

УДК 621.396

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-83-89

Энергетические характеристики электрической печи сопротивления с фазоимпульсным регулированием напряжения

В.П. Рубцов, Р.Р. Ключин, Н.И. Крюков

Рассмотрены энергетические характеристики регулятора температуры электрической печи сопротивления, получающей питание от сети переменного тока с использованием тиристорного регулятора напряжения с фазоимпульсным управлением. Исследования выполнены применительно к комплексу, включающему в себя собственно печь сопротивления, тиристорный регулятор напряжения с фазоимпульсным управлением, датчик температуры и регулирующее устройство, вырабатывающее пропорционально-интегрально-дифференциальный закон управления. В отличие от традиционных исследований, в которых рассматриваются только тепловые процессы в печи, в настоящем случае анализируется совокупность электрических и тепловых процессов, протекающих в комплексе оборудования, включающем в себя электрическую печь сопротивления и тиристорный регулятор напряжения с фазоимпульсным управлением. С использованием разработанной имитационной модели рассчитаны такие виртуальные энергетические характеристики, как полная, активная и реактивная мощности, а также коэффициент мощности, определяющий эффективность работы комплекса и установленные мощности тиристорных регуляторов напряжения.

Проанализировано влияние на эффективность работы комплекса такого показателя, как превышение установленной мощности регулятора напряжения над средней мощностью, потребляемой печью.

Ключевые слова: электрическая печь сопротивления, фазоимпульсное регулирование напряжения, регулятор температуры.

Для цитирования: Рубцов В.П., Ключин Р.Р., Крюков Н.И. Энергетические характеристики электрической печи сопротивления с фазоимпульсным регулированием напряжения // Вестник МЭИ. 2020. № 2. С. 83—89. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-83-89.

The Power Performance Characteristics of an Electric Resistance Furnace Equipped with Pulse-Phase Voltage Control

V.P. Rubtsov, R.R. Klyushin, N.I. Kryukov

The power performance characteristics of the temperature controller of an electric resistance furnace that takes power supply from an AC network using a thyristor voltage regulator with pulse-phase control are considered. The studies are carried out for a system comprising a resistance furnace itself, a thyristor voltage regulator with pulse-phase control, a temperature sensor, and a controller producing a proportional-integral-differential control law. Unlike conventional studies, the scope of which is limited to thermal processes in the furnace, the article analyzes the totality of electrical and thermal processes occurring in the entire system, which includes an electric resistance furnace and a thyristor voltage regulator with pulse-phase control. Using the developed simulation model, virtual power performance characteristics have been computed, such as the apparent, active and reactive power; the power factor, which determines the system performance efficiency; and the installed capacities of thyristor voltage regulators.

The influence of the extent by which the voltage regulator capacity exceeds the average power consumed by the furnace on the efficiency of the entire system is analyzed.

Key words: electric resistance furnace, pulse-phase voltage regulation, temperature controller.

For citation: Rubtsov V.P., Klyushin R.R., Kryukov N.I. The Power Performance Characteristics of an Electric Resistance Furnace Equipped with Pulse-Phase Voltage Control. Bulletin of MPEI. 2020;2:83—89. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-83-89.

Введение

При управлении электрическими печами сопротивления крайне важны обеспечение требуемого температурного режима работы и экономичность. Традиционно исследование режимов работы системы регулирования температуры электрической печи со-

противления (ЭПС) ограничивается анализом только тепловых процессов и не затрагивает электрические режимы [1]. Это приводит к тому, что остается неизвестным, какую реальную мощность потребляет ЭПС, и какова должна быть установленная мощность тиристорного регулятора напряжения. Известно [2], что

тиристорный регулятор напряжения, применяемый повсеместно для регулирования вводимой в ЭПС мощности, искажает кривую сетевого напряжения, приводит к снижению коэффициента мощности и появлению высших или субгармонических составляющих. Однако при проектировании системы управления ЭПС данные факторы в расчет не принимаются, что часто выливается в перегрузки питающих трансформаторов, выход из строя подводящих кабелей или недоиспользование установленной мощности электрооборудования. В то же время обоснованный выбор электрооборудования крайне важен для производства и эксплуатации ЭПС, применяющихся в различных отраслях производства и достигающих значительных мощностей на уровне единиц МВт [3].

Выполнены исследования совместной работы тиристорного регулятора напряжения с системой автоматического управления температурой ЭПС. Получены зависимости, связывающие электрические и тепловые процессы, которые могут быть использованы для обоснованного выбора электрооборудования электротермического комплекса.

