



4. Rudnick H. Pioneering electricity reform in South America // IEEE Spectrum, August 1996, pp. 38–44.
5. Hunt S., Shuttleworth G. Unlocking the grid // IEEE Spectrum, July 1996, pp. 20–25.
6. Barkovich B.R., Hawk D.V. Charting a new course in California// IEEE Spectrum, July 1996, pp. 26–31.

7. Васильев М.Ю., Филатов А.Ю. Модели стратегического взаимодействия сетевых и генерирующих компаний на рынке передачи электроэнергии // Журнал Новой экономической ассоциации. 2011. №10. С.54–73.

УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

© Г.Г. Гоппе¹, В.Е. Павлов²

Иркутский государственный технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

На основе исследований с использованием вычислительных экспериментов математических моделей технологических схем трансформаторы – электроприводы – турбомеханизмы – трубопроводные магистрали промышленных установок рассмотрены условия самозапуска электроприводов при возмущениях в электрических сетях.

Ил. 5. Библиогр. 3 назв.

Ключевые слова: асинхронный двигатель; самозапуск электроприводов; турбомеханизм; трубопроводная магистраль; напор; производительность.

STUDYING CONDITIONS OF PROCESS PLANT ELECTRIC DRIVE SELF-STARTING UNDER DISTURBANCES IN ELECTRICAL NETWORKS

G.G. Goppe, V.E. Pavlov

Irkutsk State Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

The article examines the conditions of electric drive self-starting under the disturbances in electrical networks based on the studies using computational experiments of technological scheme mathematical models: transformers – electric drives – turbo mechanisms – pipelines of industrial plants.

5 figures. 3 sources.

Key words: induction motor; self-starting of electric drives; turbo mechanism; pipe line; pressure; performance.

На большинстве промышленных предприятий страны растет износ энергетического и электротехнического оборудования. Известно, что изношенное электрооборудование влияет на рост перебоев в электропитании потребителей и числа аварий в электрических сетях.

Возмущения в электрических сетях и их последствия становятся особенно острой проблемой для предприятий с непрерывным циклом производства. Провалы напряжения приводят к отключению коммутационных аппаратов электроприводов, производственный цикл нарушается, а это приводит к большим экономическим потерям. Число возмущений растет по мере износа электрооборудования, которое достигло в энергетике 60–70%.

В этих условиях предприятия принимают меры по защите от последствий, связанных с возмущениями в электрических сетях. Одним из эффективных мероприятий, в этом направлении, является самозапуск электроприводов ответственных механизмов.

Цель работы состоит в том, чтобы получить дина-

мические математические модели устройств технологической схемы: трансформатор – электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль для исследований условий самозапуска с помощью вычислительных экспериментов на математических моделях технологического комплекса при воздействии на него соответствующих возмущений в электрической сети. Результаты этих экспериментов можно использовать при создании схем самозапуска реальных установок. Для этого необходимо рассмотреть сначала модели отдельных устройств, а потом и для комплекса в целом.

Использованный в настоящей работе подход для исследований условий самозапуска отличается от известных по литературным источникам тем, что здесь рассматриваются математические модели устройств технологической схемы: трансформатор – электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль. Адекватность реальным процессам для разработанных математических моделей проверена многолетним использованием их не только для усло-

¹Гоппе Гарри Генрихович, доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и электрического транспорта, тел.: (3952) 389095, e-mail: elprivod@istu.edu

Goppe Garry, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Electric Drive and Electric Transport, tel.: (3952) 389095, e-mail: elprivod@istu.edu

²Павлов Владимир Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрического транспорта, тел.: 89149306162, e-mail: pvew52@mail.ru

Pavlov Vladimir, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Electric Transport, tel.: 89149306162, e-mail: pvew52@mail.ru



вий самозапуска, но для систем автоматического управления технологическими процессами.

Современные быстродействующие ПЭВМ и их программное обеспечение позволяют моделировать (исследовать) процессы в такой сложной системе, как трансформатор и несколько десятков подключенных к нему устройств в виде электроприводов и приводимых ими механизмов.

