

ВЛИЯНИЕ ФОРСИРОВКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН НА УРОВЕНЬ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ НАРУШЕНИЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А.И. ФЕДОТОВ, К.Р. БАХТЕЕВ

Казанский государственный энергетический университет

В статье рассмотрено влияние форсировки возбуждения синхронных генераторов (СГ) и синхронных двигателей (СД) на уровень остаточного напряжения у промышленных потребителей при коротких замыканиях в сетях внешнего электроснабжения. Оценивается эффективность использования СГ и СД с повышенной кратностью форсировки.

Ключевые слова: математическое моделирование, электрические сети, синхронный двигатель, синхронный генератор, остаточное напряжение, качество электроэнергии, провал напряжения (ПН), короткое замыкание (КЗ).

Кратковременные нарушения электроснабжения (КНЭ) промышленных предприятий с непрерывными технологическими циклами производства, сопровождающиеся провалами напряжения, приводят к значительному финансовому ущербу у них. Высокая чувствительность технологий к качеству электроэнергии даже на временных интервалах длительностью десятки доли секунды делает актуальной проблему снижения воздействия возмущающих факторов. Как правило, ПН в системах внутреннего электроснабжения промышленных потребителей возникают из-за КЗ на воздушных линиях в питающих сетях напряжением 110 кВ и выше. Из-за электрических связей между шинами распределительных устройств системообразующих подстанций (СОП) снижение напряжения при КЗ распространяется на каждую секцию соответствующей промышленной главной понизительной подстанции (ГПП), что делает неэффективной работу АВР 6 – 10 кВ [1].

Одним из способов электрического удаления секций шин СОП является установка в цепях их междушинных (секционных) выключателей высоковольтных токоограничивающих устройств [2–5]. Такое техническое решение уже находит свое практическое воплощение. Но необходимо отметить, что оно является вынужденным и приводит к большим финансовым издержкам. При этом не всегда возможна установка токоограничивающих устройств, например, в распределительных устройствах электростанций. Поэтому ниже рассматривается другой вариант повышения уровня остаточного напряжения, а именно за счет использования форсировки возбуждения синхронных машин (генераторов и двигателей), если они установлены в системе внутреннего электроснабжения предприятия. Понимая, что этот способ не может в большинстве случаев полностью снять проблему воздействия КНЭ на качество электроэнергии, считаем необходимым отметить, что он, во-первых, не требует практически никаких дополнительных затрат, и во-вторых, в любом случае уменьшает граничную длину электропередачи [2], т.е. ту зону, в пределах которой все КЗ приводят к снижению напряжения на ГПП ниже технологически допустимого.

В статье рассмотрено влияние удаленности трехфазного КЗ на воздушной линии электропередачи 110 кВ (рис. 1) на уровень остаточного напряжения в системе внутреннего электроснабжения промышленного потребителя, где подключены синхронные машины, способные повысить его величину. В качестве таковых рассматриваются как синхронные генераторы, так и синхронные двигатели. Если

©А.И. Федотов., К.Р. Бахтеев

Проблемы энергетики, 2016, № 7-8

последние весьма распространены на предприятиях нефтехимической отрасли, то СГ встречаются редко. Между тем экономические реалии показывают, что эксплуатация собственных электростанций (ограниченной мощности) в составе электрической сети предприятия обеспечивает меньшую себестоимость электроэнергии в сравнении с её приобретением от внешних поставщиков. Дополнительным привлекающим фактором может выступать использование внутренних энергетических ресурсов для создания утилизационных установок для производства электроэнергии, где не требуется покупной энергоноситель.

