

Моделирование переменных параметров работы дуговой сталеплавильной печи

А. В. Купова, Е. В. Лановенко✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ elanovenko@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются подходы к моделированию дуговых сталеплавильных печей. В результате анализа различных подходов выбрана модель с переменными параметрами R_d и X_L , позволяющая рассматривать дуговую печь как резкопеременную нагрузку с соответствующим влиянием на питающие сети. Результирующая модель предусмотрена для включения в общую модель системы энергоснабжения печи со статическим тиристорным компенсатором и имеет практическое применение для настройки системы управления компенсирующим устройством.

Ключевые слова: моделирование в MatLab, дуговая сталеплавильная печь, моделирование электрической дуги, статический тиристорный компенсатор, параметры дуговой сталеплавильной печи

Для цитирования: Купова А. В., Лановенко Е. В. Моделирование переменных параметров работы дуговой сталеплавильной печи // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 9. С. 71–79. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-9-71-79.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Simulation of Variadle Parametres of Arc Furnace Modes

A. V. Kupova, E. V. Lanovenko✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ elanovenko@mail.ru

Abstract. Approaches to modeling arc steel furnaces are considered. As a result of the analysis of various approaches, a model with variable parameters R and X_L was selected, which allows considering an arc furnace as a variable load with a corresponding effect on the supply networks. The resulting model is intended for inclusion in the general model of the furnace power supply system with a static var compensator and has practical application for setting up the control system of the compensating device.

Keywords: modeling in MatLab, arc steel furnace, electric arc modeling, static var compensator, arc furnace parameters

For citation: Kupova A. V., Lanovenko E. V. Simulation of Variadle Parametres of Arc Furnace Modes // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 9. P. 71–79. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-9-71-79.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

В металлургии применение дуговых сталеплавильных печей (ДСП) для производства стали известно давно и широко используется. К достоинствам ДСП следует отнести возможность гибкого управления процессом плавки, а следовательно, получение сплавов более высокого качества. Тем не менее, важным моментом такого производства остается необходимость контроля показателей качества электроэнергии, нормы которых установлены в [1]. Дуговая печь, как электроприемник, оказывает значительное негативное влияние на эти показатели. В точке подключения ДСП наблюдаются значительные отклонения напряжения, фликер, увеличение несинусоидальности и несимметрии напряжения [2]. В свою очередь, снижение качества электроэнергии сказывается на производительности самой печи и других потребителей электроэнергии [3], [4].

Проблему компенсации негативного влияния ДСП на электрические сети решают использованием в системе электроснабжения статического тиристорного компенсатора (СТК), к достоинствам которого относятся возможность безынерционного регулирования реактивной мощности и фильтрация гармонических составляющих, что позволяет улучшать условия статической устойчивости энергосистемы в целом, обеспечивать экономию электроэнергии и повысить технико-экономические показатели работы электроустановок. К положительным свойствам СТК можно отнести и быстродействующее регулирование, подавление колебаний напряжения, симметрирование токов, потребляемых из сети, отсутствие вращающихся частей, плавность регулирования реактивной мощности, выдаваемой в сеть. Статические тиристорные компенсаторы способны обеспечить плавное и оптимальное распределение напряжений, тем самым снижая их потери в распределительных электросетях.

Однако, несмотря на перечисленные достоинства, на текущий момент продолжает оставаться актуальным увеличение быстродействия системы управления СТК, так как в процессе работы дуговой печи наблюдаются резкие изменения параметров системы электроснабжения. Повысить быстродействие можно, оптимизируя существующие алгоритмы работы или применяя новые способы построения систем управления, в том числе с использованием искусственного интеллекта. Для этого требуется детальное изучение процессов, протекающих в системе электроснабжения во время работы дуговой печи. Одно-

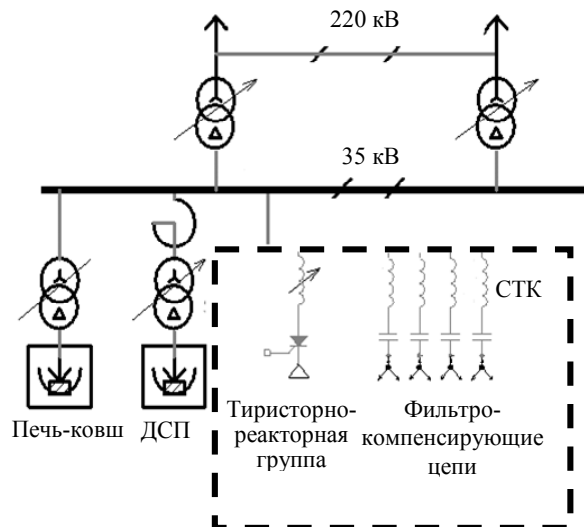


Рис. 1. Однолинейная схема системы электроснабжения дуговой печи

Fig. 1. Single line diagram of the electric arc furnace power supply system

линейная схема системы электроснабжения дуговой печи представлена на рис. 1.

