

УДК 669.184:621.3.06

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Шпиганович А.А.¹, д. т. н., профессор кафедры электрооборудования (kaf-eo@stu.lipetsk.ru)

Федоров О.В.², д. т. н., профессор кафедры управления инновационной
деятельностью (fov52@mail.ru)

Пушница К.А.¹, к. т. н., доцент кафедры электрооборудования (kostpa@mail.ru)

Чуркина Е.В.¹, старший преподаватель кафедры электрооборудования (ekas2534@yandex.ru)

¹Липецкий государственный технический университет
(398600, Россия, Липецк, ул. Московская, 30)

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

Аннотация. В работе отмечается, что развитие промышленности будет осуществляться в рамках государственной программы, согласно которой предусматривается развитие промышленных предприятий, в том числе предприятий металлургического цикла. Такие предприятия представляют собой комплексные хозяйства и объединения различного масштаба, продукция которых имеет важное стратегическое значение. Для надежного функционирования металлургических предприятий требуется адекватная система электроснабжения, обладающая высокой энергоэффективностью и минимально возможной энергоемкостью. Большинство приемников металлургических производств относятся к первой категории надежности электроснабжения, что предъявляет высокие требования к их системам электроснабжения. Рассмотрены системы электроснабжения металлургических предприятий. Показано, что на систему электроснабжения могут воздействовать различные негативные факторы, в том числе коммутационные перенапряжения. Такие перенапряжения могут иметь высокочастотный характер и возникают при срабатывании вакуумных выключателей. Их появление обусловлено механизмом гашения дуги в вакууме (вторные зажигания дуги, срез тока, эскалация напряжения). Перенапряжения снижают уровень надежности систем электроснабжения, что может привести к длительному отключению ответственных потребителей. Наиболее уязвимыми к перенапряжениям элементами систем электроснабжения являются электродвигатели, изоляция которых обладает наименьшим запасом электрической прочности. Типовые средства защиты (разрядники, нелинейные ограничители перенапряжений, искровые промежутки) малоэффективны для ограничения перенапряжений, имеющих высокочастотный характер. Для ограничения перенапряжений подобного рода все большее применение находят защитные RC-цепочки. Однако их применение должно сопровождаться достаточно точным моделированием, так как неправильный выбор их параметров может привести в некоторых случаях даже к ухудшению процесса коммутации. Все это обуславливает важность задачи выбора оптимальных параметров защитных RC-цепочек и схем их соединения. Выявлена типовая схема электропитания и проведено моделирование коммутационных перенапряжений, возникающих в подобной схеме. Для построения модели фрагмента системы электроснабжения применялся пакет Matlab. При создании модели использовались как уже известные положения, так и впервые предложенные авторами, что обеспечило модели большую точность. Полученные результаты представлены в виде осциллограмм и осуществлено сравнение экспериментальных и расчетных данных. Относительная погрешность результатов составила менее 5 %. Даны рекомендации по построению рациональных систем электроснабжения металлургических предприятий, позволяющие снизить негативные возмущения, действующие на такие системы.

Ключевые слова: металлургические предприятия, система электроснабжения, моделирование, коммутационные перенапряжения, асинхронный электродвигатель, вакуумный выключатель, RC-цепочки.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-9-726-731

В соответствии с государственной программой РФ [1] в ближайшие годы предусматривается «создание в Российской Федерации конкурентоспособной, устойчивой, структурно-сбалансированной промышленности (в структуре отраслей, относящихся к предмету Программы), способной к эффективному саморазвитию на основе интеграции в мировую технологическую среду, разработки и применения передовых промышленных технологий, нацеленной на формирование и освоение новых рынков инновационной продукции, эффективно решающей задачи обеспечения экономического развития и обороноспособности страны».

Одно из ведущих мест в промышленности занимают предприятия металлургического цикла, продукция которых имеет важное стратегическое значение [2]. Металлургические предприятия представляют собой комплексные хозяйства и объединения различного масштаба, которые в свою очередь могут состоять из более мелких структурных подразделений (производство, цех, участок, крупный технологический агрегат, пусковой комплекс) [3 – 5]. Для обеспечения функционирования такого предприятия требуется адекватная система электроснабжения, которая должна удовлетворять требованиям повышения энергоэффективности и снижения энергоемкости [6].

