



УДК 621.316

*М.В. Одинцов, Д.А. Акимов,  
Н.В. Коровкин, О.В. Фролов*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ФАЗОПОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ПОДСТАНЦИИ 500 КВ**

*M.V. Odintsov, D.A. Akimov,  
N.V. Korovkin, O.V. Frolov*

## **OPTIMIZATION OF OPERATION MODE ENERGY SYSTEM BY PHASE-SHIFTING TRANSFORMER SUBSTATION 500 KV**

Предмет статьи — выбор с помощью методов многокритериальной оптимизации угла сдвига фаз фазоповоротного трансформатора на подстанции 500 кВ Ульке. Диспетчер, выбирая настройки ФПТ, должен оценивать текущий режим и принимать решения по улучшению его показателей, что является нетривиальной задачей. Основная проблема — наличие большого числа возможных состояний. Каждое состояние характеризуется набором не сопоставимых между собой показателей, отражающих надежность, качество и экономичность работы. Традиционные методы решения таких задач, использующие приведение векторного критерия к скалярному, (методы главного критерия, линейной свертки и т. д.) субъективны и для эффективного управления режимами энергосистем требуют от диспетчера наличия большого опыта. В данной статье на примере ЕЭС России и Казахстана смоделирована работа фазоповоротного трансформатора на подстанции 500 кВ Ульке. Простым перебором всех возможных настроек фазоповоротного трансформатора построено множество эффективных оценок режимов электроэнергетической системы для трех векторных критериев. С помощью графического представления множества эффективных оценок проведен анализ электрических режимов и рекомендована область оптимальных настроек фазоповоротного трансформатора.

ОБЪЕДИНЕННАЯ ЭНЕРГОСИСТЕМА; ФАЗОПОВОРОТНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР; МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ; ВЕКТОРНЫЙ КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА.

The aim of this article is to solve a problem of choosing an optimal PST phase-shifting angle at the 500 kV Ulke substation by means of multiobjective optimization methods. The power system state control and dispatching is not a trivial process, when a dispatcher has to assess the current state and take decisions to improve its indicators. The main problem is a big number of possible states. Each state is characterized by a set of different indicators, reflecting reliability, quality and economic efficiency. Traditional methods of multiobjective problem solving, using adduction of a vector criterion to a scalar one (main criterion method, linear contraction method and others), are subjective and demand great experience from a power system dispatcher. In this article the phase-shifting transformer work at the 500 kV Ulke substation is simulated on the basis of UES Russia and Kazakhstan models. The Pareto set of power system states for three vector criteria is obtained by the direct search. The power system state analysis is fulfilled by means of Pareto front, from which an optimal PST settings range could be recommended.

UNIFIED ENERGY SYSTEM; PHASE-SHIFTING TRANSFORMER; MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION; QUALITY VECTOR CRITERION.

Современным и важным направлением развития электроэнергетических систем (ЭЭС) является установка, настройка и эксплуатация устройств FACTS (Flexible Alternative Current

Transmission Systems), или в русской и несколько более общей терминологии — ААУ (активно-адаптивные устройства) [1, 2]. Одно из актуальных направлений гибкого управления

передачами переменного тока — это обеспечение заданного распределения мощности в электрических сетях в соответствии с требованиями диспетчера [2]. Для достижения заданного распределения мощности в электрических сетях устанавливаются фазоповоротные трансформаторы (ФПТ), вставки и линии постоянного тока, а также некоторые из новейших устройств ААУ — обобщенные регуляторы потока мощности, межлинейные регуляторы потоков мощности [1]. Из перечисленных вариантов самые дешевый и технологически простой — это установка ФПТ, широко используемых для регулирования потоков мощности в Западной Европе и США [3]. В сетях ЕЭС России [4, 5] ФПТ применяют мало, несмотря на большой потенциал их использования.

Выбор оптимального угла сдвига фазы, при котором должен работать ФПТ, — нетривиальная задача. Угол сдвига фазы существующих ФПТ зачастую выбирается сезонно по соображениям обеспечения допустимой загрузки элементов сети. При таком подходе потенциал применения ФПТ для гибкого управления используется не в полной мере, например в плане возможности снижения потерь. В данной работе выбор угла сдвига фазы ФПТ предлагается производить по нескольким критериям качества с помощью методов многокритериальной оптимизации.