Постановка задачи

Цель проводимого исследования — поиск взаимосвязи между электрическими и тепловыми процессами в ЭПС. Поставленную задачу следует решать, опираясь на уравнения электрического равновесия в системах электропитания нагревателей, теплопередачи в печи и процессов автоматического поддержания температуры в замкнутой системе автоматического управления. Математическое описание процессов может быть получено при учете особенностей измерения следующих электрических величин: напряжения, тока и мощности с учетом искажений, вносимых в систему электропитания тиристорным регулятором напряжения и фазоимпульсным управлением.

Функциональная схема системы

Разработана функциональная схема системы (рис. 1), в которую наряду с традиционно используемыми функциональными элементами введены блоки, вычисляющие действующие значения тока (БВТ), напряжения (БВН), активной (БВАМ) и полной (БВПМ) мощностей.

Схема на рис. 1 включает в себя тиристорный регулятор напряжения с фазоимпульсным управлением ТФИР, подключенный к нагревателям печи сопротивления ЭПС через датчик тока ДТ. Напряжение на нагревателях ЭПС поступает также на датчик напряжения ДН. Регулятор температуры ЭПС представлен регулирующим устройством РУ, на вход задания температуры которого подается заданное значение температуры печи Θ_3 , а на вход обратной связи — текущее значение температуры Θ , снимаемое с датчика температуры ДΘ. Регулятор температуры ЭПС поддержива-

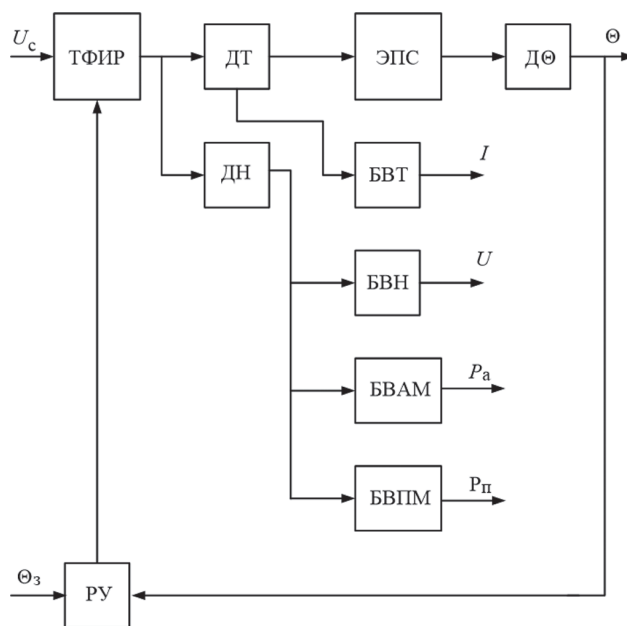


Рис. 1. Функциональная схема комплексной системы автоматического регулирования температуры ЭПС

ет установленное значение температуры печи путем фазоимпульсного регулирования напряжения питания U_c , сопровождаемое искажениями кривых напряжения и тока. Вопросы влияния искажений кривых напряжения и тока на энергетические характеристики регулятора температуры ЭПС в настоящее время изучены недостаточно.

При питании нагревателей ЭПС переменным напряжением несинусоидальной формы необходимо измерять действующие значения переменных. С этой целью в схему рис. 1 введены блоки выделения действующих значений тока БВТ, напряжения БВН, активной БВАМ и полной БВПМ мощностей. Необходимость выделения именно действующих значений активной и полной мощностей связана с расчетом важного для определения энергетических характеристик регулятора температуры ЭПС коэффициента мощности.

Структурная схема системы

Математическое описание системы, содержащей нелинейные звенья, представим в виде структурной схемы (рис. 2). Электрическая цепь печи на рис. 2 показана в виде линейного инерционного звена с постоянной времени $T_s = L/R$, включающей в себя индуктивность нагревателей L и активное сопротивление R . Тепловая часть схемы определяется линейным инерционным звеном первого порядка с постоянной времени T_{π} , характеризующей тепловые характеристики ЭПС. Подобное представление традиционно используется в системах управления для описания тепловых процессов в печи сопротивления [2 — 4]. В электрической части системы рис. 2 используются мгновенные значения напряжения, тока и мощности, в то время как