Система электроснабжения металлургического предприятия состоит из источников питания и линий электропередачи, осуществляющих подачу электроэнергии к предприятию, понизительных, распределительных и преобразовательных подстанций и связывающих их кабельных и воздушных линий, а также токопроводов, обеспечивающих подвод электроэнергии к ее потребителям на требуемом напряжении [7, 8]. Для бесперебойного функционирования предприятия требуется надежная система электроснабжения, устойчивая к различным видам возмущений. Такие возмущения оказывают отрицательное воздействие на систему электроснабжения и могут привести к длительному отключению ответственных потребителей [9 – 13].

По степени надежности электроснабжения большинство приемников металлургических производств по классификации ПУЭ относится к первой категории, за исключением тех, которые составляют «особую группу» первой категории. Для этих приемников предусмотрен третий независимый источник питания, назначение которого – безаварийный останов производства [14 – 16].

В системах электроснабжения металлургических производств имеется значительное количество высоковольтных электродвигателей и трансформаторов, коммутируемых различными типами выключателей, в том числе вакуумными. При отключении вакуумными выключателями электродвигательных присоединений вероятны значительные перенапряжения, вызванные срезом тока и эскалацией напряжения. В результате срабатывания вакуумных выключателей возможно явление многократных повторных зажигания дуги, что приводит к возникновению перенапряжений, имеющих высокочастотный характер. Коммутационные перенапряжения оказывают существенное влияние на работу оборудования, особенно на электродвигатели, изоляция которых по сравнению с другим электрооборудованием обладает наименьшим запасом электрической прочности. На сегодняшний день отсутствуют эффективные меры гашения подобных коммутационных перенапряжений. Разрядники, нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН), искровые промежутки как средство защиты от высокочастотных перенапряжений малоэффективны. Вызвано это резким подъемом их вольт-секундных характеристик при предразрядных временах менее 1 мкс. Для защиты от перенапряжений, имеющих высокочастотный характер, все большее применение находят защитные RC-цепочки. Однако их применение должно сопровождаться достаточно точным моделированием, так как неправильный выбор параметров RC-цепочек в определенных случаях может привести, например, к ухудшению процесса коммутации. Выбор параметров RC-цепочек и оптимальных схем их соединения представляет собой важную техническую задачу.

Исследование коммутационных перенапряжений проведем на примере кислородно-конвертерного про-

изводства. Основными электроприемниками кислородно-конвертерного производства являются асинхронные двигатели и нагрузки, запитываемые через комплектные трансформаторные подстанции. Типовая схема электроснабжения с использованием промежуточных распределительных подстанций состоит из трансформатора – линии – распределительной подстанции – линии – приемника, где в качестве приемника выступает асинхронный двигатель или нагрузка, питаемая от комплектной трансформаторной подстанции. Поскольку асинхронный двигатель обладает значительно меньшим запасом электрической прочности изоляции, чем трансформатор, то в дальнейшем именно он выступает в качестве исследуемого объекта. Для построения модели фрагмента системы электроснабжения использовался пакет Matlab. Общий вид исследуемой схемы приведен на рис. 1.

При моделировании вакуумного выключателя принимались следующие положения:

- электрическая прочность межконтактного промежутка описывается линейной зависимостью и по данным работы [17] составляет 20 – 80 кВ/мс;
- рост электрической прочности до предельного значения имеет место в течение 6 мс при скорости движения контактов 1 мм/мс [17];
- первое прерывание тока является возможным при мгновенном значении тока не более $i_{ср}$ (ток среза, который зависит от материала контактов, для современных выключателей имеет значение 2 – 5 А [17]);
- при возникновении первого и последующих пробоев межконтактного промежутка является возможным гашение высокочастотного тока при его переходе через «нуль» со скоростью не выше заданной (в пределах $50 \leq \partial i / \partial t \leq 150$ А/мкс [17, 18]);
- сопротивление дуги моделировалось резистором.