Использование ФПТ для регулирования трансграничных потоков мощности между ЭЭС соседних стран широко распространено в Западной Европе (Германия и Польша, Бельгия и Голландия, Бельгия и Франция и др.). На выбор оптимальных настроек ФПТ влияет множество как технических, так и политико-экономических факторов [6] (стремление государств-участников сократить транзитный поток по территориям соседей; желание сетевой компании, эксплуатирующей ФПТ и отходящие от него линии, минимизировать потери при передаче электроэнергии и пр.). Зачастую эти цели противоречивы. Например, как будет показано далее, снижение потока мощности по территориям стран-соседей способно вызвать увеличение потерь электроэнергии.

Диспетчер, ведя режим, одновременно (и зачастую интуитивно) оценивает ряд его характеристик: уровни напряжения в узлах сети,

величины потоков мощности по контролируемым сечениям, запасы статической устойчивости и т. д. Данные характеристики отражают его представление об оптимальности текущего режима и в большинстве случаев не могут быть сведены к одному, например экономическому, критерию. Таким образом, решается многоэкстремальная задача. Для принятия решения диспетчер может использовать метод линейной свертки, когда при текущем управлении исходя из опыта оценивается значимость критериев (выбираются весовые коэффициенты). Такой подход субъективен, так как для разных диспетчеров те или иные критерии обладают разной важностью. Между тем решение существенно зависит от выбора весовых коэффициентов. Альтернативный рассмотренному метод принятия решения — метод главного критерия — предполагает выделение одного главного критерия и оптимизацию режима ЭЭС по нему. При этом малое улучшение главного критерия может значительно ухудшать остальные. Основным недостатком этих методов — в том, что априори не ясны ни соотношение весовых коэффициентов в методе линейной свертки, ни выбор главного критерия и ограничения на второстепенные критерии в методе главного критерия [7, 8]. Уменьшение степени субъективизма можно достигнуть использованием векторных критериев оценки эффективности режимов ЭЭС и методов многокритериальной оптимизации, которые рассматриваются далее.

Многокритериальная (или векторная) оптимизация состоит в одновременной оптимизации двух и более не сводимых друг к другу целевых функций (критериев) в заданной области определения. Принципиальными понятиями многокритериальной оптимизации являются понятия эффективного решения и множества Парето. Решение называется эффективным, если для него в области определения отсутствуют решения, которые превосходят его хотя бы по одному критерию и не хуже по всем остальным. Множество Парето — это множество эффективных решений. Образ множества Парето в пространстве критериев называется множеством эффективных оценок [8].

Пусть при оптимизации текущего режима диспетчер задается двумя критериями — экономичностью и надежностью. Каждый режим описывается парой значений соответствующих це-

левых функционалов и для обоих критериев значение 1 является наилучшим. Тогда из трех решений  $(0,3; 0,4)$ ,  $(0,4; 0,5)$ ,  $(0,5; 0,4)$  эффективны и входят во множество Парето лишь два последних. Знание множества Парето сужает число претендентов на решение, исключая заведомо неконкурентоспособные варианты.

Выбор решения из множества Парето осуществляет диспетчер, основываясь на своей субъективной оценке критериев качества и их взаимосвязи между собой. Важно, что этот субъективизм существенно отличается от субъективизма при использовании, например, метода линейной свертки. Множество Парето представляет диспетчеру для выбора все возможные оптимальные решения и только их, в то время как метод линейной свертки предлагает лишь одно решение при неясной связи между качеством решения и значениями субъективно выбранных весовых коэффициентов.