Проведение практических исследований в реальной системе энергоснабжения не всегда возможно и зачастую затратно экономически, поэтому часть исследований может быть выполнена на имитационной модели системы электроснабжения ДСП. Использование библиотек блочного моделирования в пакете MatLab позволяет упростить процесс разработки таких моделей. Для описания системы электроснабжения дуговой печи применяются блоки, имитирующие работу реальных устройств (трансформаторов, линий электропередачи и др.) [5], [6]. При моделировании системы электроснабжения необходимо учитывать следующие факторы. Подача напряжения для горения электрических дуг осуществляется через два понижающих трансформатора: сетевого и печной. Основной задачей сетевого трансформатора является снижение напряжения с 220 до 35 кВ. Печной трансформатор имеет несколько ступеней переключения обмоток для регулирования мощности, вводимой в печь в процессе плавки металла. Для стабильного горения электрической дуги требуется поддерживать низкий коэффициент мощности, поэтому система электроснабжения дополнена реактором. Также требуется учесть, что по шинам питания печи проходят очень большие токи. Так как шины расположены достаточно близко друг от друга, в модели обязательно должно быть рассмотрено их взаимное влияние. На рис. 2 приведена имитационная модель системы энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи в пакете MatLab [7].

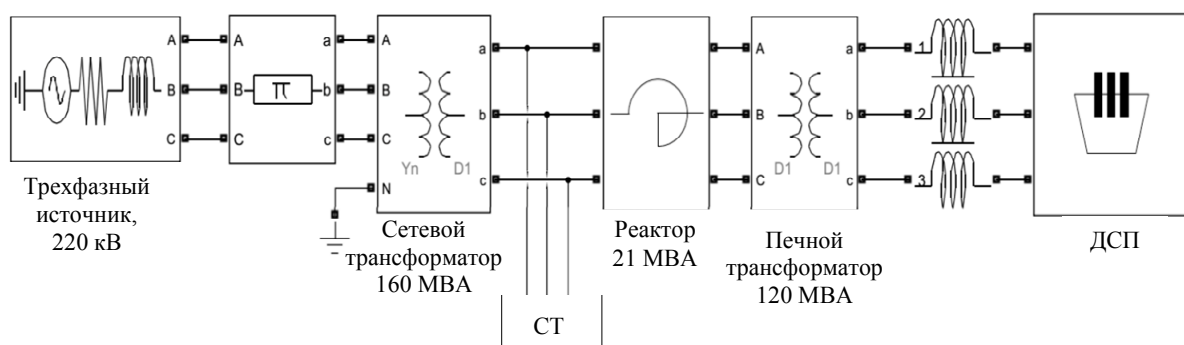


Рис. 2. Имитационная модель системы энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи в пакете MatLab

Fig. 2. Simulation model of the power supply system of an electric arc furnace in the MatLab

В результате многолетних исследований характеристик дуг и процессов, протекающих в ванне печи во время расплава металла, разными исследователями создано большое количество моделей, реализующих разные подходы к имитации работы дуговой печи. Некоторые примеры таких моделей можно увидеть в [8]–[10]. Следует отметить, что ДСП – это сложный для моделирования объект. В процессе плавки протекают различные по своей физической природе процессы, поэтому порой модели печи принципиально отличаются друг от друга. Так как рассматриваемую в данной работе модель печи планируется использовать для анализа влияния режимов работы печи на параметры системы электроснабжения, то для ее описания следует воспользоваться подходом, позволяющим реализовывать вольтамперную характеристику (ВАХ) электрической дуги.

Для описания ВАХ электрической дуги зачастую используют аналитические выражения, основные из которых – уравнения Майера и Касси. Удобство их применения заключается в возможности учесть не только ток и напряжение дуги, но и другие параметры.

Математическое описание модели Майера основывается на процессах в дуге при условии, что рассеяние тепловой энергии обусловлено только теплопроводностью. Этот подход базируется на условии постоянства диаметра ствола дуги в переходном режиме, т. е. мощность, выделяющаяся в дуге, не зависит от изменения тока, который, в свою очередь, влияет на температуру дуги.

Подход на основе математического моделирования аналитических выражений процессов дугообразования по модели Касси основан на допущении, что температура в стволе дуги постоянна и не зависит от тока. Мощность же в стволе дуги изменяется в зависимости от тока.

С одной стороны, оба приведенных способа благодаря более полному отображению физических процессов позволяют получить более точные результаты, с другой – такие модели не позволяют задавать изменения параметров, характеризующие влияние реальной печи на систему энергоснабжения в процессе моделирования. Также при их использовании сложно оценить влияние системы управления положением электродов в печи на параметры системы электроснабжения.

Еще один подход к описанию электрической дуги заключается в составлении ВАХ по значениям токов и напряжений, измеряемых в процессе работы реальной дуговой печи. Далее рассмотрим два способа моделирования ВАХ по реальным значениям в MatLab. В первом способе ВАХ задается с помощью управляемого источника, назначение которого – поддерживать напряжение в соответствии с формой кривой напряжения дуги. Во втором способе модель имитирует сопротивление дуги переменного тока, которая аппроксимирует дугу как переменное сопротивление и выводит выражение связи между переменным сопротивлением, напряжением и током.