Для оценки адекватности разработанной модели были использованы экспериментальные данные, представленные в работе [19]. Они получены при отключении двигателя мощностью $P = 2000$ кВт, подключенного кабельной линией длиной 550 м. Скорость восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка составила 46,3 кВ/мс. Ток среза принимался равным 5 А. Скорость гашения высокочастотного тока определялась путем варьирования $\partial i / \partial t = 135$ А/мкс, что попадает в диапазон $50 \leq \partial i / \partial t \leq 150$ А/мкс [17, 18]. Осциллограммы напряжений для фаз «А», «В», «С», полученные на модели, представлены на рис. 2, а экспериментальные зависимости – на рис. 3.

Напряжение фазы «В» по результатам эксперимента составило $3,0 U_{фм}$, т. е. 25,72 кВ, а по осциллограмме, полученной на модели, оно равно 26,98 кВ. Относительная погрешность результатов составила менее 5 %.

На разработанной модели было проведено исследование влияния параметров коммутируемого присоединения (длина линии, мощность электродвигателя) и других факторов на процесс перенапряжений, опреде-

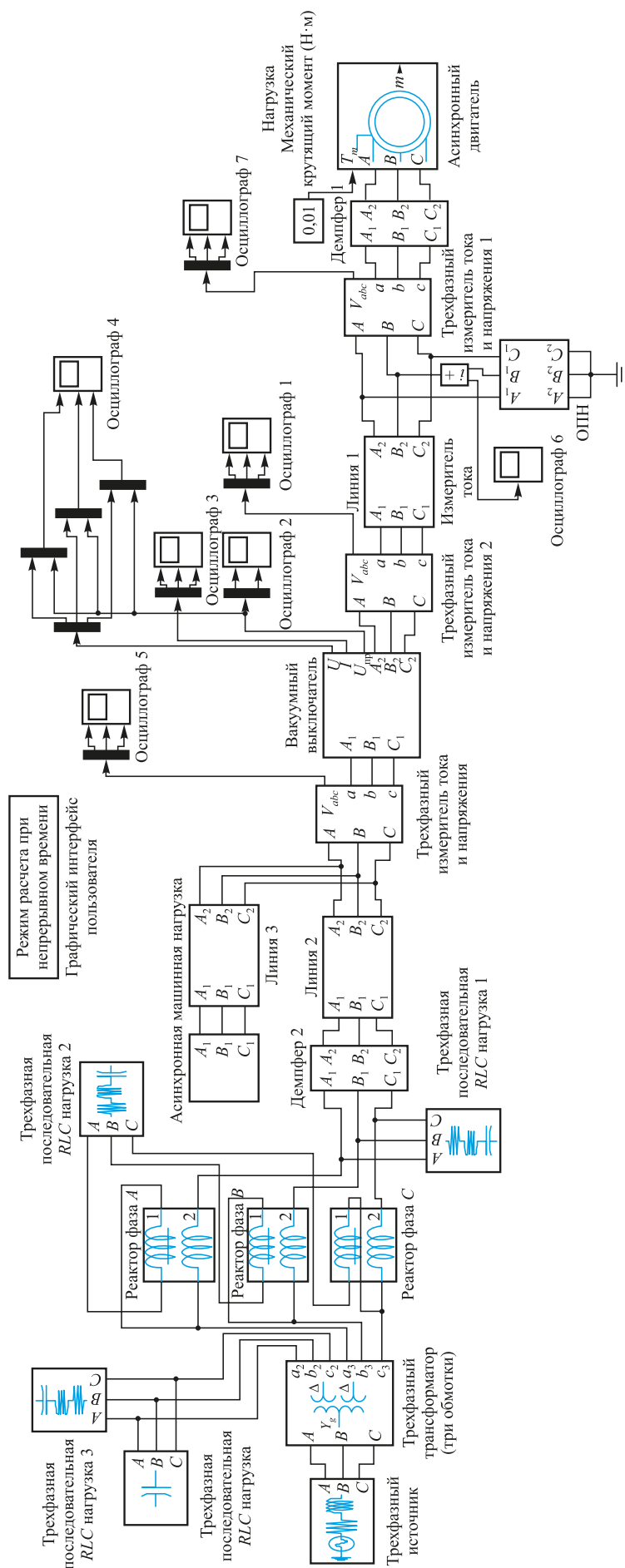


Рис. 1. Общий вид модели