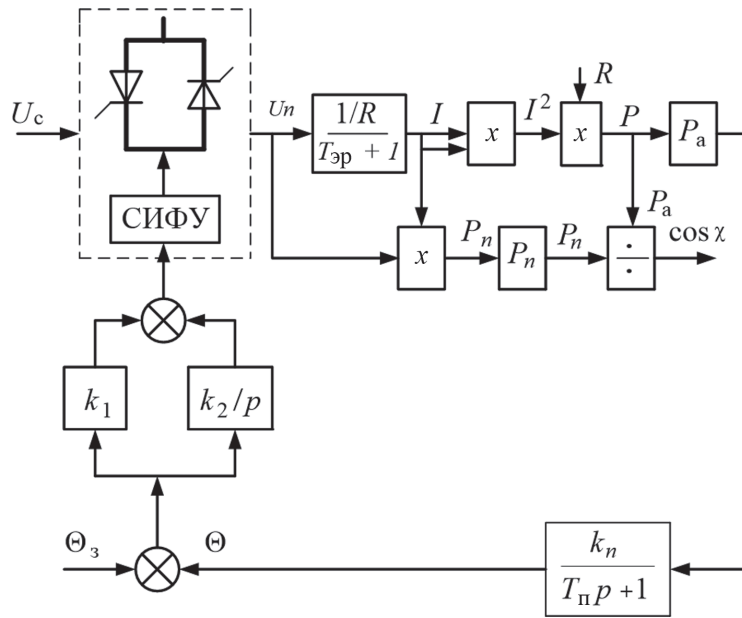


Рис. 2. Структурная схема комплексной системы регулирования температуры ЭПС

в тепловой части — действующие значения активной P_a и полной P_n мощностей, вычисляемые с помощью приведенных арифметических блоков. Для повышения качества и точности регулирования температуры предусмотрен пропорционально-интегральный регулятор с коэффициентами передачи k_1 и k_2 .

Нелинейная часть структурной схемы рис. 2 выглядит как реальная схема фазоимпульсного модулятора. Схемотехнические решения системы фазоимпульсного управления (СИФУ) и фазоимпульсного модулятора, управляющего тиристорами регулятора напряжения, рассмотрены в [5].

Исходя из структурной схемы рис. 2, невозможно провести аналитическое решение системы. Для изучения сложных нелинейных систем автоматического управления, к которым относится и рассматриваемая система, в настоящее время широко используют численные методы решения на основе имитационных моделей.

Имитационная модель системы

На рисунке 3 изображена имитационная модель системы управления ЭПС, построенная в пакете прикладных программ Matlab/Simulink [5, 6]. Удобство использования данного пакета обусловлено тем обстоятельством, что его библиотека обладает широким ассортиментом линейных и нелинейных элементов, пригодных для решения электротехнологических задач. С целью удобства определения численных виртуальных значений для расчета энергетических характеристик системы введены блоки вычисления действующих значений напряжения на нагревателях U_c , тока нагревателей I , и полной мощности потребляемой печью P_n . Действующие значения P_n , P_a можно получить в имитационной модели рис. 3 с помощью схемы, состоящей

из интегратора integrator, звена запаздывания Transport Delay, сумматора Add и функционального блока Fcn, вычисляющего квадратный корень выражения $\sqrt{(ui)^2}$, определяющего действующее значение периодической величины [6, 7].

Методика проведения исследований

Исследования на имитационной модели проводили путем расчета виртуальных переходных (временных) функций мгновенных $u_c(t)$ и действующих $U_c(t)$ значений напряжения, мгновенных $i(t)$ и действующих $I(t)$ значений тока, действующих значений активной $P_a(t)$ и полной $P_n(t)$ мощностей, коэффициента мощности $\chi(t)$, а также температуры печи $\Theta(t)$. На вход фазоимпульсного модулятора подавали ступенчатую функцию $u_y(t)$.

Установлено, что имитационная модель некорректно вычисляет виртуальное значение коэффициента мощности $\chi = P_a(t)/P_n(t)$. Это вызвано, по-видимому, использованием операции деления нелинейных разрывных функций, которыми описываются функции $P_a(t)$ и $P_n(t)$. Поэтому в дальнейшем вычисление χ выполняли вручную по численным значениям величин P_a и P_n , согласно выражения $\chi = P_a/P_n$, полученным для установившихся значений температуры печи Θ .

