

УДК 621.316

В. Д. Ковбаса, Н. В. Коровкин

Минимизация отклонений напряжений узлов и потерь в энергосистеме на основе многокритериальной оптимизации

Контроль напряжения и уменьшение активных потерь в энергосистемах являются важными факторами в обеспечении безопасной работы электроэнергетической системы и ее экономических показателей. Применение УПК помогает увеличить пропускную способность, выбор мощности и места установки УПК требует осмысления. В данной статье применена многокритериальная оптимизация для расстановки УПК при использовании отклонений напряжений узлов и потерь в сети в качестве критериев оптимизации.

Ключевые слова: оптимизация режимов энергосистем, многокритериальная оптимизация, устройства продольной компенсации, потери мощности.

Введение

Устройство продольной компенсации (УПК) является важным элементом в обеспечении эффективной работы электроэнергетической системы (ЭЭС), особенно при наличии большого количества индуктивных нагрузок. УПК играет важную роль в управлении режимами ЭЭС. Основное назначение УПК заключается в том, что оно способствует увеличению предела передаваемой мощности по ЛЭП [1]. Оно помогает снизить потери энергии, повысить надежность и стабильность системы, увеличивает пропускную способность сети.

Кроме того, УПК играют важную роль в поддержании стабильности напряжения в ЭЭС. При изменении нагрузки в системе может происходить падение или повышение напряжения, что может негативно сказываться на работе электрооборудования. УПК могут быть использованы для регулирования напряжения и поддержания его на оптимальном уровне.

Обычно УПК, представляющие собой сложное инженерное устройство, размещаются на промежуточных подстанциях или переключательных пунктах электропередачи. Важной характеристикой компенсированной линии является степень компенсации ее индуктивного сопротивления. Под степенью компенсации понимается отношение суммарного емкостного сопротивления, включенного последовательно в линию, к ее полному индуктивному сопротивлению:

$$\mu_k = \sum x_k / x_l. \quad (1)$$

При умеренной степени компенсации ($\mu_k = 0,2 \div 0,3$) можно обойтись одним УПК, размещенным близко к середине линии [2].

Количество устанавливаемых УПК, а также их мощность и место расположения должны быть обоснованы технико-экономическими расчетами. Выбор мощности и количества устройств продольной компенсации требует комплексного анализа и учета различных факторов, чтобы обеспечить эффективную и надежную работу сети.

При управлении режимами ЭЭС стремятся к их оптимизации, обеспечивая минимальные значения потерь и приближение параметров сети к их номинальным значениям. Это достигается путем применения различных методов и алгоритмов, включающих в себя оптимизацию распределения нагрузки, регулирование напряжения,

управление реактивной мощностью и другие техники. Для достижения поиска наилучших параметров режима применяются современные методы математического моделирования, анализа и оптимизации, а также современные автоматизированные системы управления и мониторинга.

Потери мощности и отклонения от заданных значений напряжений узлов являются важными критериями для анализа при выборе мощности УПК и места их установки. Данную задачу можно решить при помощи многокритериальной оптимизации, потери мощности и отклонения напряжений представляют собой две целевые функции, которые необходимо минимизировать, а аргументами будут выступать значения степеней компенсации УПК μ_k и выбор ВЛ в качестве места установки.

Решение аналогичных задач и их актуальность были рассмотрены, в частности, в [3]. В иностранной литературе активно публикуются результаты исследований, связанных с применением методов многокритериальной оптимизации для планирования режимов ЭЭС. Эти исследования основаны на математических моделях, которые учитывают различные параметры и ограничения, связанные с производством и распределением электроэнергии. Они помогают разрабатывать более эффективные и устойчивые энергетические системы, а также их использование способствует снижению негативного воздействия работы ЭЭС на окружающую среду.

Многокритериальная (векторная) оптимизация

Многокритериальная оптимизация предполагает оптимизацию нескольких конфликтующих целей (целевых функций) одновременно. В традиционных задачах оптимизации существует единственная цель, выраженная в виде функционала, который необходимо максимизировать или минимизировать.

Сложность многоцелевой оптимизации заключается в том, что улучшение одной целевой функции может привести к ухудшению другой. Цель состоит в том, чтобы найти набор решений, представляющих собой компромисс между конфликтующими целями, известный как оптимальные решения по Парето или фронт Парето.

