

УДК 621.316.761.2/ 621.311.449

## ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБКИХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВАНИИ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Ромодин А.В., Лейзгольд Д.Ю.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,  
Пермь, e-mail: pub@msa.pstu.ac.ru

В статье рассматриваются вопросы разработки моделей элементов гибких линий электропередачи (ГЛЭП) переменного тока с целью использования при расчете электроэнергетических режимов активно-адаптивных сетей электроснабжения. Авторами предложен подход к моделированию устройств ГЛЭП на базе их вольтамперных характеристик, что позволяет сократить время разработки модели сложного электротехнического устройства без снижения точности определения влияния устройств ГЛЭП на параметры режима (токи и напряжения). Предлагаемый подход использован на примере разработки следующих устройств: управляемый шунтирующий реактор, статический тиристорный компенсатор и статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ). Результаты апробации данных моделей показали, что модели адекватны и могут быть использованы при моделировании режимов работы электроэнергетической системы на базе активно-адаптивной сети электроснабжения.

**Ключевые слова:** гибкие линии электропередачи, управляемый шунтирующий реактор (УШР), статический тиристорный компенсатор (СТК), СТАТКОМ

## APPROACH TO THE FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS ELEMENTS MODELING BASED ON CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC

Romodina A.V., Leyzgold D.Y.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: pub@msa.pstu.ac.ru

The article deals with the development of flexible AC transmission system (FACTS) models for determination of smart power grid state. Authors propose an approach to modeling FACTS devices based on their current-voltage characteristics reducing development time of the complex electrical device model without fall-off in accuracy of impact determining of FACTS devices on stase parameters (current and voltage). The proposed approach has been tested on the example of the model development of the following devices: the controlled shunt reactor, static VAR compensator and STATCOM. The results of testing these models show that the model is adequate and can be used in the simulation of smart power grid state.

**Keywords:** flexible transmission line, controlled shunt reactors (CSR), static var compensator (SVC), STATCOM

Развитие электроэнергетики в передовых странах сопровождается интенсивным поиском новых технологий для решения проблемы дальнейшего повышения эффективности энергосистем в целях оптимального распределения потоков мощности между линиями. Возможны режимы, когда требуется принудительное распределение мощности между отдельными линиями. Кроме того, управление потоками активной и реактивной мощности, согласно [4, 7, 8], является эффективным средством снижения потерь в распределительных и питающих электрических сетях. Одним из способов практически безынерционного управления потокораспределением активной и реактивной мощности является использование гибких (управляемых) линий электропередачи (ГЛЭП) [6, 9] переменного тока в рамках концепции *Smart-Grid* и развития активно-адаптивной сети электроснабжения. При этом актуальной задачей становится исследование режимов работы электроэнергетических систем, включающих гибкие связи, а следовательно, и разработку моделей устройств ГЛЭП.

Ввиду того, что устройства ГЛЭП являются сложными электротехническими комплексами оборудования, построение точных моделей данных устройств имеет ряд проблем, включающих низкую скорость расчета модели и, как следствие, невозможность расчета их в реальном времени, в связи с чем не менее актуальной задачей является разработка наиболее простых моделей [3] ГЛЭП, но с высокой точностью отражающих влияние на электроэнергетическую систему.

Для достижения поставленной цели были разработаны модели электротехнических устройств ГЛЭП на основе блока управляемого источника тока [2]. С целью повышения скорости расчета моделей было предложено учитывать их влияние на электроэнергетическую систему согласно вольтамперным характеристикам.

В качестве основных устройств ГЛЭП рассматривались следующие статические устройства: управляемый шунтирующий реактор (УШР), статический тиристорный компенсатор (СТК) и статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ).

### Управляемый шунтирующий реактор

Управляемый шунтирующий реактор (УШР) с параллельно установленной батареей статических конденсаторов (БСК) показал свою эффективность при управлении режимами по напряжению и реактивной мощности [11], что позволяет обеспечить плавно регулируемую компенсацию реактивной мощности.