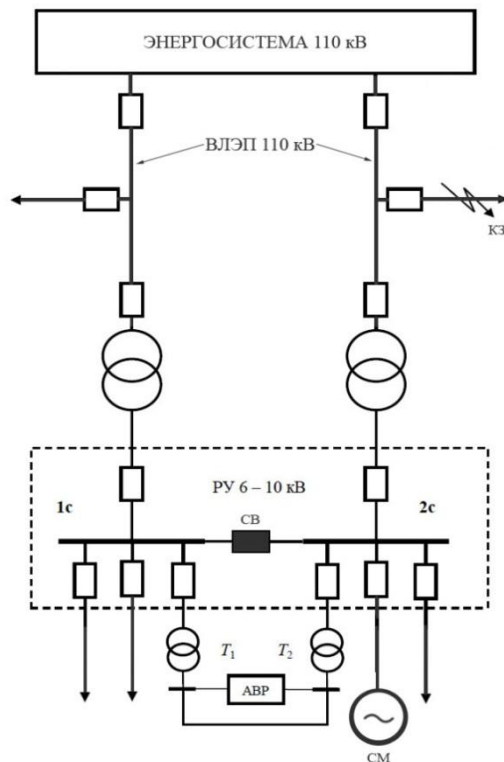


Рис. 1. Принципиальная схема электроснабжения промышленного потребителя

В связи с этим далее выполняется оценка кратковременного воздействия на уровень остаточного напряжения СГ и СД, при этом предполагается, что эти синхронные машины могут иметь повышенную кратность форсировки возбуждения. Стандартное требование к возбудителям синхронных машин – обеспечение двойной кратности форсировки возбуждения, но выпускаются синхронные генераторы, где кратность форсировки достигает 3–4 [6]. Таким образом, отсутствуют принципиальные ограничения на применение в системах электроснабжения таких машин, если только подтверждена их эффективность по воздействию на уровень остаточного напряжения на шинах низшего напряжения главных понизительных подстанций предприятий при КЗ во внешних питающих электрических сетях.

В качестве инструмента для исследования был использован метод математического моделирования в программной среде *MATLAB Simulink*, в состав которой входит библиотека силовых элементов *SimPowerSystems* [7, 8]. С помощью блоков данной библиотеки смоделирована схема типового узла системы электроснабжения промышленного потребителя (рис. 2), с помощью которой

исследовалось влияние форсировки возбуждения синхронных генераторов и двигателей на глубину провалов напряжения, вызываемых ТКЗ в сети 110 кВ.

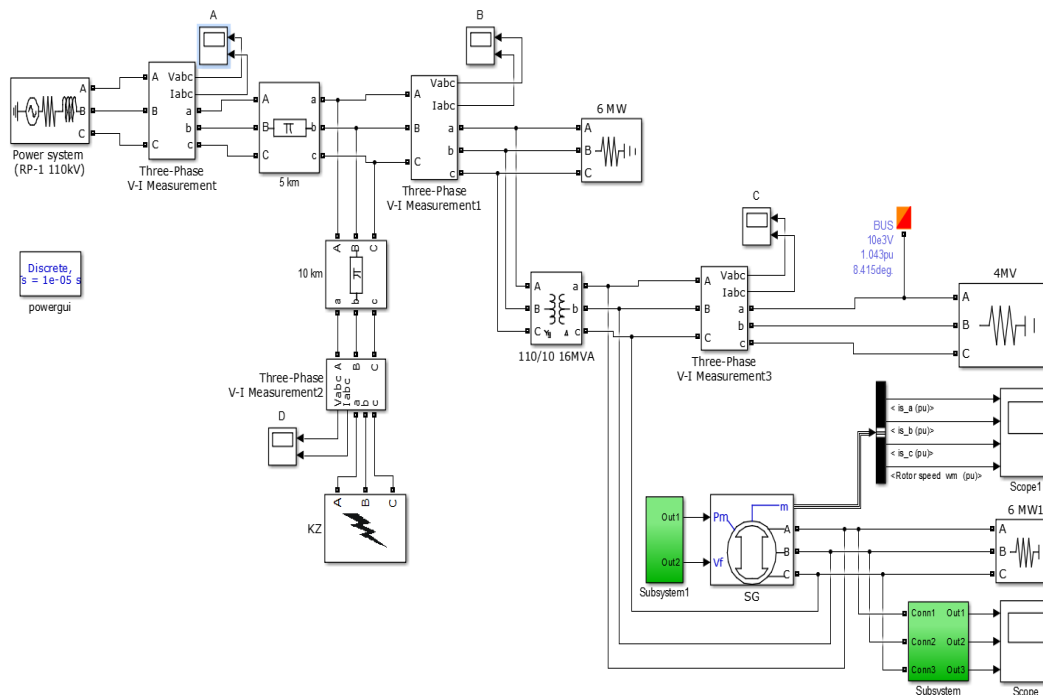


Рис. 2. Имитационная схема типового узла системы электроснабжения промышленного потребителя

В соответствии с рис. 1 на имитационной схеме рис. 2 отражены шины распределительной подстанции 110 кВ (РП- 110 кВ), трансформаторы и шины главной понизительной подстанции (ГПП) 110/10 кВ, от которой запитан промышленный потребитель. Схема замещения показана на рис 3.