Задача многокритериальной оптимизации формулируется следующим образом [4]:

$$\min_{\vec{x}} \{f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})\}, \quad (2)$$

где $f_i: R_n \rightarrow R$ это $k \geq 2$ целевых функций. Векторы решений $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ относятся к непустой области S .

Для решения (1) были разработаны различные методы и алгоритмы: генетический алгоритм, алгоритмы роевого интеллекта [5, 6]. Эти методы исследуют пространство решений для определения набора оптимальных по Парето решений, которые обеспечивают ряд компромиссов между целями.

Множество решений $\vec{x}' \in S$ называется оптимальным по Парето при условии, что не существует $\vec{x} \in S$, при котором $f_i(\vec{x}) \leq f_i(\vec{x}')$ для всех $i = 1, \dots, k$ и $f_i(\vec{x}) < f_i(\vec{x}')$ для хотя бы одного i .

После нахождения множества Парето определяются дополнительные критерии (экономические, технические, социальные и т. п.), которые позволяют найти доминирующее решение среди ранее найденных оптимальных решений.

Генетический алгоритм – это наиболее популярный из эволюционных алгоритмов, который представляет собой следующую процедуру [7, 8]. На первом шаге

случайным образом генерируется исходная популяция особей (Первое поколение). Далее повторяется следующий цикл действий до достижения условия остановки расчета:

- оценить пригодность каждого индивида в популяции (ограничение по времени, достижение достаточной пригодности и т. д.);
- выбрать самых приспособленных индивидов для размножения (Родители);
- создать новых индивидов путем скрещивания и мутаций;
- заменить наименее приспособленных индивидов в популяции новыми индивидами.

В ЭЭС имеется большое количество различных параметров, поэтому для многокритериальной оптимизации в данной статье был выбран генетический алгоритм, так как одним из его достоинств является простота реализации при поиске в пространстве решений большой размерности, и алгоритм не зависит от его структуры, по сравнению с неэволюционными алгоритмами, а также генетические алгоритмы инвариантны относительно вида целевой функции. При этом генетические алгоритмы могут комбинироваться с другими видами алгоритмов.

Выбор степени компенсации и места установки УПК на основе многокритериальной оптимизации

На примере тестовой 14-узловой схемы стандарта IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), представленной на рис. 1, проводился поиск оптимальной степени компенсации и места установки УПК. Расчеты выполнены с использованием программно-вычислительного комплекса *RastrWin*. Данные по узлам представлены на рис. 2, данные по ветвям – на рис. 3. Количество устанавливаемых УПК принято равным двум, одно УПК на одну ЛЭП. В качестве возможного места установки УПК на ЛЭП рассматривались все парные сочетания всех имеющихся 17 ЛЭП данной схемы. Возможная степень компенсации μ_k была принята в диапазоне от 0 до 0,2 для каждой отдельной ЛЭП.

Параметрами оптимизации будут выступать x_i и x_j – индуктивные сопротивления i -й и j -й ЛЭП с учетом степени компенсации. Критериями оптимизации, которые необходимо минимизировать, будут являться суммарные потери в сети – dP и среднее значение отклонения напряжения в узлах схемы от номинальных значений – dU .

В результате оптимизации, устанавливая УПК на i -й и j -й ветвях, получается одно множество Парето. Проанализировав все парные сочетания, будут получены различные множества Парето.

На рис. 4 представлен трехмерный график зависимости $dU(x_i, x_j)$, где показаны значения всех полученных множеств Парето, каждое отдельное множество Парето имеет собственный цвет на графике. Соответственно, количество цветов равно количеству полученных множеств Парето. Каждая точка графика представляет собой зависимость суммарного отклонения напряжения во всех узлах от индуктивных сопротивлений i -й и j -й ветвей, разделенное на количество всех узлов, за исключением балансирующего узла, так как в нем отклонение напряжения не происходит. То есть суммарное значение отклонений разделено на число 13.

На данном графике имеется минимум функции, а именно 1,5 %. Данное значение доминирует над остальными по критерию суммарного отклонения напряжения.