Определение на имитационной модели коэффициента мощности χ регулятора температуры имеет важное значение для проектирования системы управления и определения установленной мощности источника питания ЭПС — тиристорного регулятора напряжения. Дело в том, что сложившая практика поиска коэффициента мощности установки на базе вычисления (или измерения) $\cos\phi$ пригодна только в тех случаях, когда электрические величины синусоидальны, отсутствуют их искажения и высшие гармонические составляющие. Тогда рассчитаем $\cos\phi$ следующим образом:

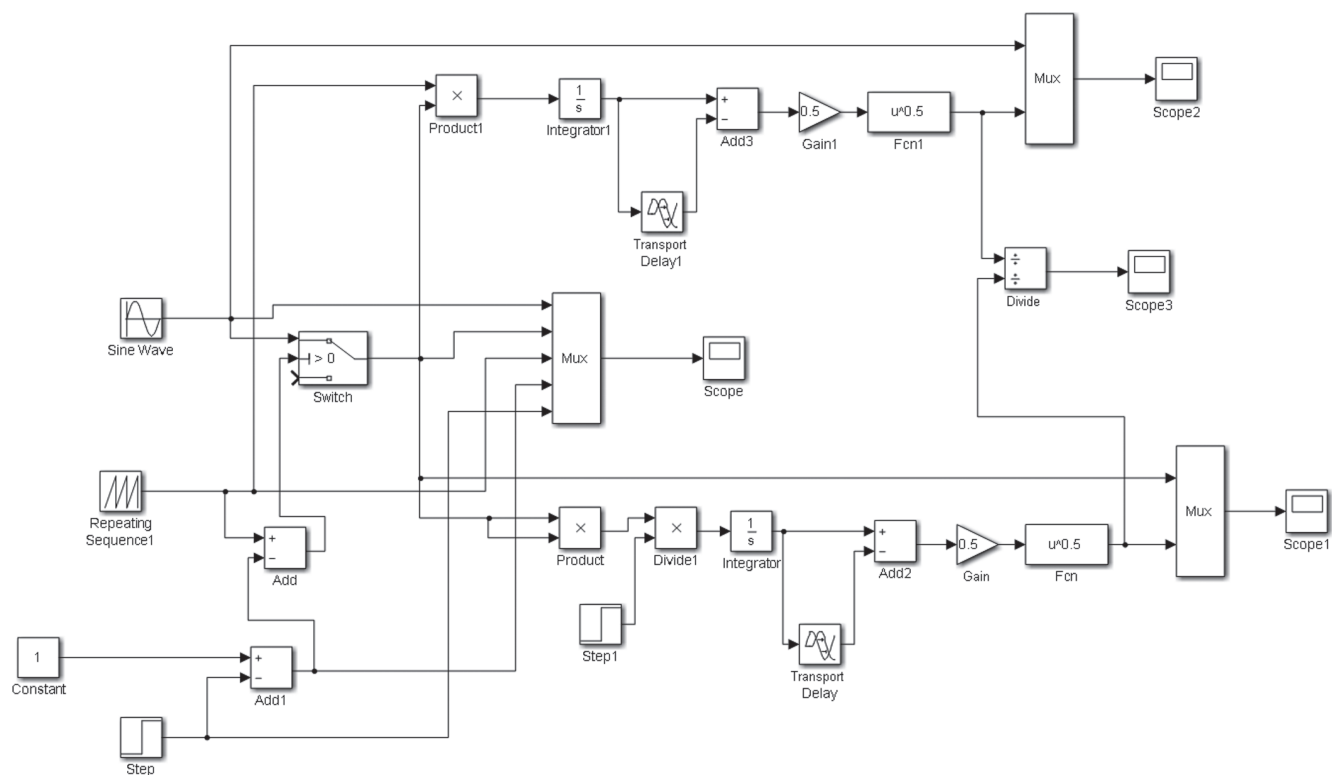


Рис. 3. Имитационная модель системы управления ЭПС с фазоимпульсным регулятором напряжения

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{2L}((ad + cb) - (ab + cd)).$$

где Q — реактивная мощность.

В случаях (к которым относится и рассматриваемая установка), когда в системе питания имеют место искажения формы кривых напряжения и тока, использование $\cos\varphi$ некорректно, поскольку полная мощность определяется по выражению

$$P_{\Pi} = \sqrt{(P_a^2 + Q^2 + T^2)},$$

где T — мощность искажений [7, 8].