Первый способ – динамическая вольтамперная характеристика. ВАХ электрической дуги нелинейная, ее форма напоминает петлю гистерезиса, ширина и наклон которой зависят от этапа плавки. Примеры реальных ВАХ для различных этапов приводятся в [11], [12]. При моделировании в MatLab подобную зависимость можно задать по структурной схеме модели динамической вольтамперной характеристики дуги, которая представлена на рис. 3 [13]. Согласно приведенной схеме выбор части петли осуществляется по знаку производной тока дуги i_D . Затем с помощью управляемого источника напряжения формируется напряжение дуги u_D .

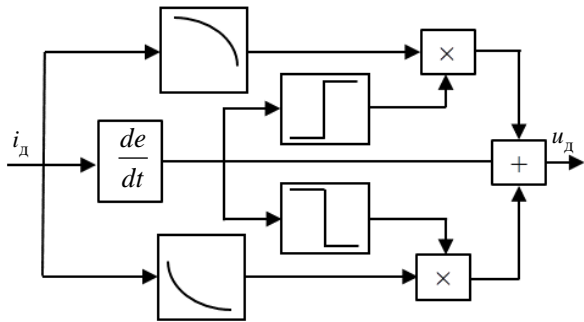


Рис. 3. Структурная схема модели динамической вольтамперной характеристики дуги
Fig. 3. Structural diagram of the model of the dynamic current-voltage characteristic of the arc

В результате интеграции динамической модели ВАХ в модель системы электроснабжения, показанной на рис. 2, получены временная зависимость тока дуги (рис. 4) и гармонический состав тока, характеризуемый амплитудными дискретными спектрами $I_{m n}$ (рис. 5).

На рис. 5 по оси $I_{m n}$ представлены амплитудные значения гармоник тока в процентном выражении от его значений, полученных для рис. 4, где n – номер гармоники.

Моделирование динамической ВАХ электрической дуги позволяет получить значения пара-

метров системы электроснабжения, соответствующие значениям, полученным на реальном объекте. Однако перечисленные ранее недостатки аналитических моделей характерны и в этом случае.

Второй способ – переменные параметры R_d и X_L . Для реализации этого способа дуговую сталеплавильную печь можно рассматривать, согласно электрической схеме замещения дуговой печи, представленной на рис. 6, как переменные активное R_d и индуктивное X_L сопротивление [14]. Тогда длина дуги, которая является одним из наиболее важных параметров в реальной печи, в модели может быть описана с помощью электрического сопротивления R_d . Используя формулу Айртона, можно записать

$$R_d = \frac{u_d}{i_d} = \frac{\alpha + \beta I_d}{i_d},$$

где u_d и i_d – напряжение и ток электрической дуги; α и β – коэффициенты, зависящие от состава газов внутри печи и от материалов электродов. В аналитических расчетах эти коэффициенты представлены как постоянные величины.

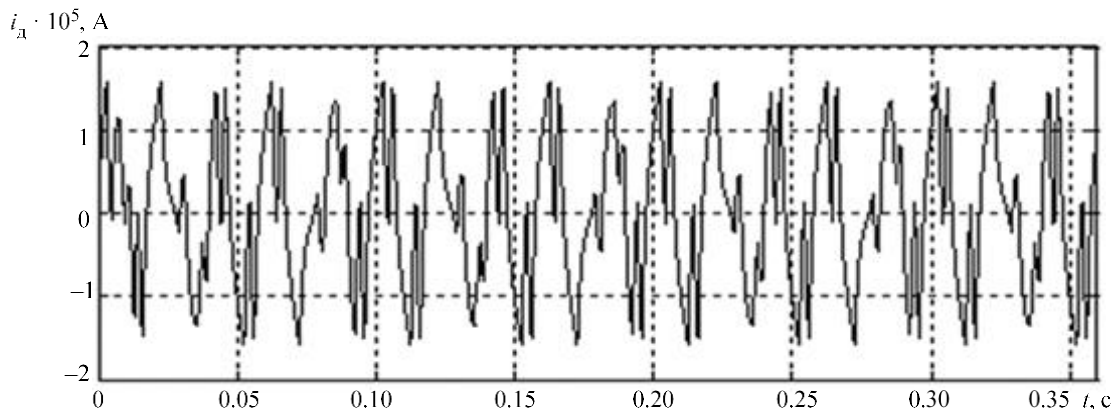


Рис. 4. Временная зависимость тока дуги
Fig. 4. Time dependence of the arc current

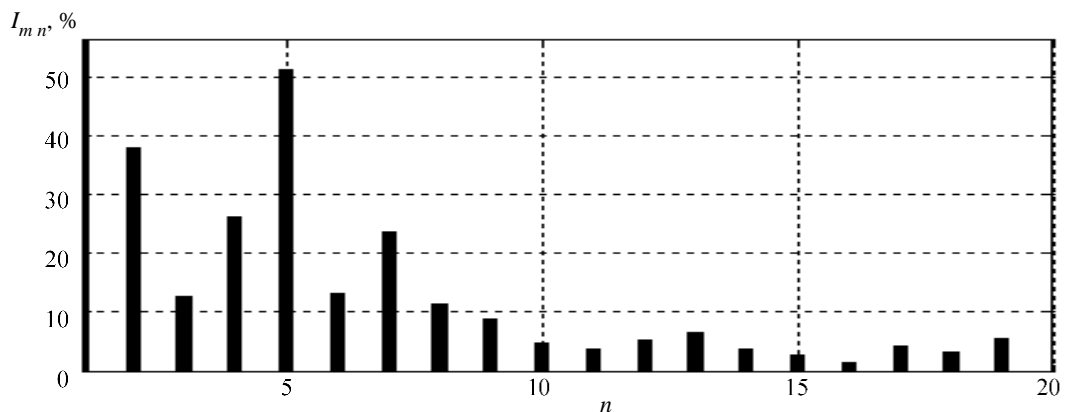


Рис. 5. Гармонический состав несинусоидального тока дуги
Fig. 5. Harmonic composition of non-sinusoidal arc current