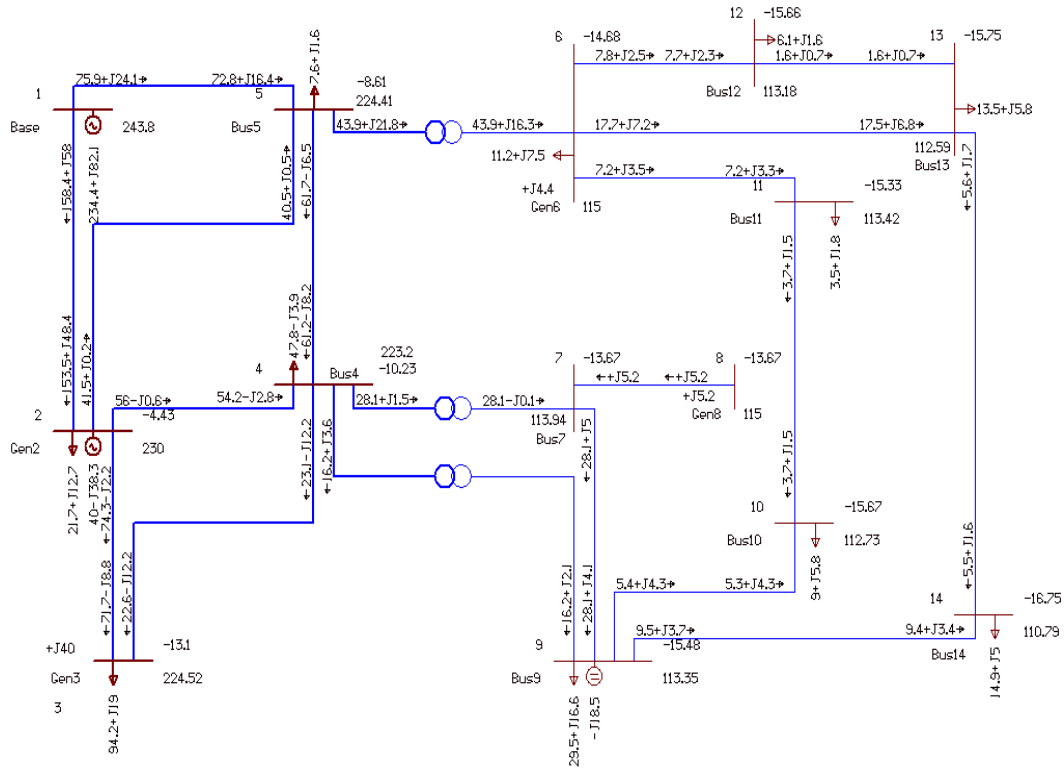


Рис. 1. Стандартная 14-узловая схема

S	Тип	Номер	Название	U_ном	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш
	База	1	Base	244			234,4	82,1				
	Ген	2	Gen2	230	21,7	12,7	40,0	-38,3	230,0	-40,0	50,0	
	Ген+	3	Gen3	230	94,2	19,0		40,0	230,0		40,0	
	Нагр	4	Bus4	230	47,8	-3,9						
	Нагр	5	Bus5	230	7,6	1,6						
	Ген	6	Gen6	115	11,2	7,5		4,4	115,0	-6,0	24,0	
	Нагр	7	Bus7	115								
	Ген	8	Gen8	115				5,2	115,0	-6,0	24,0	
	Нагр	9	Bus9	115	29,5	16,6						-1 436,7
	Нагр	10	Bus10	115	9,0	5,8						
	Нагр	11	Bus11	115	3,5	1,8						
	Нагр	12	Bus12	115	6,1	1,6						
	Нагр	13	Bus13	115	13,5	5,8						
	Нагр	14	Bus14	115	14,9	5,0						

Рис. 2. Данные по узлам

Тип	N_нач	N_кон	N_п	ID...	Название	R	X	B	Кт/г
ЛЭП	1	2			Base - Gen2	10,26	31,30	-99,8	
ЛЭП	1	5			Base - Bus5	28,58	117,99	-93,0	
ЛЭП	2	3			Gen2 - Gen3	24,86	104,73	-82,8	
ЛЭП	2	4			Gen2 - Bus4	30,74	93,27	-64,3	
ЛЭП	2	5			Gen2 - Bus5	30,13	91,98	-65,4	
ЛЭП	3	4			Gen3 - Bus4	35,45	90,47	-24,2	
ЛЭП	4	5			Bus4 - Bus5	7,06	22,28		
Тр-р	4	7			Bus4 - Bus7		105,81		0,511
Тр-р	4	9			Bus4 - Bus9		276,26		0,516
Тр-р	5	6			Bus5 - Gen6		115,80		0,536
ЛЭП	6	11			Gen6 - Bus11	12,56	26,30		
ЛЭП	6	12			Gen6 - Bus12	16,25	33,83		
ЛЭП	6	13			Gen6 - Bus13	8,75	17,23		
ЛЭП	7	8			Bus7 - Gen8		23,30		
ЛЭП	7	9			Bus7 - Bus9		14,55		
ЛЭП	9	10			Bus9 - Bus10	4,21	11,18		
ЛЭП	9	14			Bus9 - Bus14	16,81	35,76		
ЛЭП	10	11			Bus10 - Bus11	10,85	25,40		
ЛЭП	12	13			Bus12 - Bus13	29,22	26,43		
ЛЭП	13	14			Bus13 - Bus14	22,61	46,03		

