



## АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ САМОЗАПУСКА ГРУППЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Р.У. Галеева<sup>1</sup>, С.В. Куксов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>ОДУ АО «СО ЕС» РДУ Татарстан  
raisa\_gal.52@mail.ru<sup>1</sup>, ser.kuksov@mail.ru<sup>2</sup>

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы моделирования процессов выбега, самозапуска группы асинхронных электродвигателей (АД) при кратковременных нарушениях электроснабжения (КНЭ) и понижениях напряжения при внешних коротких замыканиях (КЗ) удобные для программирования и практического применения. Установить интегральную реакцию группы АД при самозапуске на возмущающее воздействие с учетом их характеристик и длительности для установления допустимых предельных значений КНЭ. Разработать алгоритм переходного процесса самозапуска группы АД при использовании матричного и векторного представления данных при решении основного уравнения движения ротора и его компьютерную реализацию. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялись методы: последовательных приближений при решении основного электромеханического уравнения с учетом электромагнитных переходных процессов; метод Гаусса-Зейделя с ускорением сходимости итерационного процесса при решении уравнений параметров режима; метод узловых напряжений. Алгоритм реализован в среде VBA и проверен в среде Matlab Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрена модель АД по каталожным данным, алгоритм самозапуска группы АД при КНЭ и внешних КЗ с учетом электромагнитных переходных процессов, обладающий высокой точностью и удобный для практического применения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование каталожных данных АД дает возможность не проводить трудоемкие предварительные расчеты параметров АД. Применение метода Гаусса-Зейделя с ускорением сходимости, обеспечивает снижение количества итераций. Учет электромагнитных переходных процессов и эффекта вытеснения тока ротора позволяет оценить взаимное влияние двигателей и повысить точность расчетов. Использование метода узловых напряжений позволяет определить остаточное напряжение на секции шин с АД, если в первый момент двигатели включены на КЗ. Реализация алгоритма в среде VBA удобна для практического применения.

**Ключевые слова:** самозапуск; выбег; переходные процессы; асинхронный двигатель; кратковременные нарушения электроснабжения; скольжение; схема замещения.

**Для цитирования:** Галеева Р.У., Куксов С.В. Алгоритм моделирования самозапуска группы асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 181-193. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-181-193.

## ALGORITHM FOR SIMULATING THE SELF-STARTING OF A GROUP OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS WITH A SHORT-CIRCULATED ROTOR

RU. Galeeva<sup>1</sup>, SV. Kuksov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>ODU JSC «SO ES» RDU Tatarstan  
raisa\_gal.52@mail.ru<sup>1</sup>, ser.kuksov@mail.ru<sup>2</sup>

**Abstract:** PURPOSE. To consider the problems of modeling the processes of run-out, self-starting of a group of asynchronous electric motors (AM) in case of short-term power outages (NEC) and voltage drops in external short circuits (SC), convenient for programming and practical use. To establish the integral reaction of the AM group during self-start to the disturbing effect, taking into account their characteristics and duration to establish the permissible limit values of the NEC. To

*develop an algorithm for the transient process of self-starting of the AM group when using matrix and vector data representation when solving the basic equation of the rotor motion and its computer implementation. METHODS. When solving the problem, the following methods were used: successive approximations when solving the basic electromechanical equation, taking into account electromagnetic transient processes; Gauss-Seidel method with accelerating the convergence of the iterative process when solving the equations of the parameters of the regime; method of nodal stresses. The algorithm is implemented in VBA and tested in Matlab Simulink. RESULTS. The article describes the relevance of the topic, considers a model of AM according to catalog data, an algorithm for self-starting a group of an AM with NEC and external short circuits, taking into account electromagnetic transient processes, which has high accuracy and is convenient for practical use. CONCLUSION. The use of asynchronous motor catalogs makes it possible not to carry out laborious preliminary calculations of the parameters of asynchronous motors. The application of the Gauss-Seidel method with acceleration of convergence provides a decrease in the number of iterations. Taking into account electromagnetic transients and the effect of displacement of the rotor current allows you to evaluate the mutual influence of motors and increase the accuracy of calculations. The use of the method of nodal voltages makes it possible to determine the residual voltage on the busbar section with AM, if at the first moment the motors are switched on to short circuit. The implementation of the algorithm in the VBA environment is convenient for practical use.*

**For citation:** Galeeva RU, Kuksov SV. Algorithm for simulating the self-starting of a group of asynchronous electric motors with a short-circuited rotor. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):181-193. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-181-193.

### **Введение и литературный обзор**

В последние годы проблема качества электроснабжения становится все более актуальной из-за увеличения числа приемников, чувствительных к кратковременным нарушениям электроснабжения (КНЭ), искажению формы кривой, как питающего напряжения, так и тока. Если в экономике XX века качество электрической энергии измерялось числом ее прерываний (обычно 2-3 раза в год), то в новых условиях это определение не соответствует современному силовому оборудованию и электронике, которые чувствительны к кратковременным нарушениям длительности от 15 до 40 мс [1]. КНЭ происходят десятки раз в год и приводят к значительному экономическому ущербу, даже если их длительность составляет десятки миллисекунд. В такой ситуации решение проблемы надежности электроснабжения и точности определения уставок срабатывания автоматического ввода резерва (АВР) все чаще возлагается на потребителей электроэнергии [2]. Главная задача для высоковольтных АД это обеспечение успешного самозапуска после КНЭ. Современные устройства управления выполняются на микроконтроллерах и поэтому особо чувствительны к провалам напряжения. Реальная длительность провалов напряжения – десятые доли секунды. Сбой в программах управления технологическими процессами неизбежно ведет к аварийным остановам технологических процессов. Работа устройств АВР не может считаться эффективной, если не произойдет самозапуска двигателей потребителей или если за время самозапуска технологические параметры достигнут критических значений и будет остановлено производство. Для решения задачи оценки возможности самозапуска в настоящее время применяют различные модели, основанные на методах с использованием ряда допущений, поскольку точная оценка динамической устойчивости при учете электромагнитных переходных процессов и изменений в системе электроснабжения (СЭС), связанных с сильными возмущениями, весьма сложна [3, 4]. Уровень принимаемых допущений должен соответствовать конечной цели решаемой задачи. С этой точки зрения приближенные методы можно разделить на упрощенный и уточненный, отличающиеся уровнем принимаемых допущений. Уточненные методы расчета самозапуска учитывают ряд факторов, не принимаемых во внимание в упрощенных методах, но оказывающих существенное влияние на переходный процесс. Точность расчетов в значительной степени зависит от математической модели для оценки параметров схемы замещения АД на основе использования каталожных данных [5, 6]. Поэтому математической модели АД является одной из важнейших задач, требующей алгоритмизации. В работе разработан алгоритм и программа переходного процесса самозапуска группы АД с уточненным расчетом параметров схемы замещения АД. Для определения параметров режима в алгоритме используется более удобная система

