

Купова А. В., Лановенко Е. В., Соловьёв В. А. Гудим А. С.
A. V. Kupova, E. V. Lanovenko, V. A. Solovyov, A. S. Gudim

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДУГОВОЙ ПЕЧИ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ В MATLAB
SIMULATION OF ELECTRIC ARC FURNACE WITH CONTROLLED ELECTRODE MEANS
MATLAB

Купова Анастасия Викторовна – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: avkupova@etu.ru.

Mrs. Anastasia V. Kupova – Senior Lecturer of Theoretical Bases of Electrical Engineering Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» (Russia, Saint Petersburg). E-mail: avkupova@etu.ru.

Лановенко Елена Викторовна – доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: elanovenko@mail.ru.

Mrs. Elena V. Lanovenko – PHD in Engineering, Assistant Professor of Theoretical Bases of Electrical Engineering Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» (Russia, Saint Petersburg). E-mail: elanovenko@mail.ru.

Соловьёв Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Mr. Vyacheslav A. Solovyov – Doctor of Engineering, Professor of Electric Drive and Industrial Plant Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Гудим Александр Сергеевич – декан электротехнического факультета Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. +7(4217)24-11-09. E-mail: Elf@knastu.ru.

Mr. Alexander S. Gudim – Dean of the Faculty of Electrical Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. +7(4217)24-11-09. E-mail:Elf@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассмотрено моделирование дуговой сталеплавильной печи в системе MatLab. Данная модель предназначена для дальнейшей интеграции в общую модель системы энергоснабжения печи, в которой также содержится статический тиристорный компенсатор. Поэтому дуговая печь представляется как электротехнический объект, описываемый соответствующими параметрами. При моделировании учитывалось, что перемещение электродов в ванне печи оказывает влияние на переходные процессы в общей системе. В результате была получена модель дуговой печи с системой управления положением электродов.

Summary. This article discusses the simulation of an arc steel furnace in the MatLab system. This model is intended for further integration into the General model of the furnace power supply system, which also contains a static thyristor compensator. Therefore, the arc furnace is represented as an electrical object described by the corresponding parameters. When modeling, it was taken into account that the movement of electrodes in the furnace bath affects the transients in the overall system. As a result, a model of an arc furnace with an electrode position control system was obtained.

Ключевые слова: моделирование в MatLab, дуговая сталеплавильная печь, управление электродами печи.

Key words: simulation means MatLab, electric arc furnace, furnace electrode control.

УДК 519.876.5

В металлургической промышленности для получения стали распространено применение дуговых сталеплавильных печей (ДСП). К основным достоинствам ДСП относятся возможность гибкого управления процессом плавки и, как следствие, получение сплавов более высокого каче-

ства. В то же время если рассматривать дуговые сталеплавильные печи как потребителя электрической энергии, то можно отметить, что такой электроприёмник существенно ухудшает показатели качества электроэнергии. Поэтому для компенсации негативного влияния ДСП на электрические сети используют статические тиристорные компенсаторы (СТК), в задачи которых входят поддержание необходимого уровня напряжения и коэффициента мощности, уменьшение несимметрии, несинусоидальности и фликера. За многие годы использования СТК хорошо зарекомендовали себя в системах с резкопеременной нагрузкой, к которым относится система энергоснабжения ДСП. Но в современных условиях увеличения требований к качеству технологических процессов практическую значимость имеет разработка новых алгоритмов работы системы управления компенсатором. При этом проведение исследований в реальной системе энергоснабжения не всегда возможно и ведёт к существенным затратам, поэтому актуально использование различных моделей.

Существенно облегчить процесс разработки моделей позволяет использование библиотек блочного моделирования в пакете MatLab. Например, моделирование системы энергоснабжения дуговой печи (см. рис. 1) в результате сводится к выбору соответствующих блоков [6], имитирующих работу реальных устройств (линии электропередачи, трансформаторов, реакторов и т.п.), и позволяет уделить большее внимание режимам работы компенсатора [4; 7] и дуговой сталеплавильной печи.