Рис. 3. Данные по ветвям

Аналогично построен график потерь мощности $dP(x_i, x_j)$, представленный на рис. 5, на котором явно виден минимум функции, равный 14,76 МВт. Данное решение доминирует над другими, так как расстановка УПК в данном случае имеет больший эффект.

По этим же значениям построена зависимость отклонения напряжения от потерь мощности, изображенная на рис. 6. На этом графике так же выделяются две точки, соответствующие минимумам функций dU и dP , которые доминируют над остальными значениями.

Важно отметить, что некоторые множества Парето представлены на графике лишь одной точкой. Это обусловлено тем, что в таких случаях одна из рассматриваемых ветвей связана с балансирующим узлом. Применяя максимальную степень компенсации на данной ветви возле узла с наибольшей генерацией, можно достичь максимального снижения потерь. Поэтому в данной схеме при рассмотрении ветви, связанной с балансирующим узлом, множество Парето представляет собой единственное решение.

Минимум отклонения напряжения достигается, если установить УПК в ветвях 1–5 и 7–8, отклонение напряжения снижается на 6,33 % относительно изначальной схемы без УПК. Минимум потерь мощности достигается, если установить УПК в ветвях 1–5 и 2–3, потери снижаются лишь на 2,38 % относительно изначальной схемы без УПК.