Модели устройств ГЛЭП было предложено разрабатывать на базе управляемого источника тока. Схема данной модели (рис. 1) включает в себя блок задания табличных значений (*Lookup\_f*), в которой в относительных единицах описывается вольтамперная характеристика (ВАХ). На выходе из данного блока формируется синусоидальный сигнал тока, отстающий от напряжения на 90 эл. град. Величина и знак амплитуды токового сигнала, подходящего к управляемому источнику тока, зависит от напряжения в точке присоединения и рода тока согласно ВАХ (за положительное направление реактивного тока принято значение индуктивной его составляющей). Предложенный подход к разработке моделей ГЛЭП является универсальным и позволяет достаточно быстро получить модель сложного электротехнического устройства,

опираясь только на его номинальные параметры (ток, напряжение, мощность) и вольтамперную характеристику.

При моделировании УШР была использована его ВАХ, учитывающая систему управления, направленную на поддержание отклонения напряжения в области допустимых значений, согласно номинальной мощности УШР. ВАХ УШР представлена на рис. 2, а.

Апробация модели производилась в среде *SciLab Xcos* согласно схеме подключения управляемого источника трехфазного напряжения  $U_0 = 230$  кВ к нагрузке  $S = 6 + j 18$  МВА по линии сопротивлением  $Z = 0,15 + j 0,2$  Ом. Номинальное напряжение (поддерживаемое на нагрузке) для УШР было принято равным  $U_n = 220$  кВ. Номинальная мощность УШР равна 20 000 квар.

Изменение режима производилось следующим образом:

*Режим 1.* В момент времени моделирования с 0,0 до 0,1 с – проведение моделирования системы электроснабжения с активно-индуктивной нагрузкой  $S = 4 + j 8$ , МВА.

*Режим 2.* В момент времени с 0,1 до 0,2 с – наброс нагрузки на  $S = 2 + j 10$  МВА.

*Режим 3.* В момент времени с 0,2 до 0,3 с – увеличение напряжения сети до  $1,15 \cdot U_0$ .

*Режим 4.* В момент времени с 0,3 до 0,4 с – снижение напряжения сети до  $0,85 \cdot U_0$ .

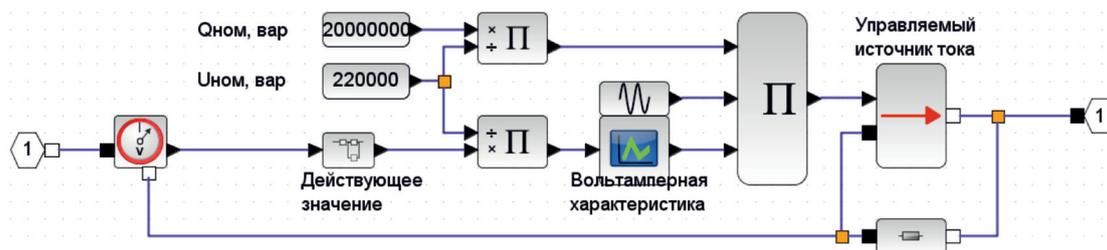


Рис. 1. Модель однофазного исполнения устройств ГЛЭП на базе источника тока в среде *SciLab Xcos*