синхронно вращающихся координат  $v(Im)$  и  $u(Re)$  взамен  $d, q$  (жестко связанной с ротором) для решения уравнений переходного процесса.

Разработанная компьютерная модель для исследования процесса выбега и самозапуска как одиночного так и группы АД удобна для практического применения для обеспечения надежности действия быстродействующих защит и уставок АВР.

Моделирование процесса выбега и самозапуска является актуальной задачей в связи с внедрением средств микропроцессорной техники для управления режимом работы АД, системой электроснабжения в целом и развития информационных технологий. Теоретические модели расчета выбега и самозапуска в основном проводятся по основному уравнению, описывающему характер электромеханических переходных процессов, по механическим характеристикам, тепловым моделям, используя различные методы определения параметров схемы замещения АД [7, 8]. Как правило, подобные расчеты трудоемки, а расчеты, основанные на допущениях, в конечном счете приводят к значительной погрешности. Ряд моделей режима самозапуска с учетом электромагнитных переходных процессов предполагают использование дорогостоящих сложных программных комплексов, требующих специальных знаний электротехнического персонала, что затрудняет их использование для практического применения [9]. Расчет при использовании имитационного моделирования требует предварительного определения параметров схемы замещения группы АД. Аналитические расчеты по каталожным данным с предварительными и последующими проверочными расчетами усложняют программу и увеличивают время расчета особенно, когда имеется группа АД [10]. Моделирование методом синтетических схем не позволяет определить допустимость самозапуска группы АД [8]. Недостатком моделирования самозапуска в среде *Matlab Simulink* в базовой модели является то, что нагрузочный момент на валу АД может быть чисто активным, что требует модернизацию базовых блоков [9]. Использование модели АД с многоконтурной схемой замещения ротора при исследовании группового самозапуска не нашла широкого применения в промышленных программах из-за отсутствия необходимой информации [11]. Модели АД, используемые в программах самозапуска, на основе данных конструкции электродвигателей или полученные путем данных испытаний, измерений достаточно точные, но требующие детального знания геометрии машины, свойств используемых материалов (используется в основном производителями), данных тестирования [12, 13].

К настоящему времени предлагается множество специализированных пакетов для решения прикладных задач, каждая из которых имеет узкую область использования [14]. Единственной доступной информацией о двигателях являются каталожные данные, на базе которых применяются аналитические методы (итерационный, оптимизационные, использующие генетический алгоритм и пр.) достоинством которых являются простота и высокая скорость расчетов при необходимой точности [14, 15].

В некоторых моделях вводятся допущения на количество и мощности АД, что предполагает их использование для ограниченной области применения [5, 13, 16]. Предлагаемые в некоторых исследованиях метод аппроксимации сопротивлений схемы замещения АД, а также упрощенное представление переходного процесса, приводит к существенной погрешности [18, 19, 20]. Единственной доступной информацией о двигателях являются каталожные данные, на базе которых применяются аналитические методы (итерационный, оптимизационные, использующие генетический алгоритм и пр.) Актуальным является создание программы, базирующейся на комплексном подходе при анализе динамики самозапуска группы АД как при КНЭ, так и при внешних КЗ, обладающей достаточно высокой точностью, простотой, малым временем расчета и удобной для практического применения. Разработанный алгоритм позволяет реализовать ситуации, которые приводят к возникновению самозапуска группы электродвигателей. Учет эффекта вытеснения тока в обмотке ротора и электромагнитных переходных процессов позволили оценить взаимное влияние двигателей при выбеге и самозапуске и повысить точность расчетов. Использование итерационного метода с ускорением сходимости по доминирующему параметру, метода последовательных интервалов позволило существенно сократить время расчета.

#### **Материалы и методы**

Результатирующее воздействие КЭЭ на работу электрических потребителей и сетей подразделяется на две группы составляющих этого воздействия - электромагнитную и электромеханическую. Одним из критериев надежности работы АД выше 1 кВ является их успешный самозапуск после КНЭ. С другой стороны условием, определяющим эффективность автоматического ввода резерва (АВР) двухтрансформаторной подстанции, является такое включение секционного выключателя, при котором безусловно сохраняются

нормальная работа всех (во всяком случае - всех ответственных) потребителей неповрежденной резервирующей секции шин и самозапуск ответственных потребителей резервированной секции. Требования к моделированию электромеханических переходных процессов определяются поставленной задачей: воспроизведение зависимостей электромагнитного и механического моментов, представление АД динамической моделью. Анализ возможности восстановления системы в первоначальное состояние был проведен по критериям динамической устойчивости с учетом явления поверхностного эффекта, электромагнитных переходных процессов и индивидуального моделирования АД [16,17].