При моделировании в пакете MatLab сопротивление дуги можно представить суммой сопротивлений:

$$R_d = R_c + R_v,$$

где R_c и R_v – соответственно постоянная и переменная составляющие сопротивления дуги. Тогда, согласно теореме замещения [15], переменное сопротивление R_v с напряжением u_v можно заменить на эквивалентный источник напряжения u_v .

Соответствующая схема представлена на рис. 7.

При условии, что $R_d = kR_c$, получим

$$\begin{aligned} u_{dR} &= i_d R_d = i_d (R_c + R_v) = i_d R_c + u_v = \\ &= \frac{u_{dR}}{R_d} R_c + u_v = \frac{u_{dR}}{kR_c} R_c + u_v. \end{aligned}$$

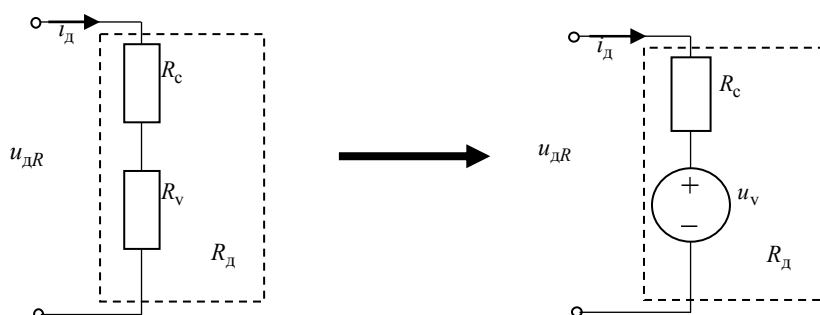


Рис. 7. Схема преобразования сопротивления R_v на эквивалентный источник напряжения u_v