#### **Многокритериальная оптимизация настроек ФПТ**

Рассмотрим выбор настроек ФПТ, установленного на ПС 500 кВ Ульке в Актюбинском районе Казахстана [9] (одного из немногих эксплуатируемых на территории СНГ ФТП), как задачу многокритериальной оптимизации. Актюбинский район — энергодефицитный, и его электроснабжение осуществляется по ВЛ 500 кВ Житикара — Ульке и трем ВЛ 220 кВ (Новотроицкая — Ульке, Орская — Кимперсай и Орская — Актюбинская, причем ВЛ 500 кВ Житикара — Ульке (Казахстан) шунтирована тремя вышеупомянутыми российскими ВЛ 220 кВ). Параллельная работа сетей 220 и 500 кВ приводит к существенному недоиспользованию линии 500 кВ и перегрузке российских линий.

Для обеспечения требуемой загрузки ВЛ 500 кВ Житикара — Ульке на ПС 500 кВ Ульке установлен фазопоротный комплекс, состоящий из группы однофазных автотрансформаторов (АТ) 500/220 кВ суммарной мощностью  $1 \times (3 \times 367)$  МВ·А и последовательно включенного с ней трехфазного вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) мощностью 400 МВ·А. Транспозиция фаз ВДТ позволяет внести поперечную составляющую напряжения, изменением величины которой и осуществляется регулирование потока активной мощности [9].

Регулирование коэффициентов трансформации АТ между обмотками ВН и СН осуществляется устройством регулирования под нагрузкой (РПН), встроенном на линейном конце обмотки СН, с отпайками  $\pm 8 \times 1,5$  %. Регулирование коэффициента трансформации ВДТ также осуществляется за счет изменения коэффициента трансформации между возбуждающей и регулировочной обмотками ФПТ, причем устройство РПН с отпайками  $+16 \times 6,25$  % установлено на регулировочной обмотке. При таком устройстве ФПТ доступно 289 различных значений настроек, т. к. оба устройства РПН обеспечивают по 17 различных положений. Поэтому при выборе оптимальных настроек ФПТ на ПС 500 кВ Ульке можно найти множество Парето перебором при любом числе критериев. При увеличении числа входных переменных количество возможных решений растет экспоненциально, что исключает возможность перебора и требует использования специальных алгоритмов многокритериальной оптимизации [10–12]. Для многокритериальной оптимизации настроек ФПТ, установленного на ПС 500 кВ Ульке, в качестве рассматриваемых критериев оптимальности (целей) выбраны:

- 1) максимизация потока по ВЛ 500 кВ Житикара — Ульке (критерий надежности);
- 2) минимизация потерь активной мощности в сетях 110 кВ и выше Актюбинского района (экономический критерий);
- 3) минимизация отклонения напряжения в узлах нагрузки Актюбинского района (критерий качества).

Расчет установившихся режимов выполнен программно-вычислительным комплексом «RastrWin» ([www.rastrwin.ru](http://www.rastrwin.ru)). Расчетная схема включает в себя однолинейную схему замещения сети 110 кВ и выше ЕЭС России и Казахстана, восстановленную по данным контрольных замеров за 2013 год. Параметры однолинейной схемы замещения ФПТ на ПС 500 кВ Ульке рассчитываются по данным [9]. Схемы замещения ЭС Республики Казахстан и прилегающих ОЭС России (ОЭС Сибири и ОЭС Урала) получены по данным контрольных замеров уровней напряжения и потокораспределения мощности. Схема содержит 1598 узлов, 2518 ветвей, общая нагрузка — 79,2 ГВт, нагрузка Актюбинского района — 712 МВт.

При использовании только критериев 1 и 2 множество Парето содержит 100 элементов (рис.1) и относительно велико, так как данные критерии конфликтуют: увеличение потока активной мощности приводит к увеличению потерь. Рис. 1 показывает, что изменение потока активной мощности в основном происходит за счет изменения отпаяк ВДТ, при этом на меньших номерах отпаяк ВДТ оптимальными по Парето будут большие номера отпаяк АТ, а при увеличении номера отпайки ВДТ оптимальными становятся меньшие номера отпаяк АТ.

При меньших номерах отпаяк ВДТ (левая нижняя часть рисунка) регулирование можно проводить ступенчато (большая дискретность), при этом за счет изменения отпаяк АТ можно регулировать потери мощности. При больших номерах ВДТ регулирование потока мощности можно производить с меньшей дискретностью, при этом одной величине потока активной мощности (например, 250 МВт) может соответствовать несколько различных комбинаций положений РПН и ВДТ и АТ, однако оптимальным будет только одно решение. Для потока мощности 250 МВт по ВЛ 500 кВ для этой за-

дачи снижение потерь при выборе оптимального по Парето решения составит 0,7–1,7 МВт (4–10 %).