Для рассмотрения динамики самозапуска ЭД составлены системы дифференциальных уравнений описывающих характер протекания электромагнитных и электромеханических переходных процессов с учетом уточняющих факторов. Для решения задачи использовался метод последовательных интервалов, поскольку точная оценка динамической устойчивости при учете всех переходных процессов и изменений в системе электрооборудования (СЭС), связанных с сильными возмущениями, весьма сложна [17].

Модель для каждого АД с короткозамкнутым ротором представлена соответствующим одним эквивалентным контуром с переменными параметрами: активным сопротивлением статорной обмотки  $R_1$ ; активным и индуктивным сопротивлениями обмотки ротора  $R_{2C}$ ,  $X_{\sigma 2C}$ , соответствующие синхронному режиму, соответственно; активным и индуктивным сопротивлениями обмотки ротора, соответствующие пусковому режиму  $R_{2П}$ ,  $X_{\sigma 2П}$ , соответственно, сопротивлением взаимной индукции между обмотками статора и ротора  $X_{12}$ ; индуктивным сопротивлением рассеяния обмотки статора  $X_{\sigma 1}$ . Для определения параметров схемы замещения была составлена система уравнений, выражающих параметры режима, соответствующие каталожным данным, через параметры схемы замещения [17]. В качестве каталожных параметров режима нелинейно зависящих от параметров схемы замещения АД были выбраны: пусковой момент  $M_{П}$ , пусковой ток  $I_{П}$ , номинальный момент  $M_{ном}$ , максимальный момент  $M_{макс}$ , номинальная реактивная мощность  $Q_{ном}$ :

Пусковой момент при скольжении  $s=1$ :

$$M_{П} = \frac{1}{\eta_{ном} \cos \varphi_{ном}} [\operatorname{Re}[\frac{1}{Z(s)}] - I_{П}^2 R_1], \quad (1)$$

где  $Z(s) = f(R_1, X_{\sigma 1}, X_{12}, R_{2C}, X_{\sigma 2C}, s)$  – эквивалентное комплексное сопротивление двигателя при скольжении  $s$ ;  $\eta_{ном}$  – номинальный КПД АД;  $\cos \varphi_{ном}$  – номинальный коэффициент мощности;  $I_{П}$  – пусковой ток.

Пусковой ток при скольжении  $s=1$ :

$$I_{П} = [\frac{1}{Z(s)}]. \quad (2)$$

Номинальный момент при скольжении  $s = s_{ном}$ :

$$M_{ном} = \frac{1}{\eta_{ном} \cos \varphi_{ном}} [\operatorname{Re}[\frac{1}{Z(s)}] - I_{ном}^2 R_1]. \quad (3)$$

Номинальная реактивная мощность при скольжении  $s = s_{ном}$ :

$$Q_{ном} = \operatorname{Im}[\frac{1}{Z(s)}]. \quad (4)$$

Максимальный момент при скольжении  $s = s_{кр}$ :

$$M_{макс} = \frac{1}{\eta_{ном} \cos \varphi_{ном}} [\operatorname{Re}[\frac{1}{Z(s)}] - I_{кр}^2 R_1]. \quad (5)$$

Эффект вытеснения тока в обмотке ротора с достаточной точностью описывается следующими зависимостями [8]:

$$R_2(s) = R_{2C} + (R_{2П} - R_{2C})\sqrt{s},$$

$$x_{2\sigma}(s) = \frac{x_{\sigma 2C} x_{\sigma 2П}}{x_{\sigma 2П} + (x_{\sigma 2C} - x_{\sigma 2П})\sqrt{s}}.$$

Уравнения (1) – (5) представляют пять нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных параметров схемы замещения. Получить явно выраженное решение не удастся, поэтому расчет был произведен методом Гаусса-Зейделя с ускорением сходимости итерационного процесса. Для этого в каждом из уравнений системы:

- 1) определялся доминирующий в этом уравнении параметр схемы замещения;
- 2) преобразовывалось каждое уравнение к виду, удобному для организации расчетов по методу последовательных приближений;
- 3) определялись оптимальные коэффициенты ускорения сходимости и начальное приближение решения.

Расчет параметров схемы замещения АД с короткозамкнутым ротором осуществляется в следующей последовательности: вначале рассчитываются начальные приближения доминирующих параметров, а затем — начальные приближения остальных параметров схемы замещения АД и далее определялись расчетные параметры режима, а на их основе следующие приближения доминирующих параметров.

Расчеты проводились методом последовательных приближений до тех пор, пока не выполнялось условие:

$$|\Delta M_{П}| \cup |\Delta I_{П}| \cup |\Delta M_{НОМ}| \cup |\Delta Q_{НОМ}| \cup |\Delta M_{МАКС}| < \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  — требуемая точность расчетов последовательных приближений (обычно  $\varepsilon = 0,001$ );  $\Delta M_{П}$ ,  $\Delta M_{НОМ}$ ,  $\Delta M_{МАКС}$  — разность между расчетными и каталожными значениями пускового, номинального, максимального моментов соответственно;  $\Delta I_{П}$ ,  $\Delta Q_{НОМ}$  — разность между расчетными и каталожными значениями пускового тока; номинальной реактивной мощности соответственно.