Fig. 1. General view of the model

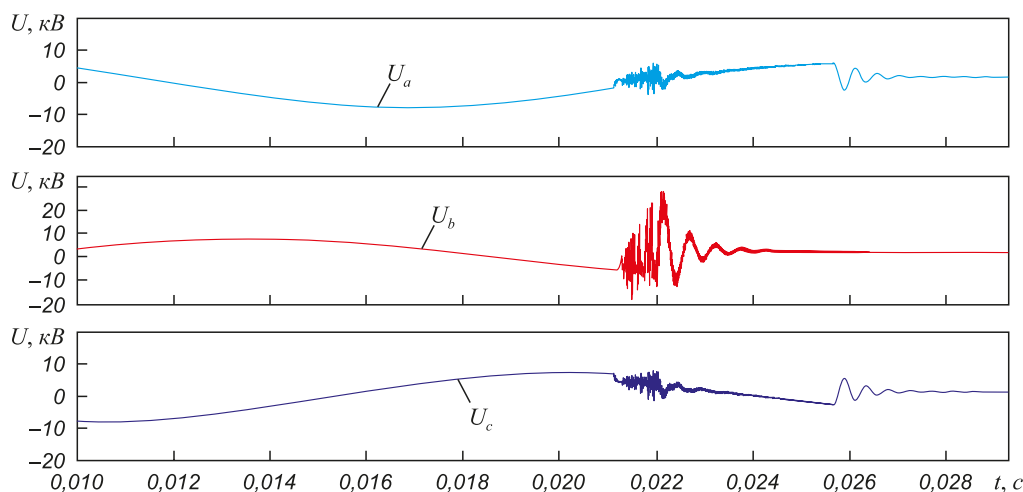


Рис. 2. Осциллограммы напряжений в точке подключения, расположенной после выключателя, полученные на модели

Fig. 2. Oscillograms of voltages in the connection point located after the circuit breaker, received by the model

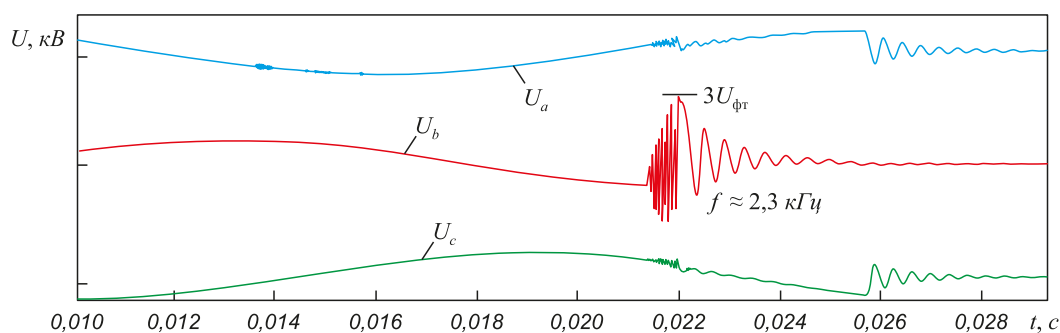


Рис. 3. Экспериментальные осциллограммы напряжений в точке подключения, расположенной после выключателя

Fig. 3. Experimental oscillograms of voltages in the connection point located after the circuit breaker

лены оптимальные характеристики защитной схемы, предложенной в работе [20].

Использование полученных результатов позволяет повысить надежность электроснабжения металлургических предприятий посредством снижения негативного действия коммутационных перенапряжений.

Выводы. При отключении электродвигательных присоединений вакуумными выключателями возникают значительные перенапряжения, связанные с механизмом гашения дуги. Как показывают экспериментальные данные и результаты моделирования, такие перенапряжения могут достигать трехкратного значения фазного напряжения, даже с использованием ОПН.