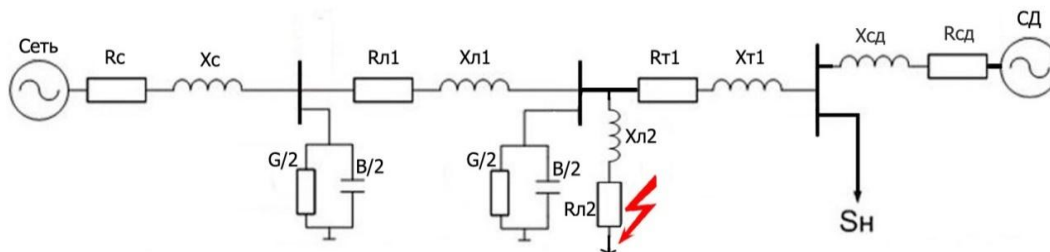


Рис. 3. Схема замещения моделируемой электрической сети

Параметры схемы замещения приняты следующие. Сеть имеет внутренне сопротивление 0,08 Ом, длина линии Л1 = 5 км, расстояние до места КЗ изменялось в пределах от 1 до 30 км, что охватывает систему электроснабжения города и окрестностей. Погонные активные и индуктивные сопротивления линий 1 и 2 (рис. 1): $R_0=0,247$ Ом/км, $X_0=0,44$ Ом/км. Поперечные проводимости линий, одинаково обозначенные на рис. 3 как B/2 и G/2 для линий, обнулялись при задании параметров линий на соответствующих элементах, рис. 1. Параметры синхронного двигателя: $X_d=1,41$ о.е., $X_q=0,47$ о.е., $X_d'=0,21$ о.е., $X_d''=0,101$ о.е. (на рис. 3 условно представлены индуктивным сопротивлением X_{cd}), сопротивление статора СД $R_{cd}=0,005$ о.е.

Мощность двигателя изменялась от 8 до 16 МВт, мощность генератора так же. Мощность нагрузки (рис. 3), $S_H=16$ МВт. Параметры трансформатора Т1: $S_{ном}=16$ МВА, параметры первичной обмотки $U_1=110$ кВ, индуктивность рассеивания $L_1=0,08$ о.е., параметры вторичной обмотки: $U_2=10$ кВ, $L_2=0,08$ о.е.

При наличии двух независимых (или электрически удаленных) источников питания в случае КНЭ восстановление напряжения на секции 6 кВ ГПП происходит за счет действия устройств защиты от потери питания (ЗПП) [7]. Они обеспечивают запуск быстродействующего АВР (отключается выключатель ввода и включается секционный выключатель), время срабатывания составляет 0,1–0,2 с. При электрической короткой связи между источниками питания на момент КНЭ они уже не могут считаться взаимно независимыми. В этом случае можно использовать потенциал внутренней системы электроснабжения в части повышения уровня остаточного напряжения. Для его реализации достаточно использовать то же устройство ЗПП, но с некоторым изменением функций команд управления: необходимо отключить вводной выключатель, но заблокировать действие АВР, и выполнить пуск форсировки возбуждения на СГ или СД.

Как видно из осциллограммы рис. 4, ток КЗ удаленностью $l=10$ км на линии 2, представленной на рис. 3, величиной 10 кА в момент времени $t=0,1$ с, вызывает ПН у промышленного потребителя по всем фазам. Уровень остаточного напряжения при данных условиях составил 45 % от номинального.