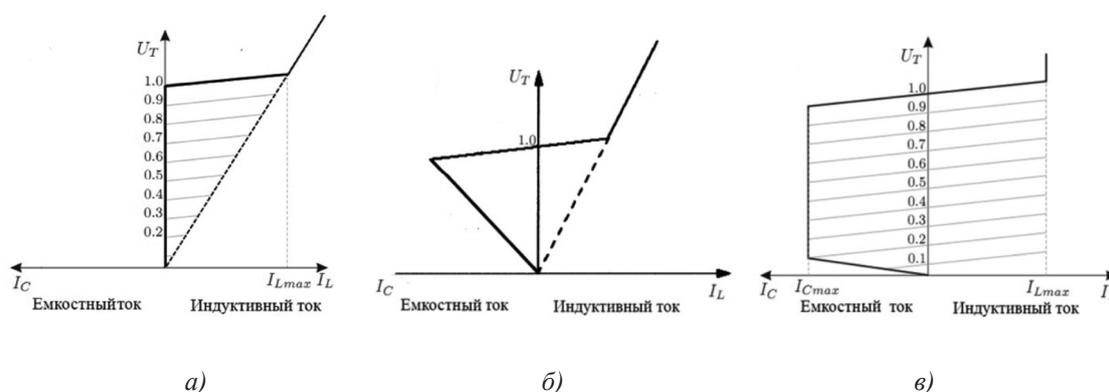


Рис. 2. Вольтамперная характеристика: а) УШР; б) СТК; в) СТАТКОМ

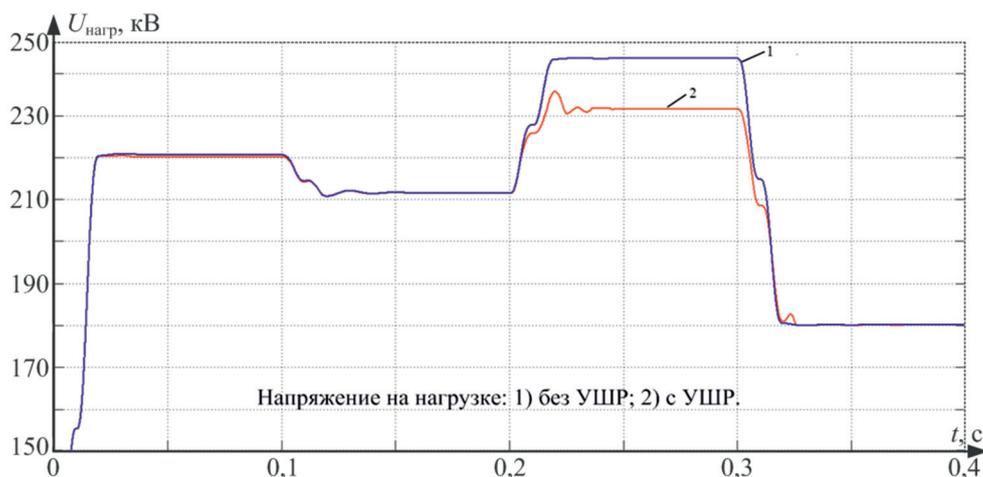


Рис. 3. Результаты моделирования напряжения на нагрузке при апробации УШР, кВ

Таблица 1

Результаты апробации разработанной модели УШР

Номер режима	Напряжение на нагрузке, кВ						
	Без УШР			С УШР			
	Эксперимент на модели	Расчетные	Отклонение, %	Мощность УШР, квар	Эксперимент на модели	Расчетные	Отклонение, %
1	220,65	220,43	0,10	608,96	220	219,9	0,05
2	211,5	210,42	0,51	0	211,5	210,42	0,51
3	243,66	247,41	1,52	20000	231,66	232,36	0,30
4	180,1	172,48	4,42	0	180,1	172,48	4,42
Среднее:			1,64	Среднее:			1,32

Сравнение результатов моделирования напряжения на нагрузке с присоединенным устройством УШР и без него представлены на рис. 3. Видно, что при напряжениях меньше  $U = 220$  кВ, регулирование с помощью УШР не производится, что полностью соответствует ВАХ, а при увеличении напряжения источника питания на 15% в схеме с УШР напряжение на нагрузке значительно ближе к номинальному значению.

Помимо анализа характера изменения напряжения на нагрузке с учетом УШР были сопоставлены с расчетными значениями напряжения на нагрузке в различных режимах работы (табл. 1). При этом относительное отклонение экспериментально измеренных величин на модели электрической сети, включающей разработанную модель УШР, и расчетных значений составило не более 4,42% (при среднем значении для всех режимов не более 1,64%), что свидетельствует об адекватности разработанной модели. При этом большие отклонения наблюдаются при напряжениях, отличных от номинального значения и объясняются тем, что при расчетном определении напряжений на нагрузке не учитывался ее регули-

рующий эффект (мощность при изменении напряжении принималась неизменной).

