfishov@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-3977-0702>

##### **Alexander G. Fishov,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Automated Electric Power Systems Department, Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia  
[agfishov@yandex.ru](mailto:agfishov@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-3977-0702>

#### Вклад авторов

#### Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to the article.

#### Конфликт интересов

#### Conflict of interests

Фишов Александр Георгиевич является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2019 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Alexander G. Fishov has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2019, but he was not involved in making a decision about accepting the present article for publication. The article was peer reviewed in accordance with the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

#### Информация о статье

#### Information about the article

Статья поступила в редакцию 28.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 02.04.2024 г.; принята к публикации 06.05.2024 г.

The article was submitted 28.02.2024; approved after reviewing 02.04.2024; accepted for publication 06.05.2024.