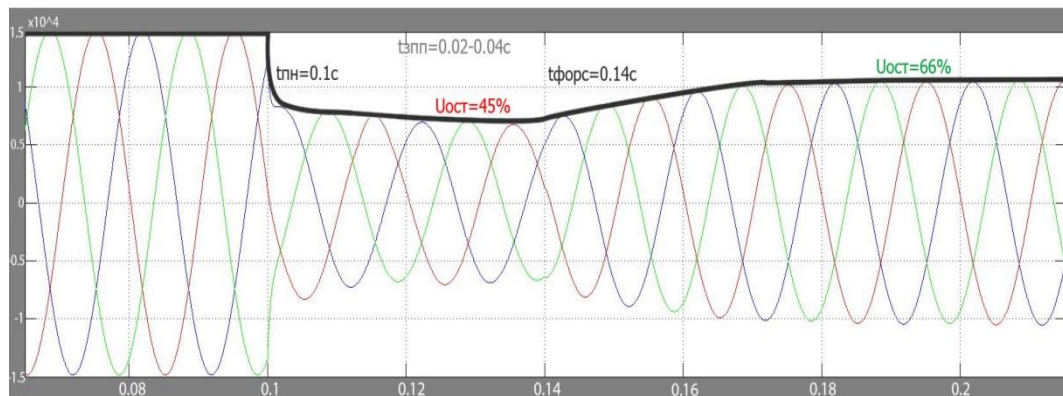


Рис. 4. Осциллограмма фазных напряжений на шинах промышленного предприятия

При включении четырехкратной форсировки возбуждения СД мощностью 8 МВт за два периода удастся выйти на уровень остаточного напряжения 66% от номинального (рис. 4), при том что СД работает с коэффициентом распределения нагрузки ($K_{рн}$) равным 2. Данный коэффициент учитывает распределение нагрузки на СМ и определяется как отношение нагрузки на выводах СМ к ее номинальной мощности.

Для выявления закономерностей влияния кратности форсировки возбуждения синхронных машин на уровень остаточного напряжения была проведена серия экспериментов с разными значениями мощности СМ и длины ВЛ, на которой происходит КЗ. Результаты моделирования показаны на рис. 5.

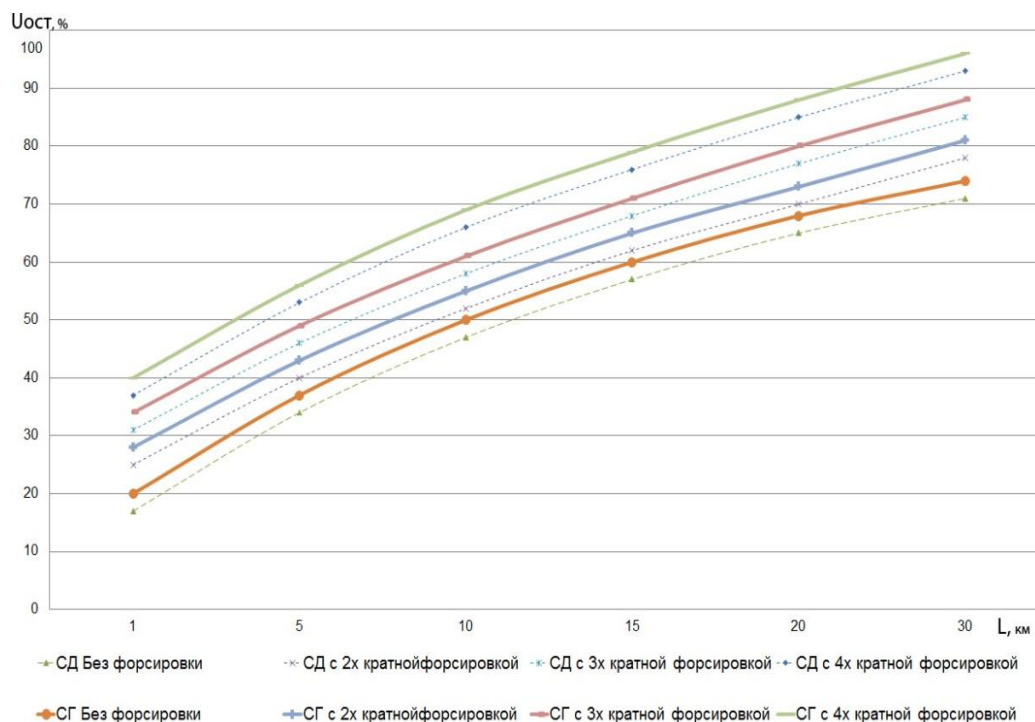


Рис. 5. Изменение уровня остаточного напряжения при установленной номинальной мощности СМ 8 МВт

Сравнение графиков для СД и СГ показывает, что при одинаковых исходных условиях на уровне заданного минимально допустимого остаточного напряжения 80% от номинального (взято в качестве примера, в зависимости от загрузки двигателей может быть как больше, так и меньше) граничная длина электропередачи для СГ меньше, чем для СД, на несколько километров. Если сравнивать эффективность кратности форсировки возбуждения, то четырехкратная форсировка обеспечивает двукратное снижение граничной длины электропередачи.