Fig. 7. Scheme for converting resistance R_v to an equivalent voltage source u_v

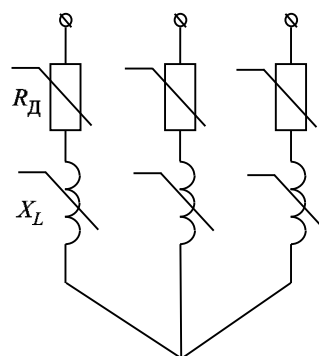


Рис. 6. Электрическая схема замещения дуговой печи

Fig. 6. Arc Furnace Circuit Diagram

Следовательно,

$$u_v = \frac{k-1}{k} u_{dR},$$

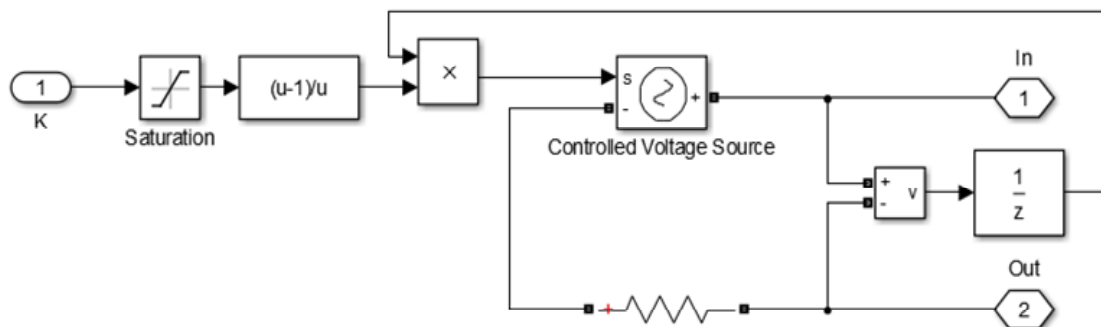


Рис. 8. Схема реализации переменного сопротивления R_v в модели MatLab

Fig. 8. Scheme for implementing variable resistance R_v in the MatLab model

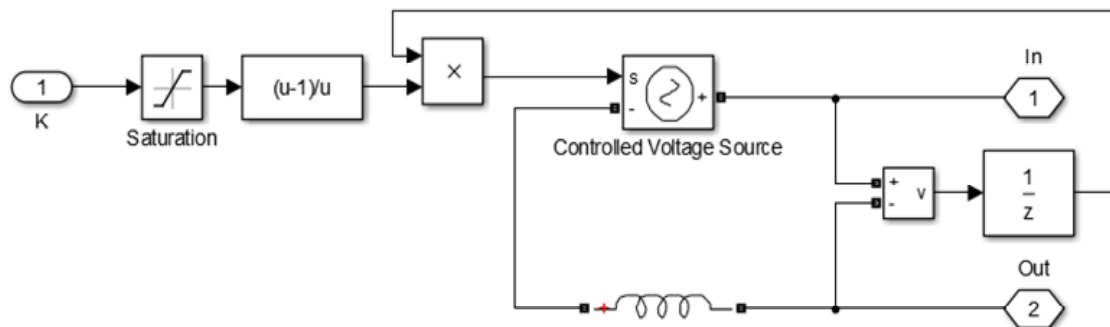


Рис. 9. Схема реализации переменной индуктивности X_L в модели MatLab

Fig. 9. Scheme for implementing variable inductance X_L in the MatLab model

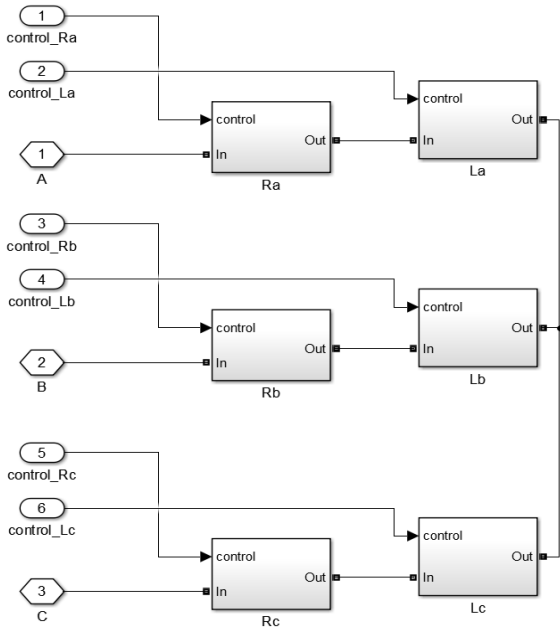


Рис. 10. Реализация модели трехфазной дуговой печи в MatLab
Fig. 10. Implementation of a three-phase arc furnace model in MatLab

где k – коэффициент, задаваемый с помощью входного сигнала, подаваемого на управляемый источник напряжения.

Таким образом, изменяя значение k , можно влиять на изменение сопротивления дуги $R_{д}$. Схема реализации переменного сопротивления в модели MatLab представлена на рис. 8. Аналогично может быть получена схема для переменной индуктивности (рис. 9), где индуктивное сопротивление дуги определяется как

$$X_L = X_{L_c} + X_{L_v},$$

а напряжение u_v эквивалентного источника для X_L будет

$$u_v = \frac{k-1}{k} u_{дL}.$$

На рис. 10 представлена модель трехфазной дуговой печи, каждая фаза которой состоит из последовательно включенных блоков переменных

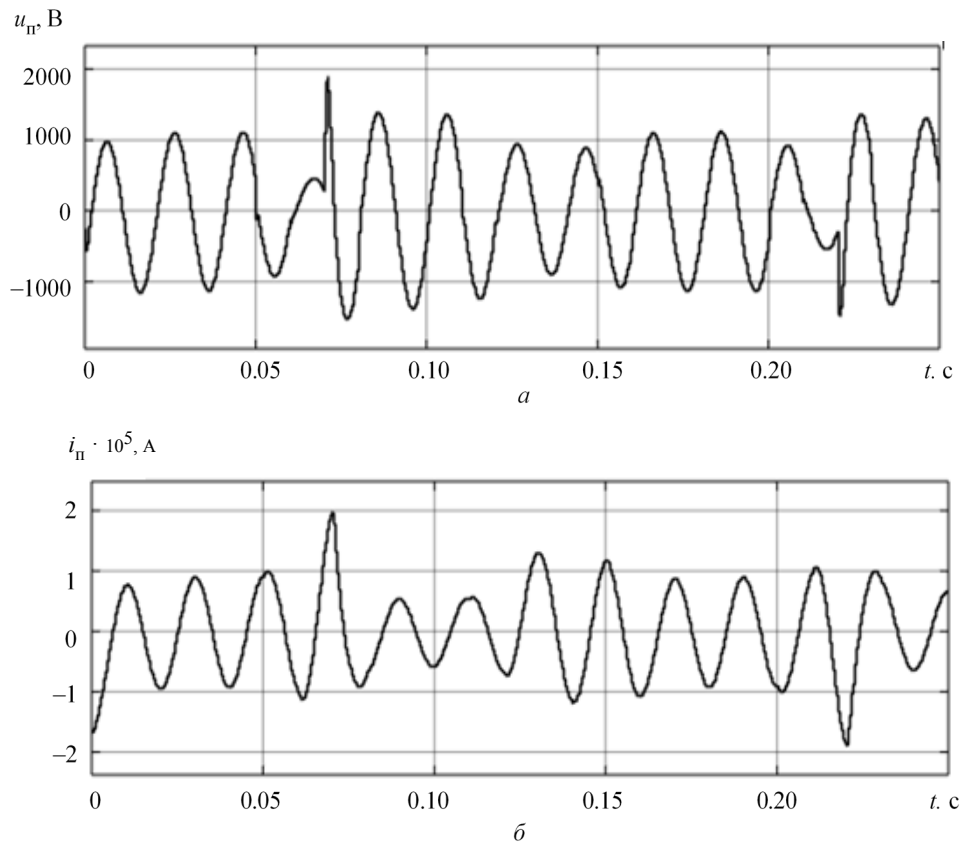


Рис. 11. Временные зависимости напряжения и тока на выходных обмотках печного трансформатора при изменении активного и индуктивного сопротивлений в модели печи:
 a – зависимость напряжения $u_{п}$; $б$ – зависимость тока $i_{п}$