Переходной процесс описывался системой дифференциального электромеханического уравнения движения ротора АД

$$T_j \frac{\partial \omega}{\partial t} = M_{\Sigma} - M_{\text{мех}}$$

и векторно-дифференциального уравнения электромагнитного переходного процесса в его обмотках [16]:

$$T_2' \left( \frac{d\dot{E}''}{dt} + js\dot{E}'' \right) + \dot{E}'' = \frac{x_1 - x''}{x_1} U,$$

где  $M_{\Sigma}$  — электромагнитный момент двигателя;  $M_{\text{мех}}$  — момент сопротивления рабочего механизма;  $T_j$  — механическая постоянная времени или постоянная инерции вращающихся частей — время, в течение которого ротор машины под действием момента, определенного по номинальной мощности, разгоняется из неподвижного состояния до номинальной частоты вращения;  $T_2'$  — постоянная времени обмотки ротора;  $U$  — напряжение, подведенное к двигателю;  $\frac{x_1 - x''}{x_1}$  — выражение, определяемое параметрами схемы замещения;  $s$  — скольжение;  $\dot{E}''$  — сверхпереходная ЭДС.

Начальные условия для системы дифференциальных уравнений определялись свойством непрерывности параметров частоты  $\omega$  и сверхпереходной ЭДС  $\dot{E}''$ :

$$\omega(+0) = \omega(-0), \quad \dot{E}''(+0) = \dot{E}''(-0).$$

Зависимость выбора длительности интервала от точности расчета определялась формулой:

$$\Delta t = T_j \cdot \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  - желательная погрешность вычисления.

В общем виде для большинства вращающихся механизмов зависимость момента от угловой скорости ротора и сопротивления можно выразить формулой:

$$M_{\text{мех}} = M_{\text{мех.нач}} + (M_{\text{мех.ном}} - M_{\text{мех.нач}}) \left( \frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^p,$$

где  $M_{\text{мех.нач}}$  – начальный момент сопротивления вращающегося механизма (без учета момента трения покоя);  $M_{\text{мех.ном}}$  – номинальный момент сопротивления механизма;  $p$  – показатель степени;  $n_{\text{ном}}$  – номинальная частота вращения, при которой момент сопротивления равен номинальному.

Общее уравнение электромагнитного момента АД определялось из выражения активной мощности  $M_3 = P/\omega_0$  [16]:

$$M_3 \approx \frac{\frac{UE_B''}{x''} \sin \Theta_{E'} + \frac{UE_C''}{x''} \sin(\Theta_{E'} - st)}{\omega_0},$$

где  $E_B''$ ,  $E_C''$  – вынужденная, свободная составляющие сверхпереходной ЭДС АД соответственно;  $\Theta_{E'}$  – угол между векторами напряжений сети и вынужденной ЭДС АД.

Выражение для вынужденной составляющей сверхпереходной ЭДС можно получить из условия  $\frac{dE''}{dt} = 0$ :

$$\dot{E}_B'' = \frac{x_1 + x''}{x_1} \frac{U}{1 + jT_2' s}.$$

Для свободной составляющей сверхпереходной ЭДС  $\dot{E}_C''(t)$  пропорциональной суммарному магнитному потоку, в начальный момент после изменения режима АД справедливо соотношение:

$$\dot{E}_C''(+0) = \dot{E}''(-0) - \dot{E}_B''(+0).$$

Если в первый момент двигателя включены на короткое замыкание, то вычисление остаточного напряжения  $U(+0)$  на шинах, проводилось методом узловых потенциалов:

$$U(+0) = \frac{\sum_{j=1}^n E_j'' Y_j''}{\sum_{j=1}^n Y_j'' + Y_c},$$

где  $E_j''$  – сверхпереходная ЭДС  $j$ -го АД, до возникновения возмущения в момент времени  $t(-0)$ ;  $Y_j'' = \frac{1}{x_j}$  – сверхпереходная проводимость  $j$ -го двигателя;  $Y_c$  – проводимость системы

до точки КЗ;  $n$  – количество электродвигателей на шине одного ТП.

В случае, если пропажа питания секции шин происходит из-за отключения линейного выключателя, проводимость системы можно считать равной нулю. Во время этого режима выбега сверхпереходные ЭДС АД затухают значительно медленнее, чем при трехфазном коротком замыкании вблизи секции шин, что в свою очередь может привести к

большому броску тока в первый момент после включения секционного выключателя посредством АВР.

Расчет ведется до тех пор, пока время выбега не совпадет со временем действия АВР:

$$t_B = i\Delta t = t_{ABP},$$

где  $i$  – номер интервала расчета.

На рис.1 приведен алгоритм расчета переходного процесса при выбеге, самозапуске одиночного АД с короткозамкнутым ротором (группы АД) с учетом эффекта вытеснения тока ротора, электромагнитных переходных процессов и нелинейностей параметров режима.