На крупных нефтехимических и металлургических промышленных предприятиях наиболее распространенным потребителем электроэнергии являются мощные СД, питающиеся от общей секции шин. В этом случае их суммарное воздействие на уровень остаточного напряжения при использовании групповой форсировки возбуждения будет эквивалентно воздействию одного мощного двигателя.

Эксперимент, результаты которого представлены на рис. 6, показывает, что при установке собственной генерации суммарной мощностью 16 МВт, состоящей из СГ, при неизменной нагрузке, $K_{PH}=1$, удастся выйти на минимально допустимое напряжение 80% от номинального за счет четырехкратной форсировки возбуждения при снижении граничной длины электропередачи до 4 км. Для СД такой же мощности граничная длина электропередачи примерно на 10% больше.

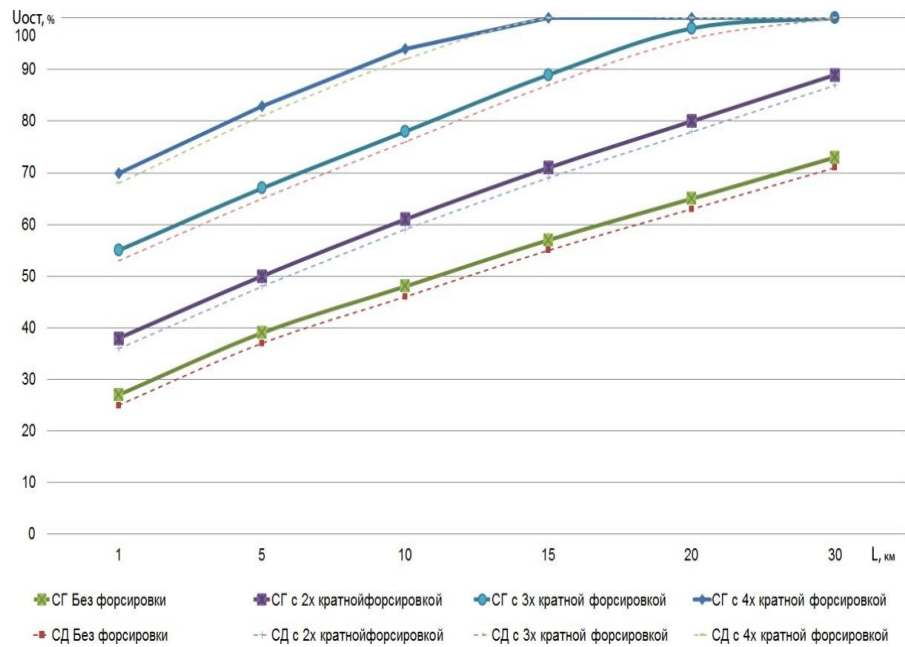


Рис. 6. Выявление граничной длины линии при установленной номинальной мощности СМ 16 МВт

Следующий эксперимент, представленный на рис. 7, показывает зависимость степени снижения остаточного напряжения от $K_{рн}$ при установке СГ мощностью 16 МВт. Как видно по полученным графикам, эта зависимость выражена весьма слабо и может не приниматься во внимание при выполнении оценочных расчетов по эффективности форсировки возбуждения.