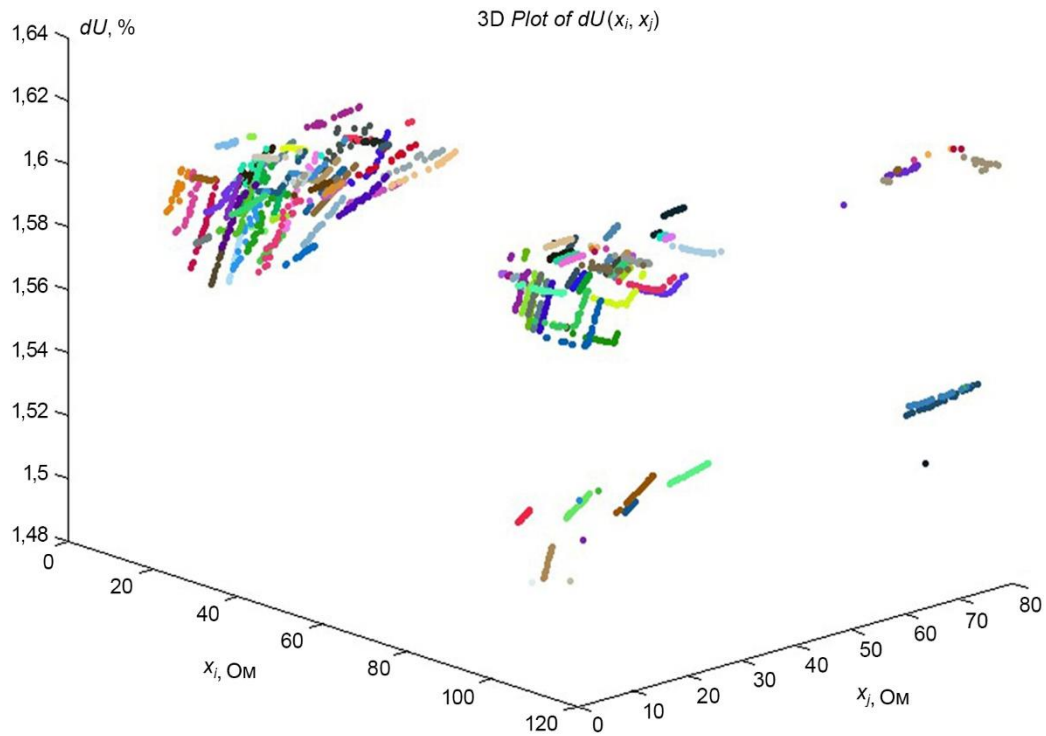


Рис. 4. Зависимость отклонения напряжения от индуктивных сопротивлений

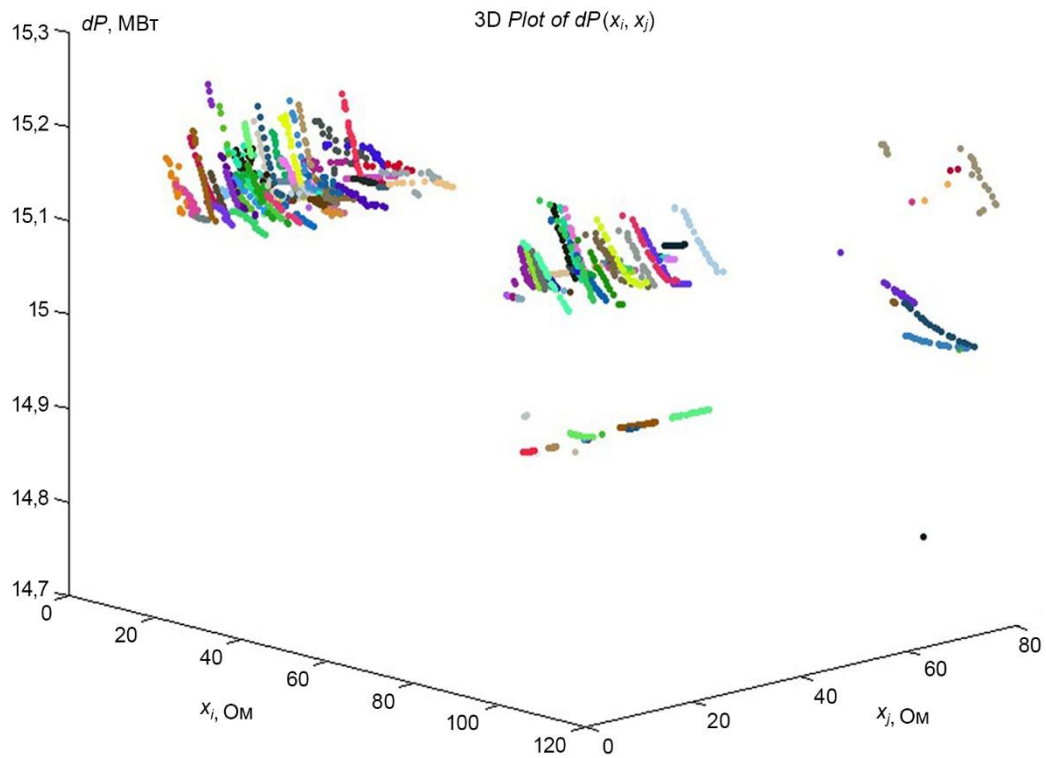


Рис. 5. Зависимость потерь мощности от индуктивных сопротивлений

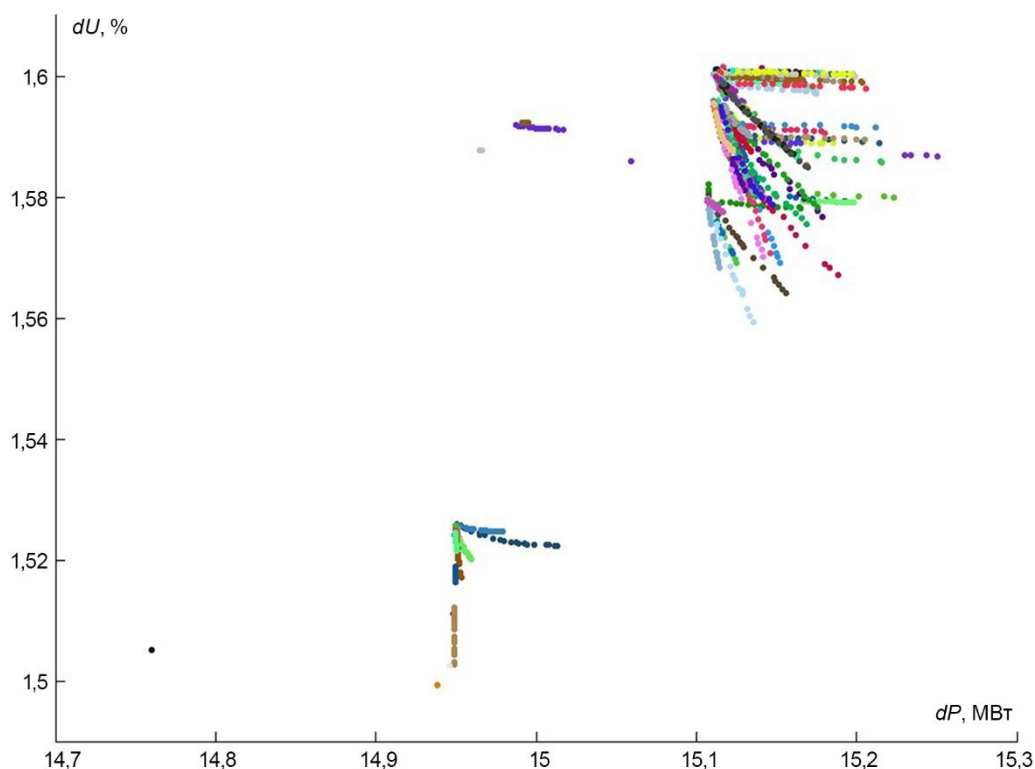


Рис. 6. Зависимость отклонения напряжения от потерь мощности

Заключение

Многокритериальная оптимизация позволила найти оптимальные решения для выбора места установки УПК и степени компенсации по заданным критериям, что аналитически было бы невозможно.

Конкретно в примере тестовой 14-узловой схемы было выявлено, что при заданных параметрах отклонение напряжения максимально может быть снижено на 6,33 %, а минимальные потери удастся снизить таким образом лишь на 2,38 %.

Применение векторной оптимизации при заданных критериях является рациональным способом для оптимизации режимов ЭЭС. Данный подход может быть применен для компенсирующих и регулирующих устройств других типов, а именно для управляемых шунтирующих реакторов, фазоповоротных трансформаторов и т. д.

Список литературы

1. Васюченко П. В. Управление потерями в электрических сетях с помощью регулируемых устройств продольной компенсации / П. В. Васюченко // Энергосбережение. – 2014. – № 8 (126). – С. 10–16.
2. Рыжов Ю. П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения / Ю. П. Рыжов. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2007. – 291 с.