Процесс анализа поведения переменных как энергетических, так и технологических превращается в стройную систему, позволяющую с высокой точностью рассчитать любую из исследуемых величин и во время действия возмущения, и в процессе восстановления переменных и в установившемся режиме.

Следует отметить, что точность соответствия результатов, полученных при вычислительных экспериментах, реальным процессам в объектах определяется не только качеством и содержанием математических моделей, но не в меньшей степени – чистотой исходных данных. Поэтому те данные, которые представлены технологами и энергетиками в соответствующих анкетах, тщательно проверялись и согласовывались дополнительно.

На основе этих показателей рассчитывались параметры математических моделей.

Динамические модели устройств технологического комплекса. Если от трансформатора питается несколько электроприводов, для которых предусмотрен самозапуск, то в исследуемую математическую модель целесообразно включить и математическую модель самого трансформатора. Объясняется это тем, что суммарный ток одновременно запускаемых электроприводов может оказаться достаточно большим, это снижает напряжение трансформатора и пуск будет затяжным.

Но самым важным является даже не длительность самозапуска, а величина самого напряжения во время пуска: она может снизиться настолько, что некоторые коммутационные аппараты электроприводов, подключаемые с помощью пассивных технических средств самозапуска, не сработают. Экспериментальные исследования показали, что несколько контакторов, из партии испытуемых, имеют величину напряжения притяжения $U_{прит} = 205$ В. Это означает, что если напряжение трансформатора снизится только на 7% U_n , то коммутационный аппарат не сработает.

Поэтому включение в математическую модель комплекса математической модели трансформатора предусматривает получение, прежде всего графика изменения вторичного напряжения в процессе самозапуска.

Математическая модель трансформатора взята из библиотеки Simulink программной среды Matlab. В ее основе лежит «Т» – образная схема замещения трансформатора мощностью 1 Мва с напряжением на входе 6 кВ и выходным линейным – 0,4 кВ. Выходной сигнал трансформатора – трехфазная симметричная система напряжений, сдвинутых на 120 угловых градусов относительно друг друга.

Математическая модель асинхронного двигателя принята в виде «полной» математической модели в

форме уравнений Парка-Горева [3]. Она тоже имеет некоторые разновидности. Для исследования условий самозапуска более удобной является модель в неподвижных координатах (α, β), где она представляется следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} U_{S\alpha} &= r i_{S\alpha} + L'_S \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{R\alpha} - k_R p \omega \Psi_{R\beta}; \\ U_{S\beta} &= r i_{S\beta} + L'_S \frac{di_{S\beta}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{R\beta} + k_R p \omega \Psi_{R\alpha}; \\ 0 &= -K_R R_R i_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} \Psi_{R\alpha} + \frac{d\Psi_{R\alpha}}{dt} + p \omega \Psi_{R\beta}; \\ 0 &= -K_R R_R i_{S\beta} + \frac{1}{T_R} \Psi_{R\beta} + \frac{d\Psi_{R\beta}}{dt} + p \omega \Psi_{R\alpha}; \\ M &= \frac{3}{2} p K_R (\Psi_{R\alpha} i_{S\beta} - \Psi_{R\beta} i_{S\alpha}); \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M - M_c, \end{aligned} \quad (1)$$

где $U_{S\alpha}, U_{S\beta}, i_{S\alpha}, i_{S\beta}, \Psi_{S\alpha}, \Psi_{S\beta}$ – проекции на ортогональные оси координат α и β обобщенных пространственных векторов напряжения, тока статора и потока сцепления ротора; ω – частота вращения машины; M – момент, развиваемый двигателем; M_c – момент статический; p – число пар полюсов машины; J – приведенный к валу двигателя момент инерции всех вращающихся частей.

Остальные параметры рассчитываются на основе данных Т-образной схемы замещения двигателя [2].