Дело в том, что естественный $\cos\varphi$ резистивного нагревателя печи сопротивления лежит в пределах 0,85...0,95 и при питании от сети с синусоидальным (неискаженным) напряжением не зависит от режима работы регулятора температуры. Это обстоятельство и вводит разработчиков систем электропитания ЭПС в заблуждение о чисто активной нагрузке, присущей печам сопротивления. Массовое применение тиристорных регуляторов напряжения в системах управления печами сопротивления, вызывающих искажения кривых напряжения и тока, ведет к необходимости обязательного учета этих особенностей тиристорных регуляторов температуры ЭПС.

Для изучения влияния тиристорного регулятора напряжения на коэффициент мощности ЭПС на имитационной модели рис. 3 рассчитан коэффициент мощности χ для различных значений коэффициента превышения мощности:

$$K_m = P_{\text{amax}}/P_{\text{cp}},$$

где P_{amax} — максимальное значение мощности тиристорного регулятора напряжения; P_{cp} — среднее значение активной мощности, выделяемой в нагревателях печи.

Вычисленные с помощью имитационной модели рис. 3 действующие значения P_a , P_{Π} и χ приведены в таблице.

Как следует из таблицы, значения коэффициента мощности χ регулятора температуры ЭПС при питании ее от тиристорного регулятора напряжения с фазоимпульсным регулятором напряжения значительно меньше в сравнении с естественным коэффициентом мощности $\cos\varphi$ резистивного нагревателя при питании его от синусоидального напряжения. Для наглядности проведенного сравнения на рис. 4 показаны зависимости, построенные по данным таблицы.

Энергетические характеристики регулятора температуры ЭПС с фазоимпульсным регулятором напряжения

K_m	$P_{\text{акт}}, \text{Вт}$	$P_{\text{пол}}, \text{Вт}$	χ	$\Theta, ^\circ\text{C}$
1,0	2193	2785	0,79	502,0
0,9	1973	2642	0,75	451,8
0,8	1754	2491	0,70	401,6
0,7	1535	2330	0,66	351,4
0,6	1316	2157	0,61	301,2
0,5	1096	1969	0,56	251,0

Имитационная модель рис. 3 пригодна для изучения процессов регулирования в диапазоне изменения параметров печи и питающего напряжения, ограниченных только их реализуемостью [8 — 10].

Использованы следующие значения параметров печи и системы управления: амплитудное значение напряжения на выходе фазоимпульсного модулятора — $U_{\text{сmax}} = 100$ В; частота питающей сети — $f = 50$ Гц; активное сопротивление нагревателей печи — $R = 10$ Ом; электрическая постоянная времени нагревателей — $T_{\text{н}} = 0,01$ с; тепловая постоянная времени печи — $T_{\text{т}} = 1000$ с; заданная температура печи — $\Theta = 200$ °С. Остальные величины рассчитаны с помощью имитационной модели рис. 3.

Для оценки возможности анализа графических изображений осциллограмм с сильно различающимися временными характеристиками в рамках одного процесса регулирования вычислены переходные функции электрических величин (напряжения, тока и мощностей), а также температуры печи Θ (рис. 5). Изображенные на рис. 5. осциллограммы подтверждают возможность одновременного анализа электрических и тепловых процессов.

На рисунке 6 приведены зависимости температуры Θ и энергетических показателей регулятора температуры с тиристорным регулятором напряжения, иллюстрирующие проблемы графического представления зависимостей с различными масштабами времени.

Заключение

Установлены удобство и целесообразность использования имитационной модели для анализа и синтеза сложных неоднородных электротехнологических систем, включающих в себя различные по быстродействию процессы. Разработанные модели вычисления действующих значений несинусоидальных напряжений и токов, характеризующих работу регуляторов температуры печей сопротивления, использующих для питания нагревательных элементов тиристорные регуляторы напряжения с фазоимпульсным регулированием, адекватно отражают протекающие в системе процессы и позволяют определять их энергетические и технологические характеристики.

Большое значение при использовании тиристорных регуляторов напряжения приобретает определение такого энергетического показателя работы электротехнического оборудования, как коэффициент мощности, который необходим как при проектировании источников питания, так и при сравнении различных схем питания.