При использовании только 1-го и 3-го критериев множество Парето содержит 21, а для критериев 2 и 3 — 25 элементов (рис. 2). Относительно небольшой размер множества Парето объясняется связью между критериями: для 1-го и 3-го критерия увеличение потока мощности по ВЛ 500 кВ приводит к снижению напряжения на шинах 110 кВ и у потребителя; для 2-го и 3-го критерия снижение напряжения приводит к увеличению потерь на передачу мощности.

На рис. 2, а участок 1 множества эффективных оценок соответствует максимальной отпайке ВДТ (+16), обеспечивающей максимальный поток мощности по ВЛ 500 кВ; отклонение напряжения регулируется изменением отпаяк АТ от -8 до +8; меньшие отпайки соответствуют меньшему потоку мощности при снижении отклонения напряжения. Участок 2 множества эффективных оценок соответствует минимальной отпайке АТ (-8) при изменении отпаяк ВДТ от 11 до 16; при уменьшении отпаяк ВДТ происходит снижение потока мощности при незначительном отклонении напряжения.

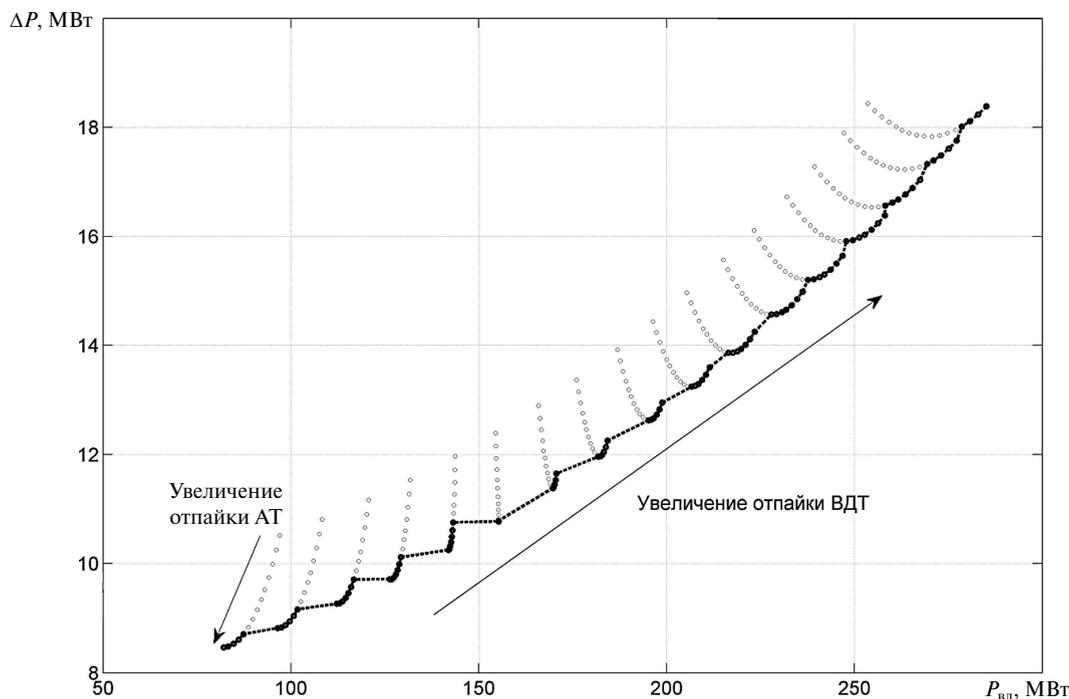


Рис. 1. Множество эффективных оценок для критериев 1 и 2  
 (◦ — не оптимальные по Парето; ..... — оптимальные по Парето)

На рис. 2, б участок 1 множества эффективных оценок соответствует минимальной отпайке ВДТ (0), обеспечивающей минимальный поток мощности по ВЛ 500 кВ и, как следствие, минимальные потери. Отклонение напряжения регулируется изменением отпайки АТ от  $-8$  до  $+5$ ; при дальнейшем увеличении номера отпайки АТ потери растут из-за уравнивающих потоков реактивной мощности. Участок 2 множества эффективных оценок соответствует минимальной отпайке АТ ( $-8$ ) при изменении номера отпайки ВДТ от 0 до 11. Здесь увеличение отпайки ВДТ ведет к увеличению потока мощности и увеличению потерь при незначительном снижении отклонения напряжения.