3. Методика определения зависимостей параметров установившегося режима энергосистемы от потенциальных управляющих воздействий / Н. В. Коровкин, О. В. Фролов, А. А. Лисицын, Р. А. Язенин // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2012. – № 2 (67). – С. 26–33.

4. Multiobjective optimization: interactive and evolutionary approaches / J. Branke, K. Deb, K. Miettinen, R. Slowinski // Lecture Notes in Computer Science. – 2008.
5. Zeng Y., Sun Y. Application of hybrid MOPSO algorithm to optimal reactive power dispatch problem considering voltage stability / Y. Zeng, Y. Sun // Electrical and Computer Engineering. – 2014. – vol. 2014. – pp. 1–12.
6. Varadarajan M., Swarup K. S. Differential evolution approach for optimal reactive power dispatch / M. Varadarajan, K. S. Swarup // Applied Soft Computing Journal. – 2008. – vol. 8, no. 4. – pp. 1549–1561.
7. Cohoon J. Evolutionary algorithms for the physical design of VLSI circuits / J. Cohoon. – 2003. – p. 7–10.
8. Korovkin N. V., Potienko A. A., The use of a genetic algorithm for solving electric engineering problems / N. V. Korovkin, A. A. Potienko // Elektrichestvo. – 2002. – № 11. – С. 2–15.

Ковбаса Вадим Дмитриевич, аспирант Научно-технического центра Единой энергетической системы» (АО «НТЦ ЕЭС»), специалист отдела развития электроэнергетических систем АО «НТЦ ЕЭС».

E-mail: kovbasa-vd@ntcees.ru

Коровкин Николай Владимирович, д-р техн. наук, профессор, профессор Высшей школы высоковольтной энергетики Института энергетики Санкт-петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ).

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com