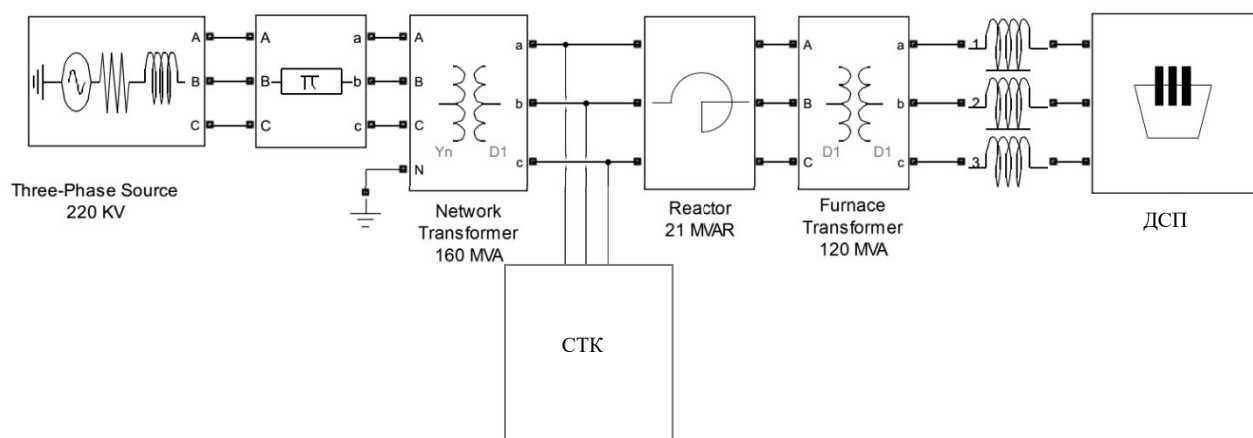


Рис. 1. Модель системы энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи в MatLab

В настоящее время технически невозможно составить модель дуговой печи, в которой будут учтены абсолютно все процессы (тепловые, химические и т.д.), т.к. это существенно увеличит время проведения расчётов и затруднит получение результатов исследований. Поэтому в зависимости от целей исследования принято выделять определённые параметры для моделирования. Для рассматриваемого случая целесообразно тем или иным образом реализовать вольт-амперную характеристику (ВАХ) электрической дуги [1; 3] и описать дуговую печь при помощи электрических параметров: тока дуги i_d и напряжения дуги u_d . Кроме того, при составлении модели следует учесть, что для коррекции имеющихся или разработки новых алгоритмов управления СТК важно выделить не только основные режимы работы печи, но и особенности переходов между этими режимами. Также при моделировании следует учитывать, что процессы нестабильного горения электрических дуг и их влияние на качество электроэнергии должны рассматриваться в совокупности с системой управления положением электродов печи, регулирующей длину электрической дуги.

Среди существующих способов моделирования ДСП как электротехнического объекта следует выделить три подхода:

1. моделирование на основе аналитических выражений, например, по уравнению Касси;
2. моделирование динамической ВАХ электрической дуги;

3. моделирование с заданием определённого значения параметра, характеризующего дуговой процесс, из множества возможных.

Первые два подхода, с одной стороны, позволяют получить более точные результаты, т.к. более полно отображают физические процессы, протекающие в печи. С другой стороны, эти подходы ограничивают возможности исследователя задавать изменения, характеризующие влияние реальной печи на систему энергоснабжения в процессе симуляции. В таких моделях также затруднительно оценить влияние системы управления положением электродов.

В качестве примера реализации второго подхода в MatLab можно привести модель вольт-амперной характеристики дуги, составленную по функциональной схеме, показанной на рис. 2. [2]. Кривые ВАХ задаются точками $\{i_{д}, u_{д}\}$, полученными в результате измерений в реальной системе. Результаты интеграции в модель системы энергоснабжения печи (см. рис. 1) можно увидеть на рис. 3. Кривая мгновенных значений и гармонический состав тока дуги подобны полученным на реальном объекте.