Систему (1) можно преобразовать в операторную форму Лапласа и значения проекций переменных на оси координат предстанут в следующем виде:

$$\begin{aligned} i_{s\alpha} &= \frac{U_{s\alpha} + \frac{K_R}{T_R} \Psi_{R\alpha} + K_R p \omega \Psi_{R\beta}}{r(T'_s + 1)}; \\ i_{s\beta} &= \frac{U_{s\beta} + \frac{K_R}{T_R} \Psi_{R\beta} - K_R p \omega \Psi_{R\alpha}}{r(T'_s + 1)}; \\ \Psi_{R\alpha} &= (K_R R_R i_{s\alpha} + p \omega \Psi_{R\beta}) \frac{T_R}{T_R S + 1}; \\ \Psi_{R\beta} &= (K_R R_R i_{s\beta} + p \omega \Psi_{R\alpha}) \frac{T_R}{T_R S + 1}; \\ \omega &= (M - M_c) \frac{1}{JS}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $T'_s = \frac{L'_s}{r}$ – постоянная времени цепи статора;

$T_R = \frac{L_R}{R_R}$ – постоянная времени цепи ротора;



$$H_0 = H_{0e} \cdot \frac{\omega^2}{\omega_H^2}, \quad (4)$$

где (3) и (4) – математические модели турбомеханизма [1]. Здесь H_{0e} – напор при нулевой производительности на естественной характеристике (при номинальной частоте вращения); H_0 – напор при нулевой производительности, но при скорости вращения отличной от номинальной; ω_H – номинальная частота вращения; ω – частота вращения турбомеханизма; Q – производительность турбомеханизма; k – постоянный коэффициент.

Динамическая математическая модель для потока среды в трубопроводной магистрали имеет вид

$$dQ/dt = A_1(H - H_C) - A_2Q^2, \quad (5)$$

где $A_1 = S_{yc} g/L\gamma$;

$$A_2 = \left[1 + \lambda \frac{L}{D_{yc}} + \sum \xi_c + \xi_a(\bar{y}) \right] \frac{1}{2L \cdot S_{yc}}.$$

Здесь H – напор на входе в трубопровод; H_C – статический (встречный) напор; S_{yc} – внутренняя площадь поперечного сечения трубопровода; L – длина трубопровода; g – ускорение силы тяжести; γ – удельный вес перекачиваемой среды; λ – удельный коэффициент сопротивления трубопровода; D_{yc} – внутренний диаметр трубопровода; $\sum \xi_c$ – суммарный коэффициент сопротивления трубопровода, вызванный поворотами, местными сужениями; $\xi_a(\bar{y})$ – коэффициент сопротивления трубопроводной арматуры.

Из (3) следует, что

$$Q^2 = (H_0 - H)/k.$$

Подставляя полученное уравнение в (5) и преобразуя его по Лапласу, имеем

$$Q = [H(A_1 + A_2/k) - A_2H_0/k - A_1H_C] \frac{1}{S}, \quad (6)$$

где S – оператор Лапласа.

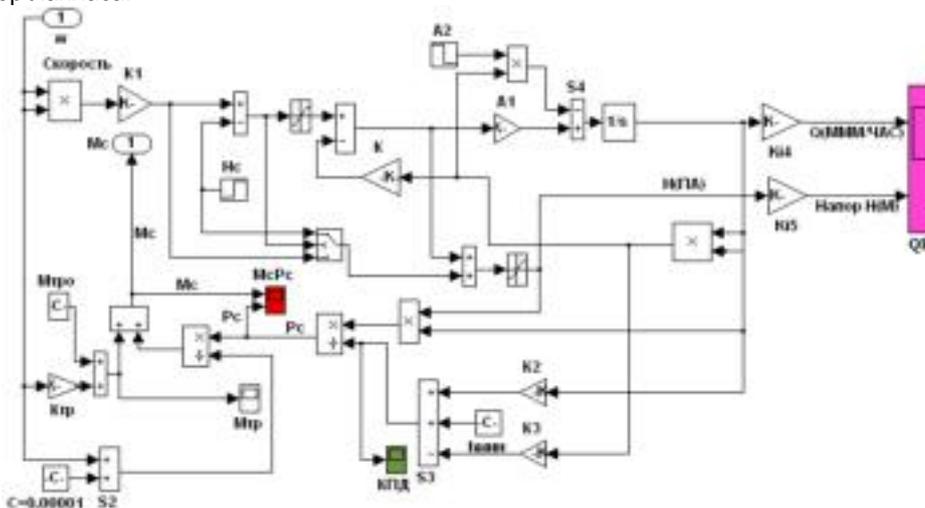


Рис. 2. Структурная схема турбомеханизма, трубопроводной магистрали и суммарного момента сопротивления

На основе переменных из приведенных соотношений формируется математическая модель для момента сопротивления. В настоящей работе мы представили его в виде двух составляющих:

- первая формируется в зависимости от производительности и при закрытой задвижке равна нулю;
- вторая составляющая названа моментом трения. Момент трения существует и при работе турбомеханизма на закрытую арматуру, т.е. при нулевой производительности.