Моделирование доказывает, что типовые средства защиты малоэффективны от перенапряжений, имеющих высокочастотный характер, что связано с резким подъемом их вольт-секундных характеристик.

Из полученных данных видно, что в пределах остающегося напряжения защитного аппарата возникают перенапряжения, имеющие крутой фронт импульса, что может быть опасно для межвитковой изоляции электродвигателей.

В качестве защиты от высокочастотных перенапряжений предлагается использовать RC-цепочки, определяя их оптимальные параметры и схемы соединения с помощью предложенной авторами модели, что позволит уменьшить негативное воздействие коммутационных перенапряжений на системы электроснабжения металлургических производств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Российская Федерация. Правительство. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» [Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 328] // Собрание законодательства РФ. 05.05.2014. № 18 (часть IV). Ст. 2173.
2. Леушина Л.И., Кошелев О.С., Леушин И.О. Повышение энергоэффективности стального литья по выплавляемым моделям // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 5. С. 3 – 6.
3. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Самовера. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 456 с.
4. Шпиганович А.Н., Захаров К.Д. Внутриводское электроснабжение и режимы: Учебник. – Липецк: ЛГТУ, 2007. – 742 с.
5. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А. Безотказность систем. – Липецк: ЛГТУ, 2016. – 344 с.

6. Российская Федерация. Правительство. Об утверждении энергетической стратегии России на период до 2030 года [Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 № 1715-р] // Собрание законодательства РФ. 30.11.2009. № 48. Ст. 5836.
7. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина, Л.Е. Федорова, М.Г. Зименкова, А.Г. Смирнова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
8. Шпиганович А.Н., Гамазин С.И., Калинин В.Ф. Электроснабжение: Учеб. пособие. – Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, – Липецк: ЛГТУ, 2005. – 90 с.
9. Зацепин Е.П. Несимметричные режимы систем электроснабжения электросталеплавильных производств // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2012. № 1. С. 18 – 22.
10. Зацепина В.И., Зацепин Е.П., Шпиганович А.А. Минимизация провалов напряжения при совместной работе группы дуговых сталеплавильных печей // Промышленная энергетика. 2009. № 1. С. 22 – 24.
11. Зацепина В.И., Зацепин Е.П. Статистический анализ искажений напряжения в системах передачи, распределения и потребления электрической энергии // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2011. № 3. С. 24 – 28.
12. Zatspin E.P., Galkin A.V. Electromagnetic-field distribution in a refined-slag layer in ladle-furnace units // Steel in Translation. 2015. No. 7. P. 473 – 477.
13. Федоров О.В., Немцев А.Г. Влияние электротехнических комплексов с несинусоидальной характеристикой на систему электроснабжения // Вестник Чувашского университета. 2012. № 3. С. 166 – 174.
14. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения: Справочник: Учеб. пособие. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. – 480 с.
15. Правила устройства электроустановок: утверждено Министерством энергетики РФ 08.07.02: ввод в действие с 01.01.03. – 7-е изд. – СПб.: ДЕАН, 2008. – 703 с.
16. Маньков В.Д. Основы проектирования систем электроснабжения: Справочное пособие. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТЦ «Электросервис», 2010. – 664 с.
17. Евдокунин Г.А., Тилер Г. Вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики). – СПб.: Изд-во Сизова М.П., 2002. – 148 с.
18. Качесов В.Е., Шевченко С.С., Борисов С.А. Перенапряжения при коммутации вакуумными выключателями двигательной нагрузки и их мониторинг // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 – 35 кВ: Тр. III Всероссийской науч.-технич. конф. – Новосибирск, 2004. С. 90 – 96.
19. Иванов А.В., Дегтярев И.Л. Теоретическое и экспериментальное исследование электрофизических процессов и характеристик вакуумной дугогасительной камеры при коммутации электродвигателей // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2007. № 1. Режим доступа: http://ogbus.ru/authors/IvanovAV/IvanovAV_1.pdf.
20. Захаров К.Д., Пушница К.А. Комбинированный трехфазный резистивно-емкостной ограничитель перенапряжений // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2009. № 3. С. 29 – 33.