### Статический тиристорный компенсатор

Применение статических тиристорных компенсаторов (СТК) с целью увеличения пропускной способности линий электропередачи и ограничения временных перенапряжений и снижения потерь в различных режимах работы сети обосновано во многих работах [1]. Наиболее часто предлагаемая авторами модель СТК [10] имеет сложную структуру и несет в себе необходимость расчета многих параметров силовой и преобразовательной части устройства, а также разработку системы управления. Поэтому предложенный подход не теряет актуальности применительно к моделированию данного устройства на базе ВАХ СТК, представленной на рис. 2, б.

Результаты апробации разработанной модели СТК, представленные на рис. 4, показали, что в отличие от УШР в рабочую область по регулированию напряжения входят и его отрицательные отклонения при напряжениях меньше  $U_n = 220$  кВ, однако максимальная выработка реактивной мощности снижается со снижением напряжения.

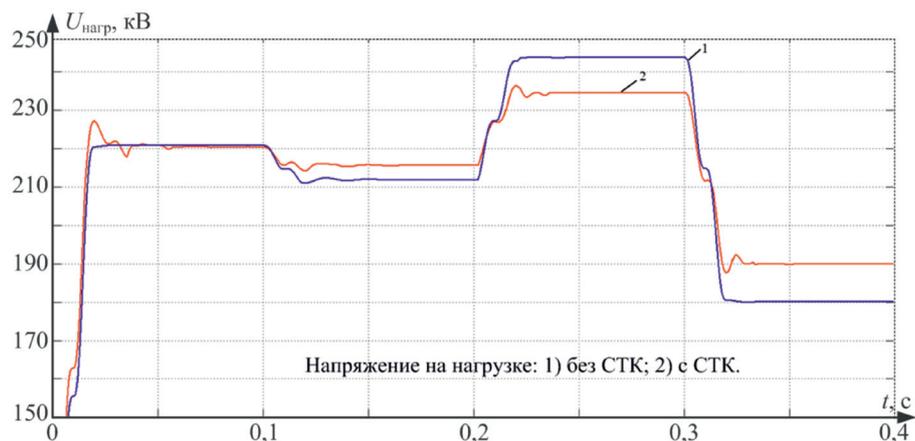


Рис. 4. Результаты моделирования: напряжение на нагрузке при апробации СТК, кВ

Таблица 2

## Результаты апробации разработанной модели СТК

Номер режима	Мощность СТК, квар	Напряжение на нагрузке, кВ		Отклонение, %
		Эксперимент на модели	Расчетные данные	
1	608,96	220	219,9	0,05
2	- 11709,4	220	220,62	0,28
3	20000	231,66	232,36	0,30
4	- 15623	190,5	188,46	1,08
Среднее:				0,43

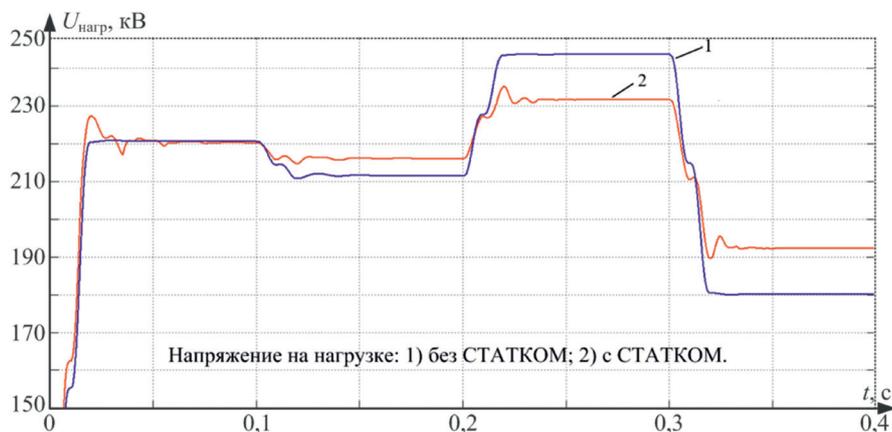


Рис. 5. Результаты моделирования напряжения на нагрузке (апробация СТАТКОМ), кВ

Таблица 3

## Результаты апробации разработанной модели СТАТКОМ

Номер режима	Мощность СТАТКОМ, квар	Напряжение на нагрузке, кВ		Отклонение, %
		Эксперимент на модели	Расчетные данные	
1	608,96	220	219,9	0,05
2	- 11709,4	220	220,62	0,28
3	20000	231,66	232,36	0,30
4	- 20000	192,5	192,94	0,23
Среднее:				0,21