Для первой составляющей справедливы следующие соотношения:

$$P_c = QH/\eta_{нас}; \quad (7)$$

$$M_c = P_c/\omega; \quad (8)$$

$$\eta_{нас} = 0,01 + k_1(Q/Q_H - k_2(Q/Q_H)^2), \quad (9)$$

где P_c – мощность, потребляемая турбомеханизмом; ω – частота вращения электропривода; $\eta_{нас}$ – КПД турбомеханизма; K_1 ; K_2 – коэффициенты, определяемые из графиков КПД турбомеханизма.

Для момента трения используется соотношение вида

$$M_{тр} = M_{тр0} + K_3(\omega/\omega_H), \quad (10)$$

где $M_{тр0}$ – момент трогания механизма; $K_3 = M_{трн} - M_{тр0}$; $M_{трн}$ – величина момента трения при закрытой задвижке и номинальной скорости вращения турбомеханизма.

Общий момент сопротивления нагрузочного устройства представляется как

$$\Sigma M_c = M_c + M_{тр}. \quad (11)$$

Структурная схема для математической модели турбомеханизма, трубопроводной магистрали и суммарного момента сопротивления в обозначениях, принятых для программной среды Matlab, представлена на рис. 2.



Поведение момента нагрузки во время действия возмущения в электрической сети, можно проследить на примере любого из включенных в процесс самозапуска электропривода.

На рис. 3, а приведен график зависимости суммарного момента сопротивления от частоты вращения электропривода насоса Н-2а/1* во время бестоковой паузы длительностью 3,5 с, а на рис. 3, б – график того же момента, но при разгоне двигателя. При этом зависимость момента сопротивления от скорости существенно отличается от вентиляторной характеристики.

Этими вычислительными экспериментами на математических моделях еще раз подтверждается целесообразность непосредственного расчета момента сопротивления.

На рис. 3, в показан график момента сопротивления для электропривода того же насоса во времени: в течение бестоковой паузы и при разгоне в результате восстановления нормального напряжения.

двигателя. На основе полученного материала можно сделать вывод о том, что момент сопротивления это некоторая скрытая промежуточная переменная системы, не поддающаяся непосредственному измерению, тем не менее величину ее можно рассчитать при исследовании математической модели комплекса: электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль на ПЭВМ. Интерес исследователей к характеру изменения момента сопротивления определяется тем, что от него зависят те величины, которые определяют условия самозапуска.

Структурная схема системы управления комплексом при самозапуске. Пример блочной структурной схемы одного из комплексов приведен на рис. 4. Она включает математическую модель трансформатора системы Б и математические модели семи технологических цепочек – электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль. От трансформатора мощностью 1 Мва предусмотрен самозапуск семи электроприводов общей мощностью 464 квт. Самыми мощными из них являются электроприводы