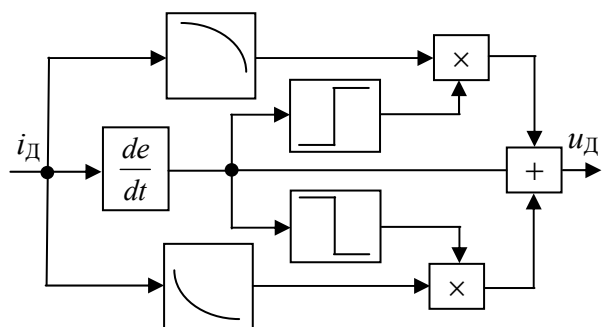


Рис. 2. Схема модели динамической ВАХ электрической дуги

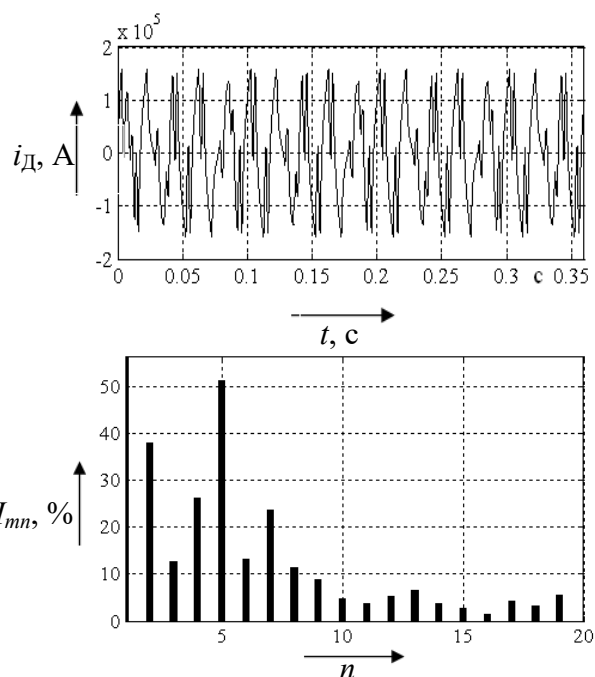


Рис. 3. Ток электрической дуги по модели динамической ВАХ дуги в MatLab

Для реализации третьего подхода удобно использовать электрическую схему замещения дуговой печи, учитывающую электрическое сопротивление дуги $R_{д}$ и индуктивность контура печи L (см. рис. 4). Через величину электрического сопротивления $R_{д}$ можно косвенно ввести в модель один из важных параметров: длину электрической дуги $l_{д}$. По формуле Айртона электрическую дугу можно описать как

$$u_{д} = \alpha + \beta l_{д},$$

где α и β – коэффициенты, зависящие от состава газов внутри печи и от материалов электродов. При аналитических расчётах эти коэффициенты рассматриваются как некоторые постоянные величины. Тогда сопротивление дуги $R_{д}$ можно определить следующим образом:

$$R_{д} = \frac{u_{д}}{i_{д}} = \frac{\alpha + \beta l_{д}}{i_{д}}.$$

Необходимо отметить, что сопротивление дуги $R_{д}$ и индуктивность L являются переменными параметрами. Для моделирования в MatLab разложим сопротивление дуги на составляющие:

$$R_{д} = R_{с} + R_{v},$$

где R_c – постоянная составляющая сопротивления дуги; R_v – переменная составляющая.

Тогда по теореме замещения переменное сопротивление R_v с напряжением u_v можно поменять на эквивалентный источник напряжения (см. рис. 5).

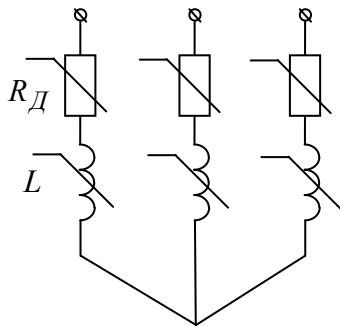


Рис. 4. Электрическая схема замещения дуговой сталеплавильной печи

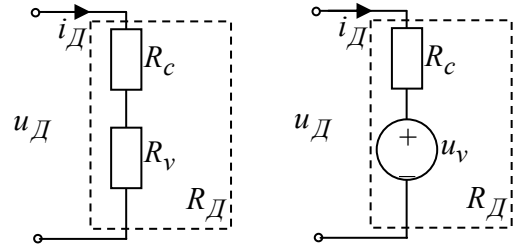


Рис. 5. Эквивалентная схема переменного сопротивления

Если задать $R_D = kR_c$, то

$$u_D = i_D R_D = i_D (R_c + R_v) = i_D R_c + u_v = \frac{u_D}{R_D} R_c + u_v = \frac{u_D}{kR_c} R_c + u_v,$$

тогда

$$u_v = \frac{k-1}{k} u_D.$$

Таким образом, при изменении значения k (задаётся с помощью входного сигнала, см. рис. 6) в модели будет изменяться значение сопротивления R_D . На рис. 7. показан график тока дуги при одном из значений k .