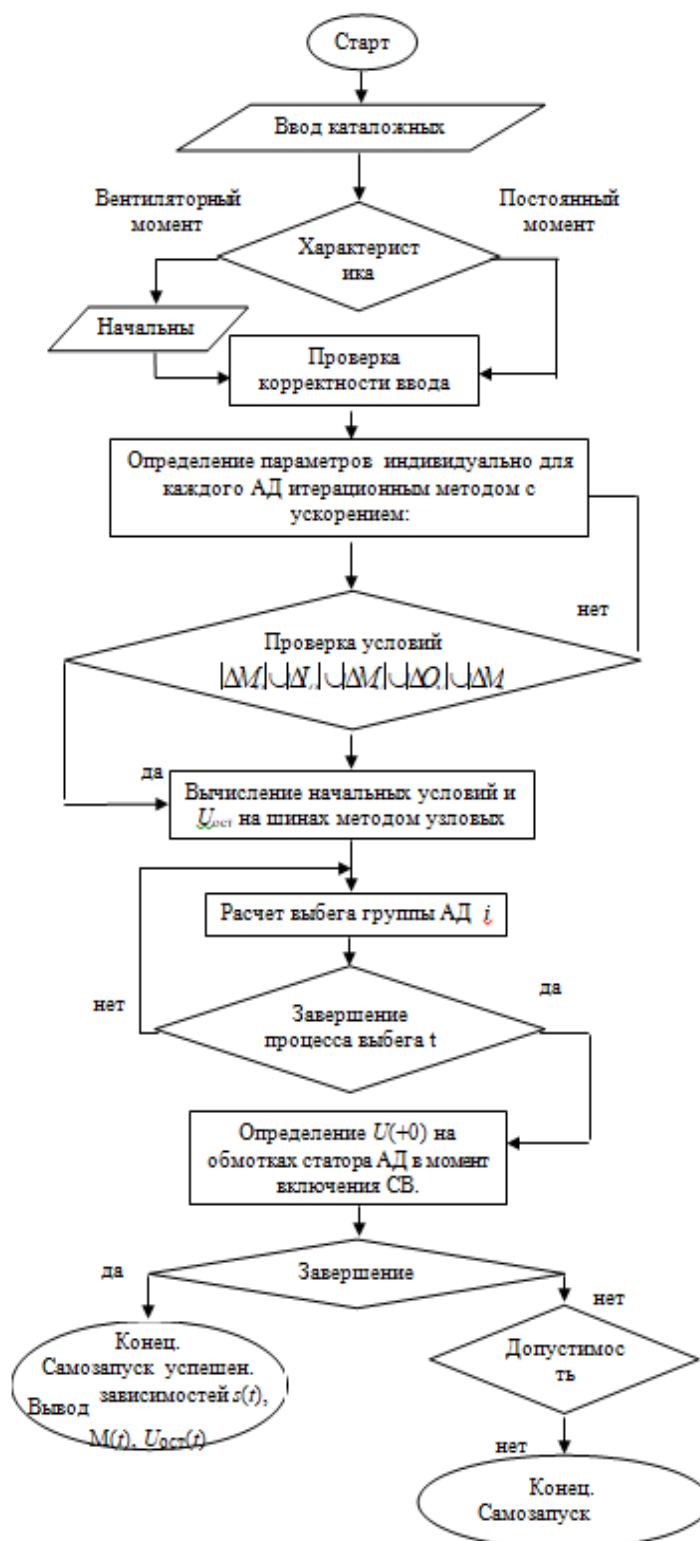


Рис.1. Алгоритм самозапуска АД с

Fig. 1. Algorithm for self-starting the AD with a

Предложенный метод расчета производится для наихудшего случая с наибольшим броском тока и временем самозапуска, что на практике встречается довольно редко. Благодаря этому возможность самозапуска и его продолжительность рассчитывается с запасом для более благоприятного случая. Успешным считается такой самозапуск, когда АД разогнался до рабочей скорости и при этом температура его обмоток не превысит допустимого значения, а так же не произойдет нарушение технологического процесса. Существуют несколько методов расчета нагрева обмоток машин переменного тока. Однако практически все асинхронные двигатели, выпускаемые промышленностью в настоящее время, обеспечивают возможность как минимум однократного самозапуска без превышения температуры обмоток сверх допустимой [7].

По описанному выше алгоритму была реализована программа в среде VBA, позволяющая оценить допустимость самозапуска одного или группы эквивалентных асинхронных электродвигателей после кратковременного нарушения электроснабжения или его недопустимого снижения в результате внешнего КЗ. Данная программа учитывает просадку напряжения в результате самозапуска электродвигателей, а также электромагнитные переходные процессы, возникающие в результате их группового выбега, что позволяет группировать АД по характерным категориям, группам и типам; подключать любое количество электродвигателей, изменять уставки АВР; изменять каталожные данные по мере поступления информации от новых производителей. В качестве электрической схемы распределительного устройства предприятия используется рабочая система шин секционированная выключателем имеющая отдельные независимые источники питания каждой полусекции шин, как наиболее распространенная в системе электроснабжения промышленных предприятий имеющих крупную высоковольтную электродвигательную нагрузку.

Для моделирования переходного процесса используется программный продукт, выполненный в среде Visual Basic for Applications (VBA).

Исходными данными для работы программы являются (рис.2):

1. Каталожные параметры для каждого АД.
2. Типы механизмов приводимых в движение электродвигателями.
3. Параметры системы.
4. Уставки срабатывания АВР.
5. Допустимое время самозапуска (время разворота АД до номинальных оборотов со времени пропажи питания).

The dialog box 'Form1' contains the following input fields and controls:

- System Parameters:**
  - Uост = 0 о.е.
  - tapр = 1 с.
  - trуск = 5 с.
  - Xс = 0,42 Ом.
- Motor Data (AD1, AD2, AD3):**
  - AD1: P=1000 кВт, cosφ=0,91, КПД=0,94 о.е., n=1490 об/мин, Iп=6,2 о.е., Мп=1,2 о.е., Мmax=2,5 о.е., Кол-во двигателей: 1.
  - AD2: P=200 кВт, cosφ=0,91, КПД=0,94 о.е., n=1490 об/мин, Iп=7 о.е., Мп=1,3 о.е., Мmax=2,5 о.е., Кол-во двигателей: 1.
  - AD3: P=750 кВт, cosφ=0,91, КПД=0,94 о.е., n=2950 об/мин, Iп=6 о.е., Мп=1,1 о.е., Мmax=2,5 о.е., Кол-во двигателей: 1.
- Characteristics of load mechanisms:**
  - Tf = 5 с.
  - Tf = 2,5 с.
  - Tf = 3 с.
  - Вентиляторный момент сопротивления механизма (checkbox).
- Buttons:** 'Рассчитать' (Calculate).

Рис. 2. Диалоговое окно ввода каталожных данных единичного АД или группы АД

Fig. 2. Dialog box for entering catalog data for a single BP or a group of BP



### Результаты

В результате расчета строятся зависимости электромагнитного момента  $M_d = f(t)$ , скольжения ротора АД  $s = f(t)$  и остаточного напряжения от времени  $U_{ост} = f(t)$  в течении всего процесса (рис.3). В случае неуспешного самозапуска отображается окно вывода, аналогичное представленному на рис.3. Визуально отображается успешность самозапуска, а также рассчитывается время разворота каждого эквивалентного АД. Визуализация зависимостей осуществлена с помощью программы в среде VBA.