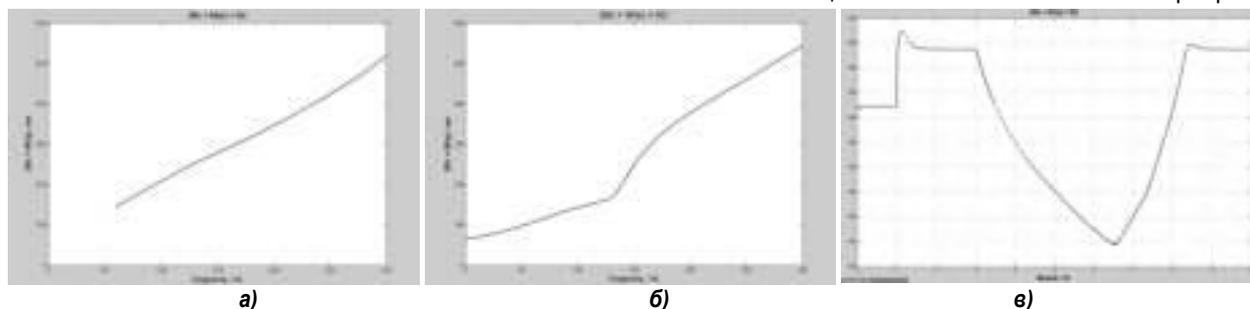


Рис. 3. Зависимость суммарного момента сопротивления электропривода насоса Н-2а/1 от частоты вращения во время бестоковой паузы в 3,5 с (а); после бестоковой паузы длительностью 3,5 с (б); характер изменения суммарного момента сил сопротивления M_c и трения $M_{тр}$ для насоса Н-2а/1 при исчезновении напряжения на $\Delta T = 3,5$ с (в)

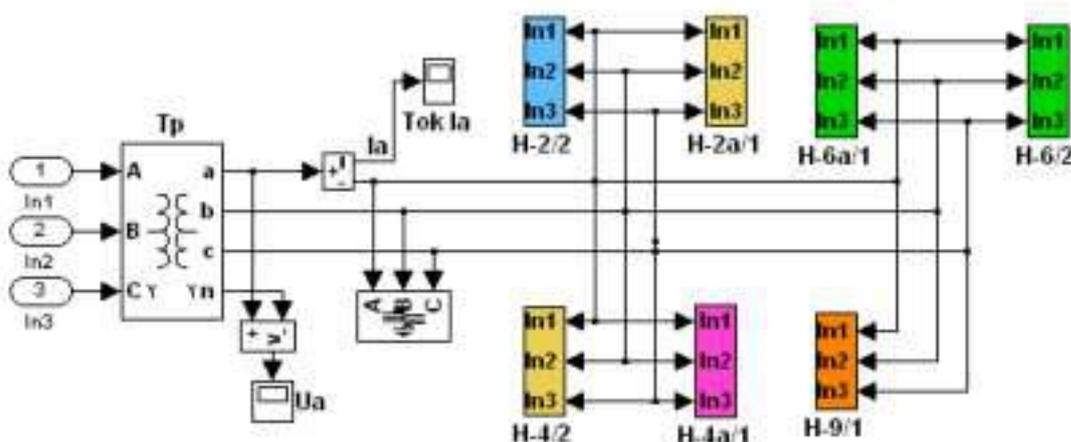


Рис. 4. Блочная структурная схема для исследования условий самозапуска электроприводов турбомеханизмов

Отчетливо прослеживается тенденция замедления скорости снижения момента с ростом длительности бестоковой паузы, и ее возрастание при разгоне

насосов Н-2а/1 и Н-4/2 соответственно по 160 квт, самая малая мощность у электропривода насоса Н-9/1 – 37 квт.

На приведенных ниже рисунках (рис. 5, а, б) представлены результаты вычислительных экспериментов при воздействии на комплекс возмущений в питающей сети. В качестве возмущений в электрической сети

*Реальные схемы электроснабжения рассмотрены на примере одного из нефтеперерабатывающих предприятий.

рассматривались бестоковые паузы следующей длительности: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 с.

Информация на графиках имеет следующие особенности:

- По мере увеличения времени возмущения растет длительность пускового тока после восстановления нормального электропитания. Так для рассматриваемого комплекса при бестоковой паузе в 0,3 с, продолжительность пускового суммарного тока составляет 0,4 с, соответственно при паузах в 1,5 и 3,5 с – 1,6 и 3,2 с.