Участки 1 множества эффективных оценок на рис. 2, а и 2, б оптимальны с точки зрения управляемости при выборе текущих настроек, т. к. обеспечивают изменение контролируемых критериев вдоль множества эффективных оценок Парето. Участки 2 представляют собой практически горизонтальную линию; хотя решения, составляющие их, и входят во множество Парето, однако работать при таких настройках не следует, т. к. изменение настроек ФПТ на данном участке позволяет менять только один из критериев.

Незначительное изменение режима приведет к резкому ухудшению одного из критериев (резкий рост потерь) или выходу режима из оптимальной зоны. Отметим, что при скалярной оптимизации  $\Delta U \rightarrow \min$  в качестве оптимального будет получаться решение, лежащее на участке 2, и с максимальными потерями или наименьшим потоком мощности по ВЛ 500 кВ. Пожертвовав незначительным уменьшением отклонения напряжения, можно получить заметное снижение потерь или увеличение потока мощности по ВЛ 500

Для ФПТ, установленного на ПС 500 кВ Ульке, рассмотрен выбор оптимального режима работы ЭЭС по векторному критерию. Показано, что анализируя форму множества Парето можно сузить множество эффективных решений. В итоге определен диапазон настроек, в рамках которого необходимо осуществлять регулирование ФПТ.

Показано, что многокритериальная оптимизация упрощает процесс принятия решений для диспетчера за счет рассмотрения только оптимальных решений и большей, чем при скалярной оптимизации, свободы выбора. Визуализация