Для проверки работоспособности программы, а также для оценки ее погрешности была реализована электромеханическая модель самозапуска АД в среде *Matlab Simulink*. В среде *Matlab* реализован модульный принцип построения модели [21, 22, 23].

В качестве примера приведены результаты расчета времени самозапуска АД типа А-13-59-4 по разработанной программе и в среде *Matlab Simulink*.

Каталожные данные АД:

$U_{ном} = 6$  кВ;  $P_{ном} = 1000$  кВт,  $\cos\varphi = 0,91$ , КПД = 0,94,  $n_{ном} = 1490$  об/мин,  $I_{п*} = 6,2$ ,  $M_{п*} = 1,2$ ,  $M_{max*} = 2,5$ . Время срабатывания АВР составляет 1 с.

Рабочий момент механизма принят равным номинальному моменту двигателя и является постоянной величиной, что характерно для мельниц, транспортеров, компрессоров и других механизмов:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_0} = \frac{P_{ном}}{2\pi \cdot n_0} = \frac{1000000}{2 \cdot 3,14 \cdot 1500 / 60} = 6370, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $n_0 = 1500$  об/мин - синхронная частота вращения ротора, принята наиболее близкое значение к  $n_0 = 1490$  об/мин из стандартного ряда; постоянная инерции  $T_j = 5$  с.

Момент инерции механизма:

$$J = T_j \frac{P_{ном}}{(2\pi \cdot n_0)^2} = 5 \frac{1000000}{(2 \cdot 3,14 \cdot 1500 / 60)^2} = 203 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

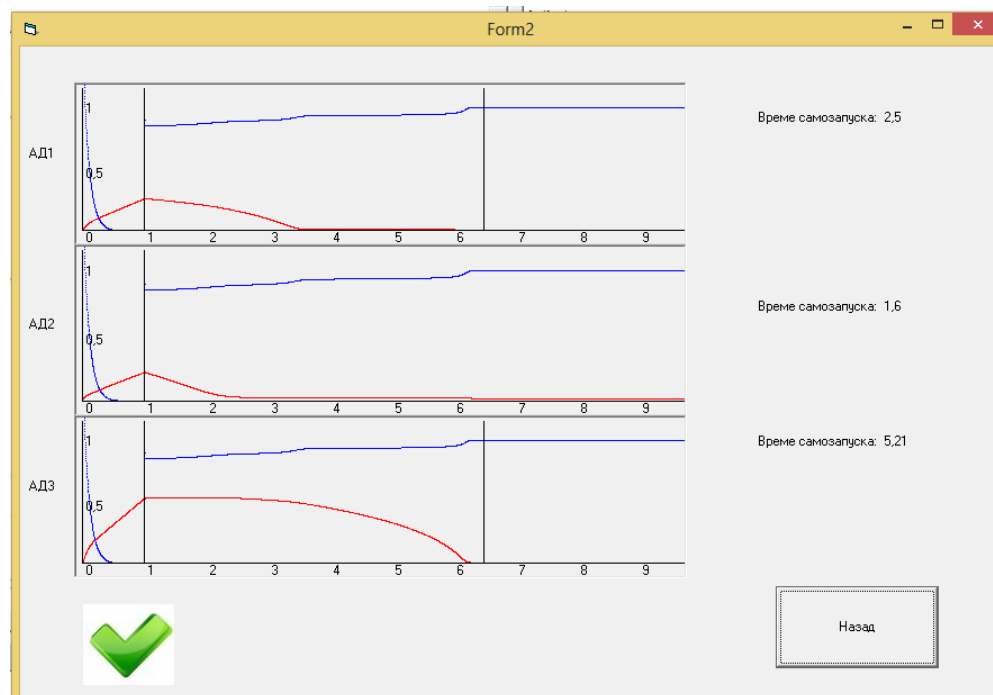


Рис. 3. Окно вывода результатов расчета времени самозапуска и зависимостей  $M_d = f(t)$ ,  $s = f(t)$  и  $U_{ост} = f(t)$  в относительных единицах

Fig. 3. The window for displaying the results of calculating the self-start time and the dependencies  $M = f(t)$ ,  $s = f(t)$  and  $U = f(t)$  in relative units

Зависимости электромагнитного момента и скольжения от времени  $M_{\text{э}} = f(t)$ ,  $s = f(t)$ , соответственно, построенные в расчетной программе и имитационной модели представлены на рис.4,5.

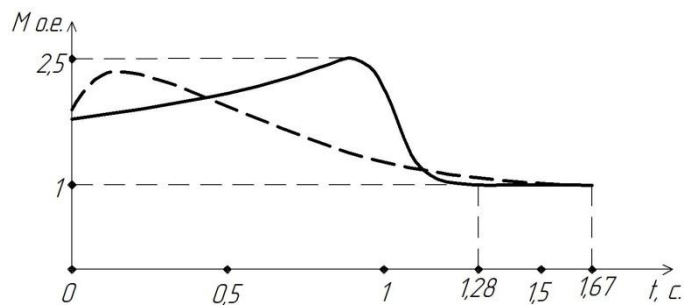


Рис. 4. Зависимость электромагнитного момента от времени  $M_{\text{э}} = f(t)$

Fig. 4. Dependence of the electromagnetic moment on time

————— зависимость построенная в программе расчета времени самозапуска;  
 - - - - - зависимость построенная при моделировании в среде *Matlab Simulink*.