Fig. 11. Time dependences of voltage and current on the output windings of the furnace transformer when the active and inductive resistances in the furnace model change:
 a – voltage dependence $u_{п}$; $б$ – current dependence $i_{п}$

активного R_d и индуктивного X_L сопротивлений. Сигналы, соответствующие значениям R_d и X_L , поступают на входы 1–6. Через коннекторы A , B и C печь подключается к трехфазной системе электроснабжения, показанной на рис. 2. Результаты моделирования дуговой печи по схеме замещения с переменными сопротивлениями, имитирующими

нестабильное горение электрической дуги в процессе расплава металла, приводятся на рис. 11. Сигналы напряжения u_{II} и тока i_{II} измерены на выходных обмотках печного трансформатора.

Рассматриваемая модель дуговой сталеплавильной печи позволяет провести исследование влияния режимов работы печи на параметры си-

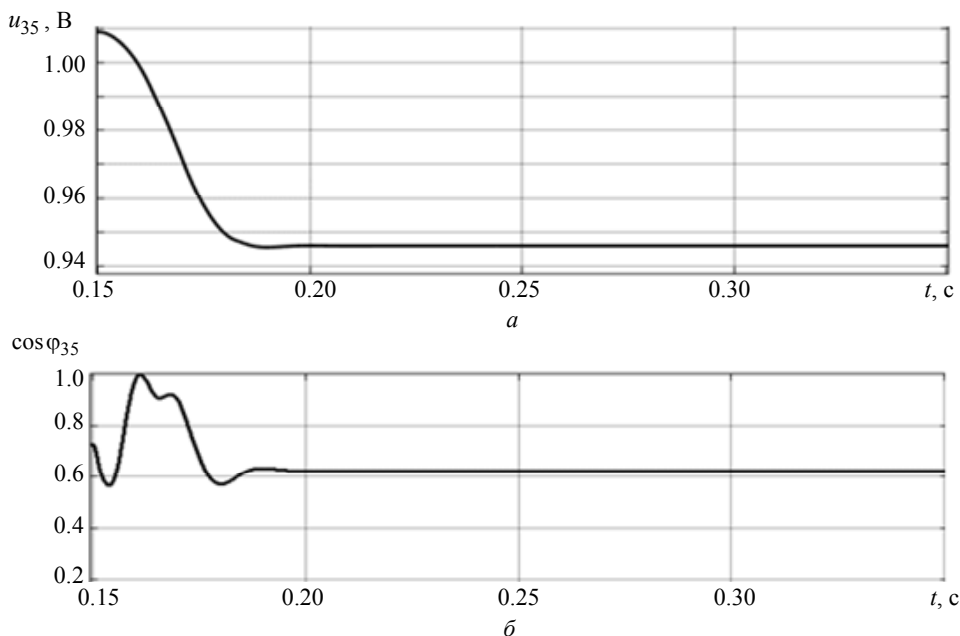


Рис. 12. Параметры системы электроснабжения при $R_d = 9$ мОм и $X_L = 12$ мОм для линии 35 кВ: a – временная зависимость напряжения u_{35} ; b – временная зависимость коэффициента мощности $\cos \varphi_{35}$

Fig. 12. Parameters of the power supply system at $R_d = 9$ m Ω , $X_L = 12$ m Ω for a 35 kV line:

a – time dependence of voltage u_{35} ; b – time dependence of the power factor $\cos \varphi_{35}$