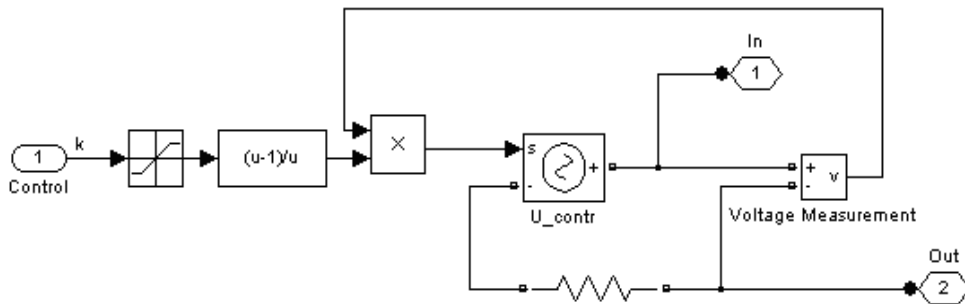


Рис. 6. Модель переменного сопротивления в MatLab

Система управления положением электродов используется для обеспечения стабильного горения электрической дуги. При этом требуется поддерживать большое число параметров в определённых пределах. Часть из них из-за особенностей процесса недоступна для измерения и контроля. В то же время эти параметры связаны между собой, и изменение одного из них приводит к изменениям остальных. Поэтому в качестве регулируемого параметра используют доступный для измерения сигнал напряжения на низкой стороне печного трансформатора. Для поддержания уровня напряжения, необходимого для оптимальной работы печи, регулятор вырабатывает сигнал, влияющий на перемещение электрода по вертикали. Перемещение электрода изменяет длину дуги l_D и, соответственно, изменяет напряжение u_D и ток i_D дуги. В имитационной модели эти изменения обусловлены изменением сопротивления дуги R_D (см. рис. 8).

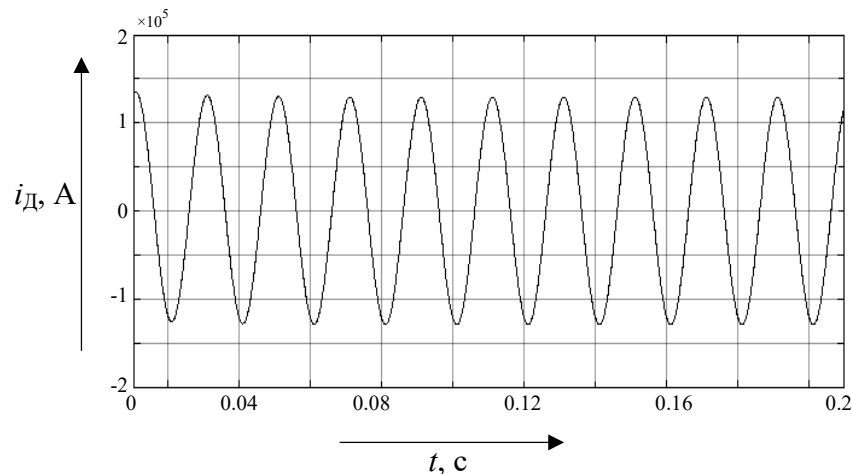


Рис. 7. График тока электрической дуги

Для рассматриваемой системы сложно получить полное математическое описание из-за наличия нелинейных элементов. Поэтому настройка ПИ-регулятора осуществлялась так называемым инженерным методом с поиском оптимальных параметров регулятора. В процессе настройки выяснилось, что интегральная составляющая регулятора не зависит от изменения режима печи, её оптимальное значение $k_i = 25$. Пропорциональная составляющая регулятора является изменяемой величиной, её значение зависит от величины возмущающего сигнала $R_{д.возм}$ и величины $R_{д}$, которую необходимо получить в результате регулирования. Для областей, соответствующих средним и малым мощностям печи, зависимость носит линейный характер.