- Для каждого из графиков пускового тока в начальный момент времени пуска наблюдается «вы-

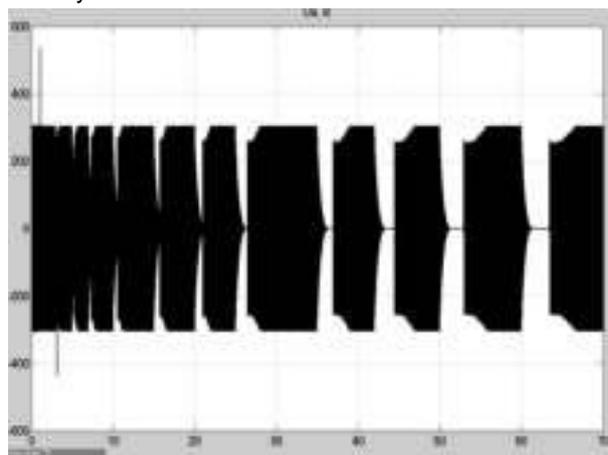
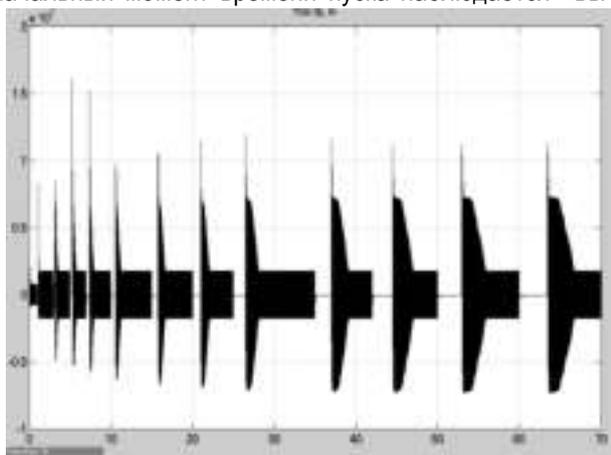
брос» тока. Самым значительным он является для бестоковой паузы продолжительностью 0,3 с. В дальнейшем, с ростом длительности возмущения, например, уже при 1 с и выше величина выброса остается на одном уровне.

Причина этих выбросов объясняется двумя дополнительными составляющими пускового тока: аперiodической (свободной) и составляющей, вызванной несовпадением фаз восстановившегося напряжения и остаточной ЭДС электродвигателей. Отстроиться от этих выбросов следует увеличением кратности тока срабатывания автоматических выключателей или

установкой выдержки времени срабатывания максимальной токовой защиты.

Основной интерес на графиках при проектировании самозапуска вызывает та часть, которая определяется скольжением ротора. Это наиболее «устойчивая» часть пускового тока, которая и определяет темп разгона двигателя.

На приведенных рисунках эта часть тока наиболее наглядно представлена графиками тока при бестоковой паузе длительностью 3,5 с (рис. 5, а). Кратность суммарного пускового тока равна 3,7-кратному номинальному току трансформатора и 4-кратному номинальному току двигателей, предусмотренных для самозапуска.



а) **Рис. 5. Токи самозапуска (а) и напряжения (б) на шинах трансформатора при исчезновении напряжения на ДТ от 0,1 до 3,5 с**

брос» тока. Самым значительным он является для бестоковой паузы продолжительностью 0,3 с. В дальнейшем, с ростом длительности возмущения, например, уже при 1 с и выше величина выброса остается на одном уровне.

Причина этих выбросов объясняется двумя дополнительными составляющими пускового тока: аперiodической (свободной) и составляющей, вызванной несовпадением фаз восстановившегося напряжения и остаточной ЭДС электродвигателей. Отстроиться от этих выбросов следует увеличением кратности тока срабатывания автоматических выключателей или

Результаты вычислительных экспериментов на математических моделях технологического комплекса используются для создания реальных схем самозапуска электроприводов. В частности они предусматривают такой режим самозапуска, при котором ток трансформатора в процессе пуска не превышает заданной величины. Достигается это поочередным запуском приводов – вначале запускаются наиболее «значимые» электроприводы, а далее остальные. Таким образом, процесс самозапуска становится управляемым, что благоприятно сказывается на ходе технологического процесса.

Библиографический список

1. Гоппе Г.Г. Математические модели технологического комплекса: электропривод–турбомеханизм–трубопроводная магистраль. Ч. 2: Математические модели динамических процессов при управлении производительностью методом дросселирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 12 (105). С. 20–24.

2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: учебное пособие. СПб.: Корона-принт, 2001. 320 с.
3. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1994.