Поступила 20 сентября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 9, pp. 726–731.

SIMULATION OF SWITCHING OVERVOLTAGES IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF METALLURGICAL PLANTS

A.A. Shpiganovich¹, O.V. Fedorov², K.A. Pushnitsa¹, E.V. Churkina¹

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alexeev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article describes the development carried out within framework of the state program, which provides development of industrial enterprises, including enterprises of metallurgical cycle. Such enterprises are complex plants and associations of various scales whose production has important strategic significance. For reliable functioning of metallurgical enterprises, the adequate power supply system with high energy efficiency and minimum possible power consumption is required. Most receivers of metallurgical production belong to the first category of reliability of electricity supply that makes high demands on their power systems. The power supply systems of metallurgical companies are considered. It is shown that the power supply system may be affected by various negative factors, including the switching overvoltages. Such overvoltages can have high frequency character and occur when triggered vacuum switches. Their appearance is caused by the arc interruption mechanism in vacuum (arc reignition, current chopping, voltage escalation). Overvoltages reduce level of reliability of power supply systems that can lead to long outage of responsible consumers. Most vulnerable to overvoltages elements of power supply systems are electric motors whose isolation has the smallest margin of electric strength. Typical means of protection (spark-gapped arresters, metal-oxide surge arresters, spark gaps) are ineffective for limiting the overvoltages with high frequency character. To limit overvoltages of this kind protective RC circuits are increasingly used. However, their application must be accompanied by fairly accurate simulation, because the wrong choice of their parameters can lead to deterioration of switching process.

All this causes importance of the problem of choosing the optimal parameters of protective RC circuits and their connection schemes. The typical power supply scheme was identified and simulation of the switching overvoltages arising in the similar scheme was carried out. MathLab package was applied to build the model of a fragment of the power supply system. During creation of the model there were used already known provisions and provisions for the first time offered by the authors that provide the larger accuracy to the model. The received results are presented in the form of oscillograms and comparison of experimental and calculated data was performed. The relative error of the results was less than 5 %. The recommendations for the construction of rational power supply systems of metallurgical companies allowing to reduce negative disturbances, acting on the such systems are given.

Keywords: metallurgical companies, power supply system, simulation, switching overvoltages, asynchronous motor, vacuum breaker, RC circuits.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-9-726-731

REFERENCES

1. On approval of the state program of the Russian Federation “Development of industry and increasing its competitiveness”, Russian Federation Government Resolution of 15 April 2014, no. 328. *Sobranie zakonodatel'stva RF*. 2014, no. 18, Part. IV, art. 2173. (In Russ.).
2. Leushina L.I., Koshelev O.S., Leushin I.O. Increase in power efficiency of steel investment casting. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2015, no. 5, pp. 3–6. (In Russ.).
3. *Spravochnik po proektirovaniyu elektrosnabzheniya* [Handbook to the design of power supply]. Krupovich V.I., Barybin Yu.G., Samover M.L. eds. Moscow: Energiya, 1980, 456 p. (In Russ.).