Акцентируется внимание на часто допускаемую ошибку в трактовке такого понятия, как коэффициент мощности для линейной электрической цепи с индуктивной нагрузкой и нелинейной электрической цепи с тиристорным преобразователем напряжения, вызывающим искажения кривых напряжения и тока. В послед-

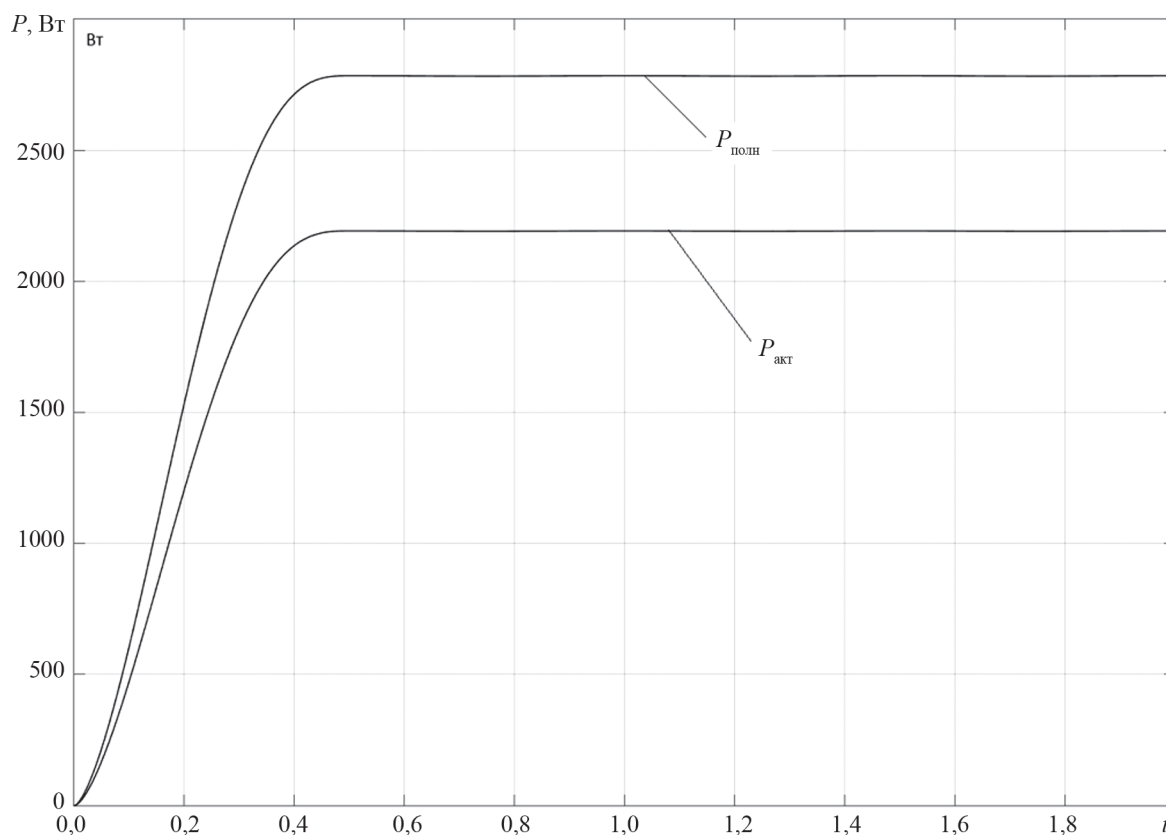


Рис. 4. Энергетические характеристики регулятора температуры ЭПС с тиристорным регулятором напряжения