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало (табл. 2), что их отклонение не превышает 1,08% (при среднем значении не более 0,43%), что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

### СТАТКОМ

Применение устройств СТАТКОМ, согласно [5], позволяет в широких пределах регулировать потребляемую/генерируемую реактивную мощность, обеспечивая повышение коэффициента мощности до 0,97, при отсутствии снижения мощности генерации, обусловленного снижением напряжения. Модель устройства СТАТКОМ также разрабатывалась на базе ВАХ, представленной на рис. 2, в.

Результаты моделирования СТАТКОМ (рис. 5) показывают большую эффективность данного устройства при регулировании отклонения напряжения в отрицательную сторону по сравнению с СТК (на участке времени моделирования 0,35–0,4 с). Сравнение результатов моделирования напряжения в узлах с расчетными значениями (табл. 3) показало, что модель также адекватна (максимальное отклонение – не более 0,3%, среднее – не более 0,21%).

### Выводы

1. Предложен подход к разработке моделей устройств ГЛЭП является универсальным и позволяет достаточно быстро получить модель сложного электротехнического устройства, опираясь на его номинальные параметры и ВАХ.

2. Предложенный подход был апробирован в процессе создания моделей УШР, СТК и СТАТКОМ системе *SciLab Xcos*. Результаты моделирования подтвердили адекватность моделей на основании величины отклонения экспериментальных значений от расчетных параметров, составившей в среднем не более 2%.

3. Разработанные модели могут быть использованы при изучении как отдельных устройств ГЛЭП, так и электроэнергетических систем, содержащих ГЛЭП, а также при составлении балансов активной и реактивной мощности в таких сетях и разработке алгоритмов управления в рамках развития концепции *Smart-Grid*.

### Список литературы

1. Анализ режимов работы статического тиристорного компенсатора реактивной мощности дуговой сталеплавильной печи / Г.П. Корнилов и др. // Главный энергетик. – 2011. – № 3. – С. 30–34.

2. Андриевская Н.В., Бочкарев С.В. Моделирование систем: учебное пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 283 с.

3. Кавалеров Б.В., Казанцев В.П. Математическая модель электроэнергетической системы для оптимальной настройки регуляторов газотурбинных мини-электростанций // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2011. – № 2. – С. 21–24.

4. Кузнецов М.И., Ромодин А.В., Костыгов А.М. Экспериментальное исследование управления потоком реактивной мощности в электрической системе с трёхобмоточным трансформатором // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 46–50.

5. Лоскутов А.Б., Алтуни Б.Ю., Карнавский И.А. Модель многоуровневого каскадного инвертора для компенсации реактивной мощности и мощности искажений в сетях с выпрямительной нагрузкой [Электронный ресурс] // Проблемы региональной энергетики. – 2011. – № 2 (16). – С. 32–38. Режим доступа: [http://elibrary.ru/full\\_text.asp?id=16757520](http://elibrary.ru/full_text.asp?id=16757520) (дата обращения: 28.04.2015).

6. Полунатурное моделирование активно-адаптивной электрической сети // Петроченков А.Б., Франк Т., Ромодин А.В. и др. Электротехника. – 2013. – № 11. – С. 60–63.

7. Ромодин А.В., Кузнецов М.И. Преобразование реактивной мощности в трёхобмоточном трансформаторе с ёмкостной компенсацией // Электротехника. – 2013. – № 11. – С. 2–5.

8. Ромодин А.В., Кузнецов М.И. Экспериментальное исследование управления потоком активной мощности в системе с двумя источниками питания // Электротехника. – 2010. – № 6. – С. 44–49.

9. Ромодин А.В., Лейзгольд Д.Ю. Модель системы ситуационного управления гибкими линиями электропередачи в нормальных режимах работы [Электронный ресурс] // Социальные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – Режим доступа: [www.science-education.ru/113-11670](http://www.science-education.ru/113-11670) (дата обращения: 08.04.2015).