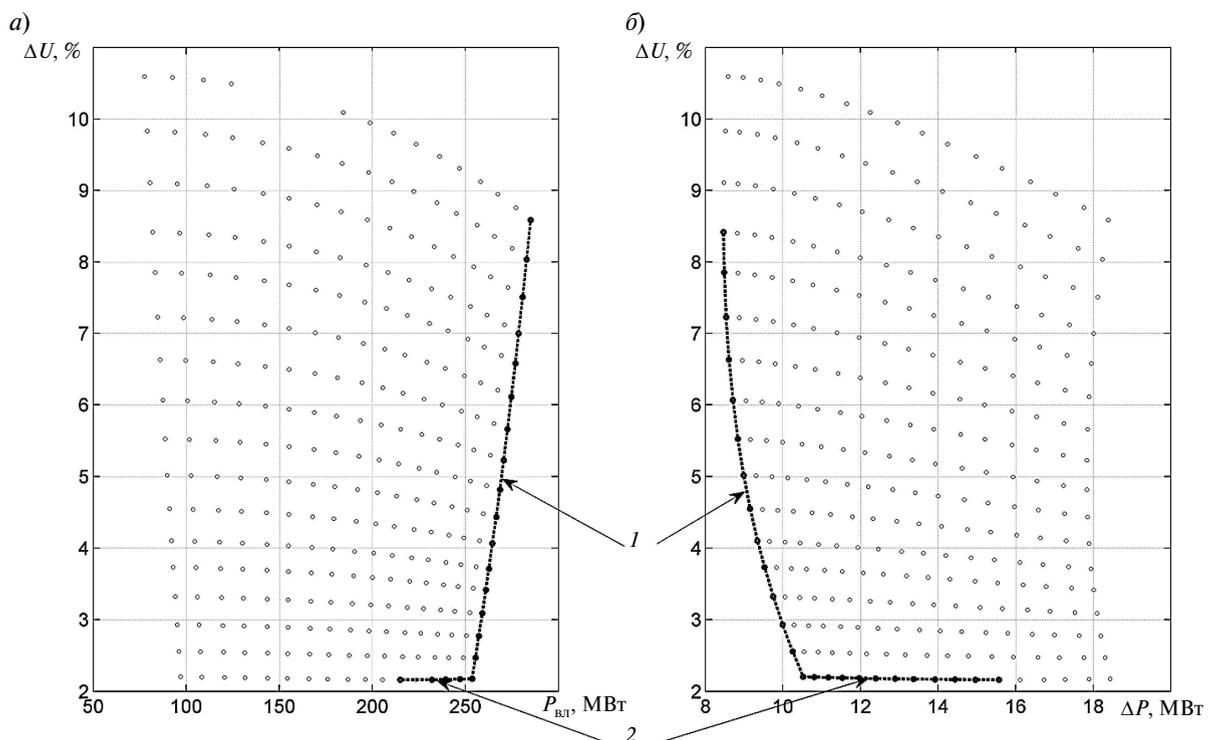


Рис. 2. Множество настроек ФПТ в пространстве критериев и множество эффективных оценок (° — не оптимальные по Парето; ---- — оптимальные по Парето)

множества Парето позволяет быстро как на интуитивном уровне, так и в числах оценить зависимость между значениями критериев, что способствует принятию эффективных решений.

По результатам исследования можно сделать вывод о целесообразности использования векторного критерия качества для оптимизации режимов энергосистем и принятия решений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г.** Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в ЭЭС. М.: Торус Пресс, 2011. 311 с.
2. **Шакарян Ю.Г.** Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока [Электронный ресурс] Режим доступа [http://www.fsk-ees.ru/media/File/evolution\\_technology/FACTS.pdf](http://www.fsk-ees.ru/media/File/evolution_technology/FACTS.pdf) (дата обращения 06.06.14);
3. **Belivanis M., Bell K.R.W.** Use of Phase-shifting transformers on the Transmission Network in Great Britain. *Universities Power Engineering Conf. (UPEC), 2010 45th International*. 2010. P. 1–5.
4. **Ольшванг М.В.** Особенности кросс-трансформаторной технологии транспортирования энергии по сетям 110–765 кВ // *Электро*. 2004. №2. С. 6–12.
5. **Добрусин Л.А.** Тенденции применения фазопоротных трансформаторов в электроэнергетике // *Силовая электроника*. 2012. № 4. С. 60–66.
6. **Van Hertem D., Rimez J., Belmans R.** Power Flow Controlling Devices as a Smart and Independent Grid Investment for Flexible Grid Operations. Belgian Case Study // *IEEE Trans. on Smart Grid*. September 2013. Vol. 4, №3. P. 1656–1664.
7. **Luke S.** Essentials of Metaheuristics. A Set of Undergraduate Lecture Notes [Online]. Available: <http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/Essentials.pdf>
8. **Черноруцкий И.Г.** Методы принятия решений. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 408 с.
9. **Евдокунин Г.А. [и др.]**. ФПТ впервые в СНГ применен в Казахстане // *Новости электротехники*. 2008. №6(48). С. 38–41.
10. **Korovkin N., Odintsov M., Belyaev N., Frolov O., Hayakawa M.** Various approaches to problems of multicriteria optimization processes of EPS // *Proc. of EMC'14. Tokyo, 2014 Int. Symp. on EMC. Tokyo, 2014*. P. 418–421.
11. **Одинцов М.В.** Применение ГА для оптимизации режимов работы ЭЭС по векторному критерию // *Сб. научн. трудов Межд. науч.-практ. конф. «Перспективы развития науки и образования»*. М., 2013. Ч. I. С. 67–70.
12. **Коровкин Н.В., Фролов О.В., Одинцов М.В. [и др.]**. Энергосбережение и комплексные задачи электроэнергетики: уч. пособие. СПб., 2014.