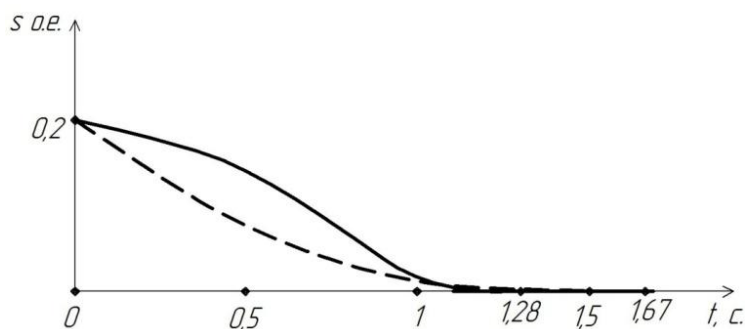


Рис. 5. Зависимость скольжения от времени  $s = f(t)$

Fig. 5. Dependence of sliding on time

————— зависимость построенная в программе расчета времени самозапуска;  
 - - - - - зависимость построенная при моделировании в среде *Matlab Simulink*.

Как видно из графиков самозапуск прошел успешно, двигатель достиг номинальных оборотов ( $s = 0$ ) за время:  $t_{\text{М}} = 1,67$  с (для модели построенной в среде *Matlab Simulink*);  $t_{\text{П}} = 1,28$  с (для программы расчета времени самозапуска).

### Заключение

Расчеты параметров схемы замещения для представленной модели АД равны каталожным данным кратности пускового и максимального момента АД для обеих зависимостей. Возможность самозапуска АД, смоделированного в среде *Matlab Simulink* и в программе расчета времени самозапуска, совпадает для всех случаев. Различие времени самозапуска для модели в среде *Matlab Simulink* и программы расчета времени самозапуска при скольжениях  $s > 0$  объясняется различием характеристик моментов из-за нелинейного изменения параметров цепи ротора при больших скольжениях. Характер изменения сопротивления ротора зависит лишь от конструктивных особенностей и это изменение не может быть вычислено для каждого двигателя в отдельности. Также дополнительная погрешность для модели в среде *Matlab Simulink* вносится упрощенной методикой определения параметров схемы замещения АД. Индивидуальное моделирование каждого АД позволило воспроизвести переходы двигателей из двигательного в генераторный режим и обратно при коротких замыканиях в сети и при КНЭ в процессе группового выбега и переходом к индивидуальному выбегу. В программе итерационный цикл в расчете параметров схемы замещения группы АД не повышает длительность расчета.

Программа расчета переходного процесса при самозапуске группы АД в среде *VBA* доказала свою работоспособность и возможность ее практического применения. Программа позволяет осуществить проверку обеспеченности самозапуска как одиночного АД, так и

группы двигателей; выбрать рациональное время включения; осуществить проверку правильности выбора АД, провести исследования взаимного влияния двигателей как при КНЭ, так и внешних КЗ, удобна для практического применения.

### Литература

1. Пупин В.М., Жуков В.А. Комплекс БАВР. Быстродействие повышает надежность электроснабжения // Новости ЭлектроТехники. 2012. № 4 (76). С. 2–4.
2. Мелешкин Г.А., Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем // СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики». Монография. 2006. Книга 1. С. 369.
3. Семёнов А.С., Егоров Ай.Н., Харитонов Я.С., и др. Оценка электромагнитной совместимости высоковольтных преобразователей частоты в электротехнических комплексах // Вестник КГЭУ. 2019. №4 (44).
4. Pavlov V.E., Peregudova I.G. Study of conditions for group self- starting electric drives of turbo mechanisms // Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. Article № 8877660, P. 404-409.
5. Макеев М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Журн. Вектор науки. ТГУ. 2013. № 1 (23). Раздел Технические науки. С. 108–112.
6. Дорощенко И. В., Погуляев М.Н., Веппер Л.В. Анализ методик расчета параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя по каталожным данным // Учреж. Образ. Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого. Республика Беларусь. 2016. С. 136–137.
7. Стыскин А.В., Уразбахтина Н.Г. Моделирование и анализ возможности самозапуска асинхронных двигателей собственных нужд // Уфимский государственный Авиационный технический университет. Журнал Электротехнические комплексы и системы. Уфа. 2017. С. 43–48.
8. Славутский А.Л. Моделирование самозапуска асинхронного двигателя в составе узла комплексной нагрузки // Вест. Чуваш. Ун-та. 2018. № 3. С. 132–137.
9. Жилин Б.В., Исаев А.С. Моделирование самозапуска асинхронного двигателя // Электротехнические комплексы и системы. Известия ТулГУ. Технические науки. Тула. 2019. № 11. С. 103-108.
10. Осипов В.С. Аналитический метод расчета параметров схемы замещения трехфазных асинхронных двигателей серии АИР // Вестник СамГУ. Сер. Технические науки. № 2 (54). 2017. С. 108–120.
11. Меркурьев Г.В., Шарлин Ю.М. Устойчивость энергосистем. Расчеты // Монография. СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики». 2006. С. 300.
12. Wengerkiewicz Carlos A.C. et al . Estimation of Three-Phase Induction Motor Equivalent Circuit Parameters from Manufacturer Catalog Data. J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl., São Caetano do Sul . V. 16. N. 1. 2017. P. 90–107.
13. Sivokobylenko V.F., Tkachenko S.N. A Method of Experimental Determination of Parameters of Equivalent Circuits of Induction Motors. Power Technol Eng. 51.2017. P. 108–113.
14. Asim Gökhan Yetgin et al. Squirrel Cage Induction Motor Design and the Effect of Specific Magnetic and Electrical Loading Coefficient. International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers. IJAMEC. 2019. 7(1). P. 1–8.
15. Guimarães. J.M.C., Bernardes J.V, Hermeto A.E. et al. Determination of three-phase induction motors model parameters from catalog information. IEEE PES General Meeting Conference & Exposition. National Harbor. MD. USA. 2014. P. 1–5.
16. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой // МЭИ. Москва. 1997. С. 424.
17. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, Sim Power Systems и Simulink // ДМК Пресс. Москва. 2008. С. 288.
18. Сафарян В.С., Геворгян С.Г. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энерг. объедин. СНГ. 2015. № 6. С. 20–34.
19. Бурков А.Ф., Юрин В.Н., Аветисян В.Р. Исследование возможностей повышения энергоэффективности асинхронных двигателей Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. № 20(9-10). С.92-100.
20. Лащенков М.Б. Влияние самозапуска мощных двигателей на систему электроснабжения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 1. С. 134–140.