4. Shpiganovich A.N., Zakharov K.D. *Vnutrizavodskoe elektro-snabzhenie i rezhimy: uchebnik* [Internal power supply and modes: Textbook]. Lipetsk: LGTU, 2007, 742 p. (In Russ.).
5. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A. *Bezotkaznost' sistem: monografiya* [Reliability of systems: Monograph]. Lipetsk: LGTU, 2016, 344 p. (In Russ.).
6. On approval of the energy strategy of Russia for the period till 2030, Russian Federation Government Decree of 13.11.2009 no. 1715-r. *Sobranie zakonodatel'stva RF*. 2009, no. 48, art. 5836. (In Russ.).
7. *Spravochnik po proektirovaniyu elektrosnabzheniya* [Handbook to the design of power supply]. Barybin Yu.G., Fedorov L.E., Zimenkov M.G., Smirnov A.G. eds. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 576 p. (In Russ.).
8. Shpiganovich A.N., Gamazin S.I., Kalinin V.F. *Elektrosnabzhenie: ucheb. posobie* [Power supply: Textbook]. Elets: EGU im. I.A. Bunina, Lipetsk: LGTU, 2005, 90 p. (In Russ.).
9. Zatsepin E.P. Asymmetric modes of power supply systems of electric steel manufactures. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2012, no. 1, pp. 18–22. (In Russ.).
10. Zatsepin V.I., Zatsepin E.P., Shpiganovich A.A. Minimization of voltage dips at joint work of the group of electric arc furnaces. *Pro-myshlennaya energetika*. 2009, no. 1, pp. 22–24. (In Russ.).
11. Zatsepin V.I., Zatsepin E.P. Statistical analysis of voltage distortion in power transmission, distribution and consumption systems. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2011, no. 3, pp. 24–28. (In Russ.).
12. Zatsepin E.P., Galkin A.V. Electromagnetic-field distribution in a refined-slag layer in ladle–furnace units. *Steel in Translation*. 2015, no. 7, pp. 473–477. (In Russ.).
13. Fedorov O.V., Nemtsev A.G. Influence of electrotechnical complexes with non-sinusoidal characteristic on power supply system. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*. 2012, no. 3, pp. 166–174. (In Russ.).
14. Opoleva G.N. *Skhemy i podstantsii elektrosnabzheniya: Spravochnik: ucheb. posobie* [Schemes and substations of power supply: Handbook: Manual]. Moscow: FORUM: INFRA-M, 2006, 480 p. (In Russ.).
15. *Pravila ustroystva elektroustanovok: utv. M–vom energetiki Ros. Federatsii 08.07.02: vvod v deystvie s 01.01.03* [Regulations for electrical installations]. 7nd ed. St. Petersburg: DEAN, 2008, 703 p. (In Russ.).
16. Man'kov V.D. *Osnovy proektirovaniya sistem elektrosnabzheniya: spravocnoe posobie* [Bases of design of power supply systems: Reference book]. St. Petersburg: NOU DPO “UMITTs “Elektroser-vis”, 2010, 664 p. (In Russ.).
17. Evdokunin G.A., Tiler G. *Vakuumnaya kommutatsionnaya tekhnika dlya setei srednego napryazheniya (tekhnicheskie preimushchestva i ekspluatatsionnye kharakteristiki)* [Modern vacuum switching equipment for medium voltage networks (technical advantages and operational characteristics)]. St. Petersburg: Izdatel'stvo Sizova M.P., 2002, 148 p. (In Russ.).
18. Kachesov V.E., Shevchenko S.S., Borisov S.A. Overvoltages at switching by vacuum circuit breaker of motor load and their monitoring. In: *Ogranichenie perenapryazhenii i rezhimy zazemleniya neutrali setei 6–35 kV: Trudy III Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Overvoltages limitation and neutral grounding modes networks 6–35 kV: Proceedings of the 3rd All-Russian Scientific and Technical Conference]. Novosibirsk, 2004, pp. 90–96. (In Russ.).
19. Ivanov A.V., Degtyarev I.L. Theoretical and experimental study of the electrical characteristics and processes of vacuum interrupter during motors switching. *Neftegazovoe delo*. 2007, no. 1. Electronic resource. Available at URL: http://ogbus.ru/authors/IvanovAV/IvanovAV_1.pdf (In Russ.).
20. Zakharov K.D., Pushnitsa K.A. Combined three-phase resistive-capacitive overvoltages limiter. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya. Nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvennyi zhurnal*. 2009, no. 3, pp. 29–33. (In Russ.).

Information about the authors:

A.A. Shpiganovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Electrical Equipment (kaf-ee@stu.lipetsk.ru)

O.V. Fedorov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of the Innovation Activity Management (fov52@nm.ru)

K.A. Pushnitsa, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Electrical Equipment (kostpa@mail.ru)

E.V. Churkina, Senior Lecturer of the Chair of Electrical Equipment (ekas2534@yandex.ru)

Received September 20, 2016