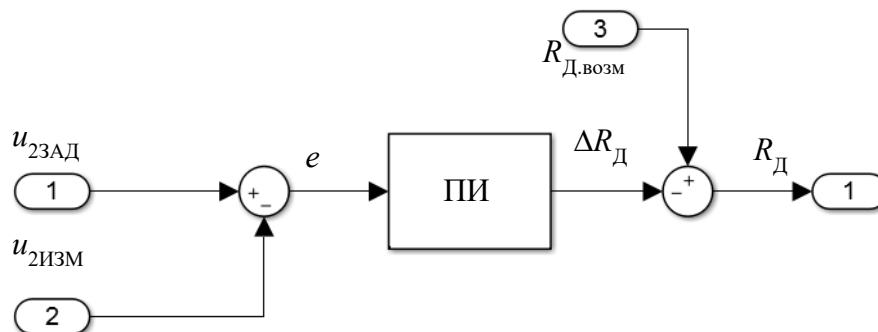


Рис. 8. Имитационная модель системы управления положением электродов в MatLab

На рис. 9 приведены результаты измерения напряжения трансформатора u_2 при имитации работы печи на максимальной мощности. Этому режиму соответствует напряжение $u_2 = 816$ В. Но влияние возмущения приводит к тому, что печь практически перестаёт потреблять энергию и напряжение u_2 (см. рис. 9, а) соответствует напряжению холостого хода трансформатора. В результате включения системы управления положением электродов удаётся вывести значение u_2 на необходимый уровень (см. рис. 9, б).

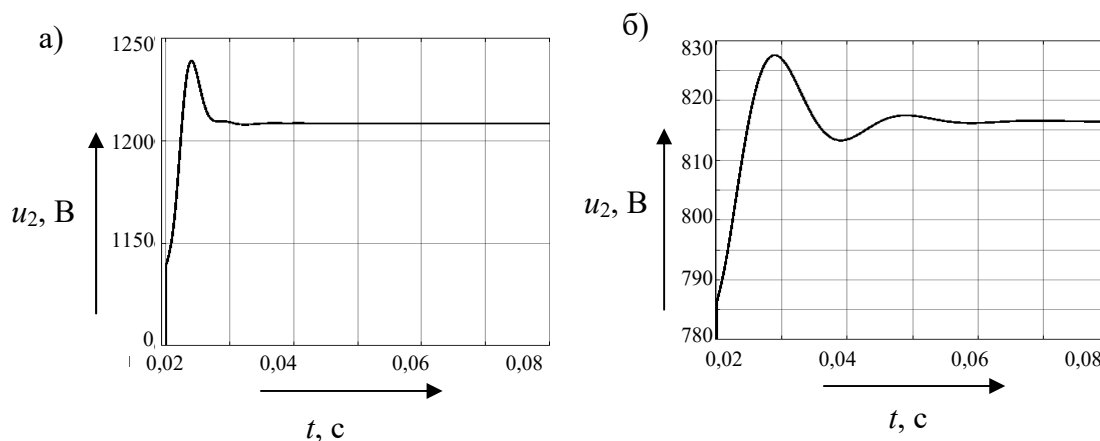


Рис. 9. Результаты работы системы управления положением электродов:
а – без регулятора; б – с ПИ-регулятором

Система управления положением электродов позволяет достаточно быстро отработать возмущение $R_{д.возм}$. В то же время система управления СТК успевает оценить искажение кривых тока и напряжения и, соответственно, выработать управляющий сигнал на включение ёмкостных фильтров и тиристорно-реакторной группы. Тогда после устранения возмущения системой управления положением электродов происходит очередное переключение фильтров СТК. Очевидно, что такие переключения приводят к дополнительным переходным процессам и вносят свои искажения в работу энергосистемы. Рассмотренная модель дуговой печи позволяет проанализировать влияние на энергосистему самого возмущения $R_{д.возм}$ и его отработки и, как следствие, учесть их при составлении алгоритмов работы СТК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров, А. В. Расчёт мощности и параметров электросталеплавильных печей: учеб. пособие для вузов / А. В. Егоров. – М.: МИСИС, 2000. – 272 с.
2. Моделирование электрического контура дуговой печи / Г. П. Корнилов, А. Ю. Мещеряков, А. А. Николаев, Т. Р. Храпшин, И. А. Якимов. – Магнитогорск: ГОУВПО «МГТУ им. Г. И. Носова», 2006. – С. 210-217.
3. Марков, Н. А. Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок / Н. А. Марков. – М.: Энергия, 1975. – 840 с.
4. Соловьев, В. А. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 23-28.
5. Фомин, А. В. Построение имитационной модели дуговой сталеплавильной печи / А. В. Фомин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2009. – № 3. – С. 322-330.
6. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SymPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
7. Pierre Giroux, Gibert Sybille. SVC (Detailed Model) Mathworcs USA, 1994-2017 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps_product-power_svc_1tcr3tsc-svc-detailed-model (дата обращения: 18.08.2017).