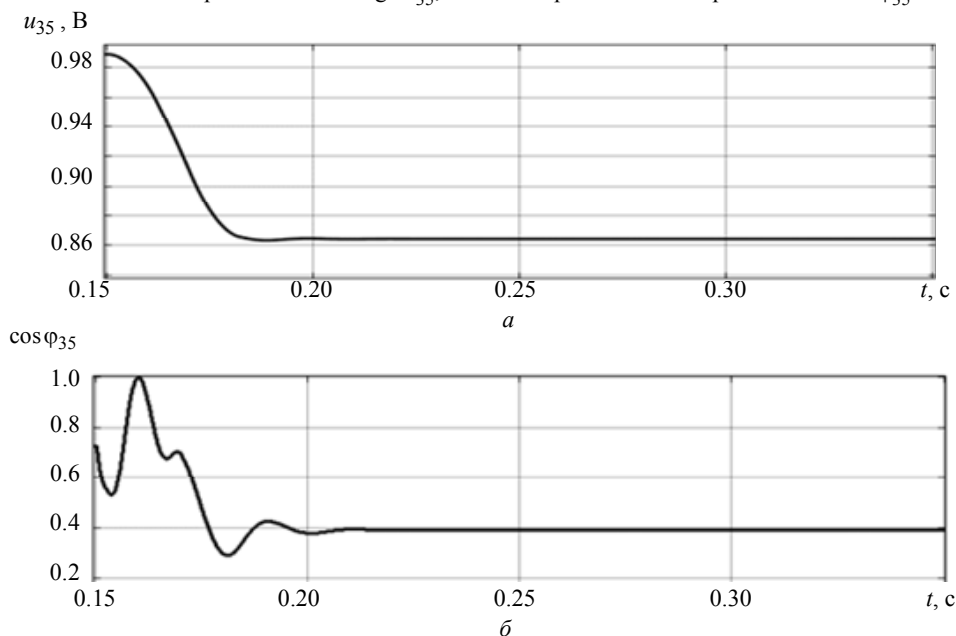


Рис. 13. Параметры системы электроснабжения при $R_d = 3$ мОм и $X_L = 5$ мОм для линии 35 кВ: a – временная зависимость напряжения u_{35} ; b – временная зависимость коэффициента мощности $\cos \varphi_{35}$

Fig. 13. Parameters of the power supply system at $R_d = 3$ m Ω , $X_L = 5$ m Ω for a 35 kV line:

a – time dependence of voltage u_{35} ; b – time dependence of the power factor $\cos \varphi_{35}$

стемы электроснабжения. На рис. 12 и 13 приводятся примеры таких исследований с измерением напряжения u_{35} и коэффициента мощности $\cos \varphi_{35}$ на линии 35 кВ. На рис. 12 показаны изменения параметров при $R_d = 9$ мОм и $X_L = 12$ мОм, соответствующие малой мощности, вводимой в печь, на рис. 13 – при $R_d = 3$ мОм и $X_L = 5$ мОм, соответствующие большой мощности.

Заключение. Полученные результаты исследований могут быть использованы для настройки системы управления статическим тиристорным компенсатором. Например, в [16] рассмотрено

применение аппарата нечеткой логики в системе управления СТК. Терм-множества и функции принадлежности входных и выходной лингвистических переменных нечеткого регулятора были получены по рассмотренной модели. Для определения диапазонов изменения параметров задавались определенные значения R_d и X_L , соответствующие режимам плавки металла в ДСП. Модель с переменными сопротивлениями может быть использована также для определения параметров системы управления электродами дуговой печи. Пример такого использования модели рассмотрен в [17].

Список литературы

1. ГОСТ 32144–2013. Международный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.
2. Иванов В. С., Соколов В. И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336 с.: ил.
3. Федоров А. А., Ристхейн Э. М. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. для вузов. М.: Энергия, 1981. 360 с.
4. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с., 74 ил. 3-е изд., перераб. и доп.
5. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SymPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
6. Купова А. В., Лановенко Е. В., Соловьева Е. Б. Математическое моделирование трехфазных цепей в программной среде MatLab / Качество. Инновации. Образование. 2019. № 5 (163). С. 37–46. doi: 10.31145/1999-513x-2019-5-37-45.
7. Соловьев В. А., Дерюжкова Н. Е., Купова А. В. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи / Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Сер.: Энергетика. 2014. Т. 14. № 2. С. 23–28.
8. Бикеев Р. А., Чердниченков В. С. Моделирование электромагнитных процессов в трехфазных дуговых электропечах // Электротехника. 2015. № 8. С. 32–39.
9. Костылева Е. М. Математическое моделирование напряженности электромагнитного поля, созда-

ваемого дуговыми сталеплавильными печами трехфазного переменного тока // Автоматизированные технологии производства. 2016. № 3(13). С. 56–59.

10. Фомин А. В. Построение имитационной модели дуговой сталеплавильной печи // Изв. ТулГУ. Сер.: Технические науки. 2009. № 3. С. 322–330.

11. Марков Н. А., Баранник О. В. Эксплуатационный контроль электрических параметров дуговых электропечей. М.: Энергия, 1973. 104 с.

12. Михадаров Д. Г. Исследование особенностей характеристик электротехнологических дуг в дуговых печах: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / Чувашский гос. ун-т им. И. Н. Ульянова». Чебоксары, 2015. 123 с.

13. Моделирование электрического контура дуговой печи / Г. П. Корнилов, А. Ю. Мещеряков, А. А. Николаев, Т. Р. Храмшин, И. А. Якимов; МГТУ им. Г. И. Носова. Магнитогорск, 2006.

14. Марков Н. А. Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок. М.: Энергия, 1975. 840 с.

15. Бычков Ю. А. Введение в теоретическую электротехнику. Курс подготовки бакалавров: учеб. пособие / Ю. А. Бычков, В. М. Золотницкий, Е. Б. Соловьева, Э. П. Чернышев. СПб.: Лань, 2016. 288 с.

16. Deryuzhkova N. E., Solovyev V. A., Kupova A. V. Intelligent Control System for Static Var Compensator of Arc Furnace // 2019 Intern. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok (Asian-Pacific region), 2019. P. 8934436. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934436.

17. Моделирование дуговой печи с управляемыми электродами в MatLab / А. В. Купова, Е. В. Лановенко, В. А. Соловьев, А. С. Гудим // Учен. зап. Комсомольского на-Амуре гос. техн. ун-та. 2019. Т. 1, № 4. С. 22–27.