## REFERENCES

1. **Kochkin V.I., Shakaryan Yu.G.** Primeneniye gibkikh (upravlyayemykh) sistem elektroperedachi peremennogo toka v EES M.: Torus Press, 2011. 311 s. (rus.)
2. **Shakaryan Yu.G.** Upravlyayemyye (gibkiye) sistemy peredachi peremennogo toka [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa [http://www.fsk-ees.ru/media/File/evolution\\_technology/FACTS.pdf](http://www.fsk-ees.ru/media/File/evolution_technology/FACTS.pdf) (data obrashcheniya 06.06.14) (rus.)
3. **Belivanis M., Bell K.R.W.** Use of Phase-shifting transformers on the Transmission Network in Great Britain. *Universities Power Engineering Conf. (UPEC), 2010 45th International*. 2010. P. 1–5. (rus.)
4. **Olshvang M.V.** Osobennosti kross-transformatornoy tekhnologii transportirovaniya energii po setyam 110–765 kV. *Elektro*. 2004. №2. S. 6–12. (rus.)
5. **Dobrusin L.A.** Tendentsii primeneniya fazopovortnykh transformatorov v elektroenergetike. *Silovaya elektronika*. 2012, № 4. S. 60–66. (rus.)
6. **Van Hertem D., Rimez J., Belmans R.** Power Flow Controlling Devices as a Smart and Independent Grid Investment for Flexible Grid Operations: Belgian Case Study. *IEEE Trans. on Smart Grid*. 2013. Vol. 4, №3, P. 1656–1664.
7. **Luke S.** Essentials of Metaheuristics. A Set of Undergraduate Lecture Notes, [Online]. Available: <http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/Essentials.pdf>
8. **Chernorutskiy I.G.** Metody prinyatiya resheniy. SPb.: BKhV-Peterburg, 2005. 408 s. (rus.)
9. **Yevdokunin G.A. [i dr.]**. FTP v pervyye v SNG primenen v Kazakhstane. *Novosti elektrotekhniki*. 2008. №6(48). S. 38–41. (rus.)
10. **Korovkin N., Odintsov M., Belyaev N., Frolov O., Hayakawa M.** Various approaches to problems of multicriteria optimization processes of EPS: *Proc. of EMC'14/Tokyo, 2014 Int. Symp. on EMC. Tokyo, 2014*. P. 418–421.
11. **Odintsov M.V.** Primeneniye GA dlya optimizatsii rezhimov raboty EES po vektornomu kriteriyu». *Sb. nauchn. trudov Mezhd. nauch.-prakt. konf. «Perspektivy razvitiya nauki i obrazovaniya»*. М., 2013. Ch. I. S. 67–70. (rus.)
12. **Korovkin N.V., Frolov O.V., Odintsov M.V. [i dr.]**. Energoberezeniye i kompleksnyye zadachi elektroenergetiki: uch. posobiye SPb., 2014.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**ОДИНЦОВ Михаил Вячеславович** — инженер ОАО «Научно-технический центр единой энергетической системы». 194223, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д. 1, лит. А, ОАО «НТЦ ЕЭС». E-mail: mixaodintsov@rambler.ru

**АКИМОВ Дмитрий Андреевич** — инженер ОАО «Научно-технический центр единой энергетической системы». 194223, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д. 1, лит. А, ОАО «НТЦ ЕЭС». E-mail: akimov\_d@ntcees.ru

**КОРОВКИН Николай Владимирович** — доктор технических наук заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

**ФРОЛОВ Олег Валерьевич** — кандидат технических наук генеральный директор ОАО «Научно-технический центр единой энергетической системы». 194223, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д. 1, лит. А, ОАО «НТЦ ЕЭС». E-mail: ntc@ntcees.ru

**AUTHORS**

**ODINTSOV Mikhail V.** — JSC “Scientific and Technical Center of Unified Power System”. 1 lit A, Kurchatova St., St. Petersburg, Russian Federation, 194223. E-mail: mixaodintsov@rambler.ru

**AKIMOV Dmitrii A.** — JSC “Scientific and Technical Center of Unified Power System”. 1 lit A, Kurchatova St., St. Petersburg, Russian Federation, 194223. E-mail: akimov\_d@ntcees.ru

**KOROVKIN Nikolai V.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

**FROLOV Oleg V.** — JSC “Scientific and Technical Center of Unified Power System”. 1 lit A, Kurchatova St., St. Petersburg, Russian Federation, 194223. E-mail: ntc@ntcees.ru