21. Rashad E.E.M. Theory and steady-state analysis of series-connected wound-rotor induction motor in sub-synchronous mode // PECON 2016. IEEE 6th International Conference on Power and Energy, Conference Proceeding, 2016. Article № 7951618. P. 528-533.

22. Дьяконов В.П. Matlab 6.5 SP1/7/7 Sp2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики // М. Солон-Пресс. 2016. С. 456.

#### Авторы публикации

**Галеева Раиса Усмановна** – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Куксов Сергей Вячеславович** – ОДУ АО «СО ЕС» РДУ Татарстан, ведущий специалист.

#### References

1. Pupin VM, Zhukov VA. Complex BAVR. High-speed performance increases the reliability of power supply. *News of ElectroTechnics*. 2012;4 (76):2–4.

2. Dergachev VS. Methods for constructing measuring and starting organs of microprocessor devices for high-speed automatic switching on of a reserve. *Vestnik ISEU*. 2021;1:41–48.

3. Meleshkin GA, Merkuriev GV. *Stability of power systems*. SPb.: NOU «Energy Personnel Training Center». Monograph. 2006;1:369.

4. Kurbangaleev UK. *Self-starting of engines for own needs of power plants*. NTF Energoprogress. Moscow. 2001. P. 64.

5. Makeev MS, Kuvshinov AA. Algorithm for calculating the parameters of the equivalent circuit of an induction motor according to catalog data. *Journal. Science vector. TSU*. 2013;1 (23):108–112.

6. Doroshchenko IV, Pogulyaev MN, Vepper LV. Analysis of methods for calculating the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous electric motor according to catalog data. *Uchrezh. Form. Gom. State Those. University them. P.O. Sukhoi. Republic of Belarus*. 2016. P. 136–137.

7. Styskin AV, Urazbakhtina NG. Modeling and analysis of the possibility of self-starting of asynchronous motors for auxiliary needs. Ufim. State Aviats. Those. Univ. *Journal Electrotechnical complexes and systems*. Ufa. 2017. P. 43–48.

8. Slavutsky AL. Simulation of self-starting of an asynchronous motor as part of a complex load unit. *Vest. Chuvash. University*. 2018;3:132–137.

9. Zhilin BV, Isaev AS. Simulation of self-starting of an asynchronous motor. Electrotechnical complexes and systems. *Bulletin of TUSU. Technical science*. 2019;11:103–108.

10. Osipov VS. Analytical method for calculating the parameters of the equivalent circuit of three-phase asynchronous motors of the AIR series. *Vest. Samar. State University. Ser. Technical science*. 2017;2 (54):108–120.

11. Merkuriev GV, Charlin YuM. *Stability of power systems. Calculations*. Monograph. SPb.: NOU «Energy Personnel Training Center». 2006. P. 300.

12. Wengerkievicz Carlos A.C. et al. Estimation of Three-Phase Induction Motor Equivalent Circuit Parameters from Manufacturer Catalog Data. *Journal Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, São Caetano do Sul. 2017;16(1):90–107.

13. Sivokobylenko VF, Tkachenko SN. A Method of Experimental Determination of Parameters of Equivalent Circuits of Induction Motors. *Power Technol Eng.* 2017;51:108–113.

14. Asım Gökhan Yetgin et al. Squirrel Cage Induction Motor Design and the Effect of Specific Magnetic and Electrical Loading Coefficient. International. *Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*. 2019;7(1):1–8.

15. Guimarães JMC, Bernardes JV, Hermeto AE et al. *Determination of three-phase induction motors model parameters from catalog information*. IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. National Harbor. MD. USA. 2014. P. 1–5.

16. Gamazin SI, Stavtsev VA, Tsyruk SA. *Transient Processes in Industrial Power Supply Systems Caused by Electric Motor Load*. MPEI. Moscow. 1997. P. 424.

17. Chernykh IV. *Modeling of electrical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink*. DMK Press. Moscow. 2008. P. 288.

18. Safaryan VS, Gevorgyan S.G. Determination of the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous machine. *Energetika. Izv. and energy meal*. 2015;6:20–34.

19. Burkov AF, Yurin VN, Avetisyan VR. Investigation of the possibilities of increasing the energy efficiency of induction motors. *Izv. Higher. educational head energy problems*. 2018;20 (9-10):92-100.

20. Laschenov MB. Influence of self-starting of powerful motors on the power supply system. *Mining information and analytical bulletin*. 2019;1:134–140.

21. Chernykh IV. *Modeling of electrical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink*. DMK Press. Moscow. 2008. P. 288.

22. Dyakonov VP. Matlab 6.5 SP1/ 7/7 Sp2 + Simulink 5/6. *Artificial intelligence and bioinformatics tools*. M. Solon-Press. 2016. P. 456.

#### **Authors of the publication**

***Raisa U. Galeeva*** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

***Sergey V. Kuksov*** – ODU of JSC SO ES, RDU Tatarstan, leading Specialist.

***Получено*** ***19.04.2021 г.***

***Отредактировано*** ***06.05.2021 г.***

***Принято*** ***14.05.2021 г.***