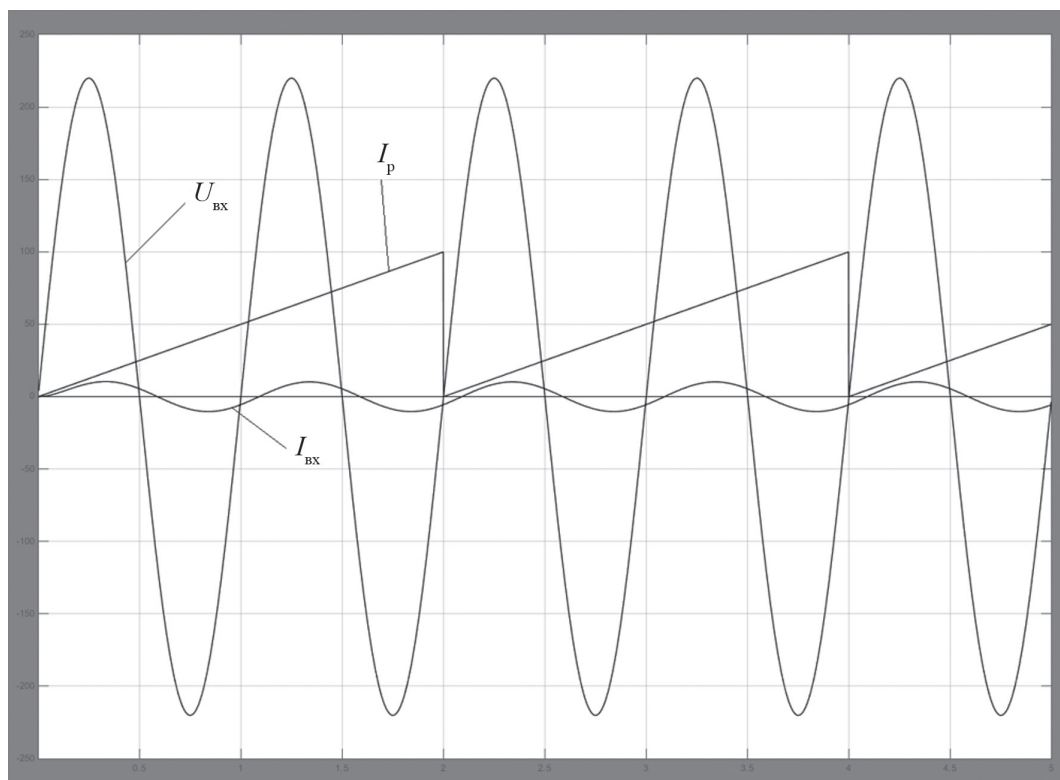


Рис. 5. Совместные осциллограммы электрических и тепловых процессов в регуляторе температуры ЭПС с фазоимпульсным регулированием напряжения нагревателей

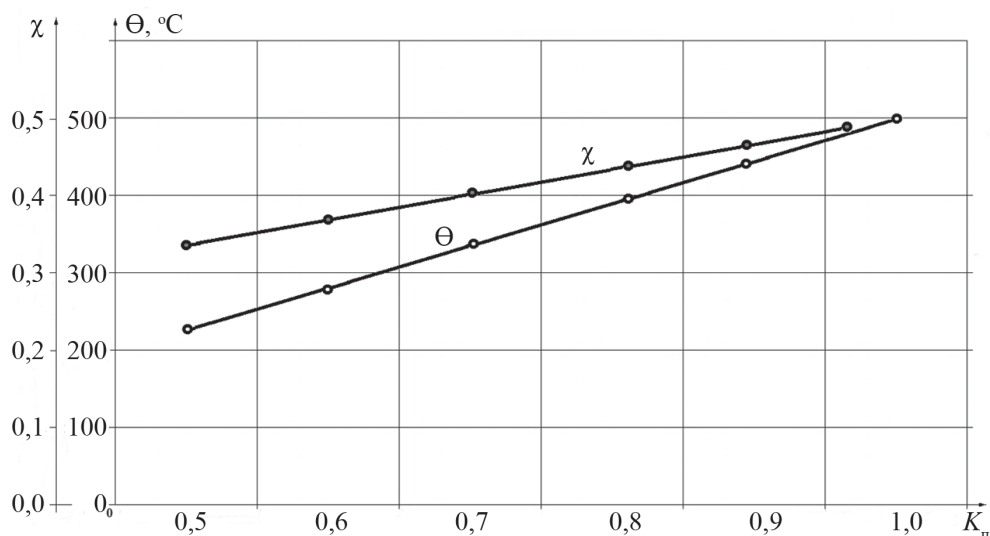


Рис. 6. Зависимости коэффициента мощности χ и температуры печи Θ от коэффициента превышения мощности K_n

нем случае при определении коэффициента мощности электротехнологической установки следует учитывать мощность искажений, наличие которой приводит к значительному снижению коэффициента мощности и, следовательно, увеличению требуемой установленной мощности источника питания.

Установлено, что имитационная модель некорректно вычисляет значение коэффициента мощности $\chi = P_a(t)/P_n(t)$, что вызвано, по-видимому, использо-

ванием операции деления нелинейных разрывных функций, которыми описываются функции $P_a(t)$ и $P_n(t)$. Поэтому вычисление коэффициента мощности χ в нелинейной системе электропитания с тиристорными регуляторами напряжения необходимо выполнять путем деления вне модели численных значений величин активной и полной мощностей, полученных для установившихся параметров температуры печи Θ .