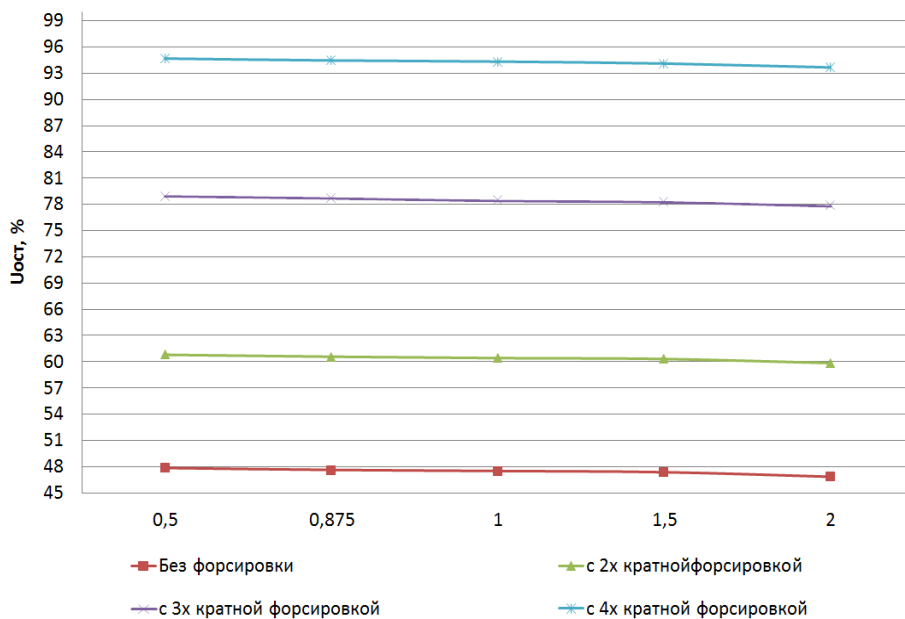


Рис. 7. Зависимость остаточного напряжения от $K_{рн}$ при установке СГ мощностью 16 МВт

Результаты имитационного моделирования позволяют сделать следующие выводы.

1. Форсировка возбуждения синхронных машин, установленных в системе внутреннего электроснабжения промышленных предприятий, позволяет повышать уровень остаточного напряжения при КНЭ без дополнительных инвестиций.

2. Повышенная кратность форсировки возбуждения способствует снижению граничной длины электропередачи, что уменьшает ущерб от аварийных остановов технологических процессов на предприятиях с непрерывным циклом производства.

3. При выборе высоковольтных устройств токоограничения, предназначенных для повышения уровня остаточного напряжения на ГПП при КЗ в питающих сетях, следует учитывать возможности синхронных машин предприятий в части форсировки возбуждения.

Статья подготовлена в процессе выполнения НИР «Методы повышения надежности электроснабжения и качества электроэнергии в распределительных электрических сетях», задание № 2014/448 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России.

Summary

The article considers the influence of opportunities forcing synchronous generator (SG) and a synchronous motor (SM) to provide the required level of the residual voltage at the consumer at short circuits in networks of high voltage. It determines the ability of the equipment to remain in the work during such perturbation by mathematical modeling.

Keywords: mathematical modeling, electrical network, synchronous motor, synchronous generator, residual voltage, power quality, voltage dip, short circuit

Литература

1. Беляев А.В. Противоаварийная автоматика в узлах нагрузки с синхронными электродвигателями большой мощности. Часть 2 / Приложение к журналу «Энергетик». Москва, 2005, 89 стр.
2. Абдуллазянов Э.Ю., Леонов А.В. Оценка воздействия на потребителей провалов напряжения с учетом переходных процессов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. №5–6.С. 65–70.
3. Абдуллазянов Э.Ю., Забелкин Б.А., Федотов А.И. Электроснабжение предприятий с непрерывным технологическим циклом производства / Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». Томск, 2008.С. 123–125.
4. GorV., PovhD., YichuanL., LerchE., RetzmannD., SadekK., ThummG.. SCCL-A new type of FACTS based short-circuit current limiter for application in high voltage systems. CIGREsession 2004, paperB4-209.
5. ЧэпмэнД. Провалы напряжения: введение. URL: http://www.mega-watt.ru/info/normativ_doc/publikatsii_statii/provali_napriazenia.pdf.
6. Рожкова Л.Д., Карнеева Л.К., Чиркова Т.В. Электрооборудование электрических станций и подстанций. М.: Издательский центр «Академия», 2012. 448 с.
7. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. 1-е издание, 2007. 288 стр., формат 17х24 см, мягкая обложка, ISBN 978-5-388-00020-0.Л.Я.
8. Теличко, П.М. Басов. Применение математического моделирования для исследования провалов напряжения, возникающих при коротких замыканиях в распределительных сетях высокого напряжения// Электротехнические комплексы и системы управления. 2010. № 4.С. 12–17.

Поступила в редакцию

11 июля 2016 г.

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).
E-mail: fed.ai@mail.ru.

Бахтеев Камилъ Равилевич – аспирант кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: kam1609@mail.ru.