10. Соловьев В.А., Дерюжкова Н.Е., Купова А.В. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 23–28.

11. Управляемые шунтирующие реакторы для электрических сетей [Электронный ресурс] / А.Г. Долгополов и др. // Проблемы региональной энергетики. – 2011. – № 3 (17). – С. 1–20. Режим доступа: [www.elibrary.ru/download/22974526.pdf](http://www.elibrary.ru/download/22974526.pdf) (дата обращения: 02.04.2015).

### References

1. Analiz rezhimov raboty staticheskogo tiristorного компенсатора реактивной мощности дуговой сталеплавильной печи / G.P. Kornilov i dr. // Glavnyj jenergetik. 2011. no. 3. pp. 30–34.

2. Andrievskaja N.V., Bocharjov S.V. Modelirovanie sistem: uchebnoe posobie. – Perm: Izd-vo Perm. gos. tehn. un-ta, 2008. 283 p.

3. Kavalero B.V., Kazancev V.P. Matematicheskaja model jelektrojenergeticheskoy sistemy dlja optimalnoj nastrojki reguljatorov gazoturbinnih mini-jelektrostancij // Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2011. no. 2. pp. 21–24.

4. Kuznecov M.I., Romodin A.V., Kostygov A.M. Jeksperimentalnoe issledovanie upravlenija potokom reaktivnoj moshhnosti v jelektricheskoj sisteme s trjohobmotochnym transformatorom // Jelektrotehnika. 2011. no. 11. pp. 46–50.

5. Loskutov A.B., Altunin B.Ju., Karnavskij I.A. Model mnogourovnevnogo kaskadnogo invertora dlja kompensacii reaktivnoj moshhnosti i moshhnosti iskazhenij v setjah s vyprjamitelnoj nagruzkoy [Jelektonnij resurs] // Problemy regionalnoj jenergetiki. 2011. no. 2 (16). pp. 32–38. Rezhim dostupa: [http://elibrary.ru/full\\_text.asp?id=16757520](http://elibrary.ru/full_text.asp?id=16757520) (data obrashhenija: 28.04.2015).

6. Polunaturnoe modelirovanie aktivno-adaptivnoj jelektricheskoj seti // Petrochenkov A.B., Frank T., Romodin A.V. i dr. Jelektrotehnika. 2013. no. 11. pp. 60–63.

7. Romodin A.V., Kuznecov M.I. Preobrazovanie reaktivnoj moshhnosti v trjohobmotochnom transformatore s jomkostnoj kompensaciej // *Jelektrotehnika*. 2013. no. 11. pp. 2–5.
8. Romodin A.V., Kuznecov M.I. Jeksperimentalnoe issledovanie upravlenija potokom aktivnoj moshhnosti v sisteme s dvumja istochnikami pitaniija // *Jelektrotehnika*. 2010. no. 6. pp. 44–49.
9. Romodin A.V., Lejzgold D.Ju. Model sistemy situacionnogo upravlenija gibkimi linijami jelektropere-dachi v normalnyh rezhimah raboty [Jelektronnyj resurs] // *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. 2013. no. 6. Rezhim dostupa: [www.science-education.ru/113-11670](http://www.science-education.ru/113-11670) (data obrashhenija: 08.04.2015).
10. Solovov V.A., Derjuzhkova N.E., Kupova A.V. Modelirovanie staticheskogo tiristornogo kompensatora v sisteme jenergosnabzhenija dugovoj staleplavilnoj pechi // *Vestnik Juzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Jenergetika*. 2014. T. 14, no. 2. pp. 23–28.
11. Upravljaemye shuntirujushhie reaktory dlja jelektricheskikh setej [Jelektronnyj resurs] / A.G. Dolgopolov i dr. // *Problemy regionalnoj jenergetiki*. 2011. no. 3 (17). pp. 1–20. Rezhim dostupa: [www.elibrary.ru/download/22974526.pdf](http://www.elibrary.ru/download/22974526.pdf) (data obrashhenija: 02.04.2015).

---

**Рецензенты:**

Бочкарёв С.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;

Казанцев В.П., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.