Литература

References

1. **Электротехнический справочник.** Использование электрической энергии. Т. 3. Кн. 2 / под общ. ред. И.Н. Орлова. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. **Рубцов В.П., Щербаков А.В.** Системы автоматического управления электрическими печами сопротивления. Ч. 1. М.: Изд-во МЭИ, 2015.
3. **Рубцов В.П., Щербаков В.А., Горячих Е.В.** Исследование влияния неоднородности электрической печи сопротивления как объекта управления // *Электротехника*. 2015. № 7. С. 41—45.
4. **Герман-Галкин С.Г.** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона.Век, 2008.
5. **Рубцов В.П., Митяков Ф.Е.** Влияние ограничения тока нагревателей на работу регулятора температуры в высокотемпературных вакуумных печах сопротивления // *Вестник МЭИ*. 2012. № 2. С. 80—84.
6. **Рубцов В.П.** Исполнительные элементы систем автоматического управления электротехнологическими установками. М.: Изд-во МЭИ, 2001.
7. **Рубцов В.П., Горячих Е.В., Митяков Ф.Е.** Разработка уточненной модели электрической печи сопротивления на основе экспериментальных исследований // *Вестник МЭИ*. 2015. № 3. С. 48—52.
8. **Минин Г.П.** Несинусоидальные токи и их измерение. М.: Энергия, 1979.
9. **Герман-Галкин С.Г.** Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. СПб.: Лань, 2013.
10. **Desal P.D., Chu T.K., James H.M., Ho C.Y.** Electrical Resistivity of Selected Elements // *J. Phys. Chem. Ref.* 1984. V. 13. No. 4. Pp. 1069—1096.

1. **Elektrotekhnicheskii Spravochnik.** Ispol'zovanie Elektricheskoy Energii. T. 3. Kn. 2. Pod Obshch. Red. I.N. Orlova. M.: Energoatomizdat, 1988. (in Russian).
2. **Rubtsov V.P., Shcherbakov A.V.** Sistemy Avtomaticheskogo Upravleniya Elektricheskimi Pechami Soprotivleniya. Ch. 1. M.: Izd-vo MEI, 2015. (in Russian).
3. **Rubtsov V.P., Shcherbakov V.A., Goryachikh E.V.** Issledovanie Vliyaniya Neodnorodnosti Elektricheskoy Pechi Soprotivleniya kak Ob'ekta Upravleniya. *Elektrotekhnika*. 2015;7:41—45. (in Russian).
4. **German-Galkin S.G.** Matlab & Simulink. Proektirovanie Mekhatronnykh Sistem na PK. SPb.: Korona.Vek, 2008. (in Russian).
5. **Rubtsov V.P., Mityakov F.E.** Vliyanie Ogranicheniya Toka Nagrevateley na Rabotu Regulyatora Temperatura v Vysokotemperaturnykh Vakuumnykh Pechakh Soprotivleniya. *Vestnik MEI*. 2012;2:80—84. (in Russian).
6. **Rubtsov V.P.** Ispolnitel'nye Elementy Sistem Avtomaticheskogo Upravleniya Elektrotekhnologicheskimi Ustanovkami. M.: Izd-vo MEI, 2001. (in Russian).
7. **Rubtsov V.P., Goryachikh E.V., Mityakov F.E.** Razrabotka Utochnennoy Modeli Elektricheskoy Pechi Soprotivleniya na Osnove Eksperimental'nykh Issledovaniy. *Vestnik MEI*. 2015;3:48—52. (in Russian).
8. **Minin G.P.** Nesinusoidal'nye Toki i Ikh Izmerenie. M.: Energiya, 1979. (in Russian).
9. **German-Galkin S.G.** Virtual'nye Laboratorii Poluprovodnikovyykh Sistem v Srede Matlab-Simulink. SPb.: Lan', 2013. (in Russian).
10. **Desal P.D., Chu T.K., James H.M., Ho C.Y.** Electrical Resistivity of Selected Elements. *J. Phys. Chem. Ref.* 1984;13;4:1069—1096.

Сведения об авторах:

Рубцов Виктор Петрович — доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: RubtsovVP@mpei.ru

Клюшин Роман Русланович — аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: klushin1973@yandex.ru

Крюков Николай Иванович — магистр техники и технологий по направлению «Электроэнергетика и электротехника» НИУ «МЭИ», e-mail: nikolaos1996@yandex.ru

Information about authors:

Rubtsov Viktor P. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: RubtsovVP@mpei.ru

Klyushin Roman R. — Ph.D.-student of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: klushin1973@yandex.ru

Kryukov Nikolay I. — Master of Engineering and Technology in Electric Power and Electrical Engineering, NRU MPEI, e-mail: nikolaos1996@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 27.06.2019

The article received to the editor: 27.06.2019