Информация об авторах

Купова Анастасия Викторовна – старший преподаватель СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: avkupova@etu.ru

<http://orcid.org/0000-0001-5848-8780>

Лановенко Елена Викторовна – канд. техн. наук, доцент СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: elanovenko@mail.ru

<http://orcid.org/0000-00016645-3369>

References

1. GOST 32144–2013. Mezhdunarodnyj standart. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. M.: Standartinform, 2014. 15 s. (In Russ.).
2. Ivanov V. S., Sokolov V. I. Rezhimy potrebleniya i kachestvo elektroenergii sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij. M.: Energoatomizdat, 1987. 336 s.: il. (In Russ.).
3. Fedorov A. A., Risthejn E. M. Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatij: Ucheb. dlya vuzov. M.: Energiya, 1981. 360 s. (In Russ.).
4. ZHezhelhenko I. V., Saenko YU. L. Pokazateli kachestva elektroenergii i ih kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyah. M.: Energoatomizdat, 2000. 252 s., 74 il. 3-e izd., pererab. i dop. (In Russ.).
5. CHernyh I. V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustrojstv v Matlab, SymPowerSystems i Simulink. M.: DMK Press; SPb.: Piter, 2008. 288 s. (In Russ.).
6. Kupova A. V., Lanovenko E. V., Solov'eva E. B. Matematicheskoe modelirovanie trekhfaznykh cepej v programmnoj srede MatLab / Kachestvo. Innovacii. Obrazovanie. 2019. № 5 (163). S. 37–46. doi: 10.31145/1999-513x-2019-5-37-45. (In Russ.).
7. Solov'ev V. A., Deryuzhkova N. E., Kupova A. V. Modelirovanie staticheskogo tiristorного kompensatora v sisteme energosnabzheniya dugovoj staleplavil'noj pechi / Vestn. YUzhno-Ural'skogo gos. un-ta. Ser.: Energetika. 2014. T. 14, № 2. S. 23–28. (In Russ.).
8. Bikeev R. A., CHerednichenkov V. S. Modelirovanie elektromagnitnykh processov v trekhfaznykh dugovykh elektropechah // Elektrotehnika. 2015. № 8. S. 32–39. (In Russ.).
9. Kostyleva E. M. Matematicheskoe modelirovanie napryazhennosti elektromagnitного polya, sozdavaemogo dugovymi staleplavil'nymi pechami trekhfaznogo peremennogo toka // Avtomatizirovannyye tekhnologii proizvodstva. 2016. № 3(13). S. 56–59. (In Russ.).
10. Fomin A. V. Postroenie imitacionnoj modeli dugovoj staleplavil'noj pechi / Izv. TulGU. Ser.: Tekhnicheskije nauki. 2009. № 3. S. 322–330. (In Russ.).
11. Markov N. A., Barannik O. V. Ekspluatacionnyj kontrol' elektricheskikh parametrov dugovykh elektropechej. M.: Energiya, 1973. 104 s. (In Russ.).
12. Mihadarov D. G. Issledovanie osobennostej harakteristik elektrotekhnologicheskikh dug v dugovykh pechah: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.10 / CHuvashskij gos. un-t im. I. N. Ul'yanova. Cheboksary, 2015. 123 s. (In Russ.).
13. Modelirovanie elektricheskogo kontura dugovoj pechi / G. P. Kornilov, A. YU. Meshcheryakov, A. A. Nikolaev, T. R. Hramshin, I. A. YAKimov; MGTU im. G. I. Nosova. Magnitogorsk, 2006. (In Russ.).
14. Markov N. A. Elektricheskije cepi i rezhimy dugovykh elektropechnykh ustanovok. M.: Energiya, 1975. 840 s. (In Russ.).
15. Vvedenie v teoreticheskuyu elek-trotekhniku. Kurs podgotovki bakalavrov: ucheb. posobie / YU. A. Bychkov, V. M. Zolotnickij, E. B. Solov'eva, E. P. CHernyshev. SPb.: Lan', 2016. 288 s. (In Russ.).
16. Deryuzhkova N. E., Solovyev V. A., Kupova A. V. Intelligent Control System for Static Var Compensator of Arc Furnace // 2019 Intern. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok (Asian-Pacific region), 2019. P. 8934436. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934436.
17. Modelirovanie dugovoj pechi s upravlyaemyimi elektrodami v MatLab / Kupova A. V., Lanovenko E. V., Solov'ev V. A., Gudim A. S. // Uchen. zap. Komсомol'skogo-na-Amure gos. tekhn. un-ta. 2019. T. 1, № 4. S. 22–27. (In Russ.).

Information about the authors

Anastasia V. Kupova – Senior Lecturer of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: avkupova@etu.ru

<http://orcid.org/0000-0001-5848-8780>

Elena V. Lanovenko – Cand. Sci. (Eng.), Docent of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: elanovenko@mail.ru

<http://orcid.org/0000-00016645-3369>

Статья поступила в редакцию 07.09.2022; принята к публикации после рецензирования 19.09.2022; опубликована онлайн 25.11.2022.

Submitted 07.09.2022; accepted 19.09.2022; published online 25.11.2022.