

# Управление установившимися режимами энергосистем с использованием векторного критерия качества

КОРОВКИН Н.В., ОДИНЦОВ М.В., ФРОЛОВ О.В.

*Режимы функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС) характеризуются большим числом возможных состояний, каждое из которых описывается набором независимых показателей, отражающих надежность, устойчивость, экономичность и т.д. Показатели интерпретируются как критерии качества режима. Для комплексной оценки качества режима вводится векторный критерий качества, соответственно для поиска множества наилучших режимов используется многокритериальная оптимизация, которая рассматривается также как метод принятия эффективных решений. Традиционно применяемые методы построения множеств наилучших решений (методы главного критерия, линейной свертки и т.д.) во многом субъективны и эффективны лишь в случаях, когда лицо, принимающее решения, обладает значительным опытом в соответствующей области. Оценка множества эффективных решений выполнена с использованием генетического алгоритма. Анализ распределения элементов этого множества в пространстве критериев позволяет выявлять зоны оптимального управления. Предлагаемое графическое представление множеств эффективных решений снижает субъективность решений и таким образом повышает их качество.*

**Ключевые слова:** энергосистема, режимы, многокритериальная оптимизация, векторный критерий качества

Управление режимами ЭЭС направлено на обеспечение надежного электроснабжения потребителей энергией требуемого качества при минимальных эксплуатационных затратах [1]. Обычно [2] оптимизация режима основана на декомпозиции, когда последовательно оптимизируется распределение активной мощности между отдельными агрегатами и станциями с приближенным учетом потерь активной мощности и учетом ограничений по потоку активной мощности по линиям, затем фиксируются активные мощности узлов и далее из условия минимума потерь в сети определяются реактивные мощности генераторных узлов. В традиционных подходах все этапы оптимизации режимов ЭЭС можно рассматривать как оптимизацию скаляра издержек с ограничениями, что представляется несовершенным, так как режим ЭЭС имеет различные (и несравнимые непосредственно) критерии оптимальности – технические, экономические, социальные. Актуальные критерии оптимизации режима работы ЭЭС представлены в [3]. Соответственно и принятие решения об изменении режима ЭЭС должно основываться на оптимизации векторного критерия [4].

В зарубежной литературе активно исследуется применение методов многокритериальной оптимизации для выбора наилучших режимов ЭЭС [5]. Обычно в качестве критериев оптимальности выбираются экономичность и надежность. В [6, 7] рассматривается задача оптимизации режима по двум критериям: минимуму приведенных затрат и отклонению напряжения. Также активно публику-

ются результаты по проектированию ЭЭС [8] с распределенными [9] и возобновляемыми [10] источниками электроэнергии с применением многокритериальной оптимизации.

**Многокритериальная (векторная) оптимизация.** Многокритериальная оптимизация заключается в одновременной оптимизации двух или более не сводимых друг к другу целевых функционалов (критериев) в заданной области изменения варьируемых параметров [11]:

$$f_i(x) \otimes \min_{x \in D}; \quad i = \overline{1, K};$$

$$D = \{x \in R^n \mid g_k(x) \leq 0, \quad k = \overline{1, m}; \quad g_k(x) = 0,$$

$$k = \overline{m+1, s}; \quad a_k \leq x_k \leq b_k, \quad k = \overline{1, n}\},$$

где  $f_i(x)$ ,  $i = \overline{1, K}$  – набор целевых функционалов (экономические, технические и т.д.);  $D$  – множество допустимых значений варьируемых параметров;  $g_i(x)$  – функциональные и критериальные ограничения (токовая загрузка элементов сети, напряжения узлов и т.д.);  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $k = \overline{1, n}$  – границы изменения варьируемых параметров.

Важным для многокритериальной оптимизации являются понятия предпочтительности, эффективного решения и множества Парето, рассматриваемые далее. Пусть  $x^* \in D$ , если для всех  $K$  критериев выполняется условие  $f_i(x^*) \leq f_i(x)$ ,  $i = \overline{1, K}$ , и как минимум одно из неравенств строгое, то  $x^*$  предпочтительнее  $x$  или, как принято в зарубежной литературе,  $x^*$  доминирует  $x$  [12]. Решение на-

зывают эффективным, если в области допустимых решений отсутствуют доминирующие его решения. Множество Парето – множество эффективных решений. Образ множества Парето в пространстве критериев представляет собой множество эффективных оценок. Очевидно, что решение многокритериальной задачи оптимизации нужно выбирать из множества Парето. Очевидно, что лицо, принимающее решение (ЛПР), должно выбирать эффективный режим из множества Парето.

Диспетчер (ЛПР), ведя режим, одновременно (и зачастую интуитивно) оценивает ряд его характеристик: уровни напряжения в узлах сети, значения потоков мощности сквозь контролируемые сечения, запасы статической устойчивости и т.д. Эти оценки субъективны, отражают его представление об оптимальности текущего режима. Если для принятия решения используется метод линейной свертки, то диспетчер, исходя из своего опыта, оценивает значимость критериев, выбирая весовые коэффициенты. Здесь субъективизм также очевиден, так как опыт разных диспетчеров различен. При использовании минимаксного метода [11], как и в методе линейной свертки, необходимо задать весовые коэффициенты с соответствующей проблемой неоднозначности их выбора. Альтернативным рассмотренным – метод главного критерия – предполагает скалярную оптимизацию режима ЭЭС по одному (главному) критерию, выводя остальные критерии в ограничения. Субъективизм применения этого метода проявляется в необходимости определить как главный критерий, так и уровни ограничения на второстепенные критерии [11]. Таким образом, перечисленные методы позволяют получить только одно субъективно окрашенное эффективное решение.

Множества Парето и эффективных оценок, построение которых рассматривается далее, представляют диспетчеру все возможные оптимальные решения и только их. Наша задача – показать на примерах оптимизации режимов работы ЭЭС РФ, что дальнейший выбор конкретного режима из этих множеств (естественно, субъективный) обладает значительными преимуществами в сравнении с методами линейной свертки, главного критерия и им подобным.

Генетический алгоритм (ГА) был разработан как модель машинного обучения и состоит из повторяющихся циклов: создание популяции, расчет приспособленности особей, отбор наиболее приспособленных особей и создание на их основе с помощью операций мутации и кроссинговера новой популяции [13]. Существует огромное количество модификаций и улучшений ГА. Положительными качествами ГА, важными для решения задач рассматриваемого здесь типа являются:

возможность использовать ГА для многокритериальной оптимизации;

возможность использовать ГА для оптимизации как непрерывных, так и дискретных функций;

высокая робастность и значительный успешный опыт использования ГА, подтверждаемые большим числом публикаций и продолжающимся активным развитием.

Отметим также и недостатки ГА:

Парето-оптимальность полученных решений не гарантируется;

использование ГА сопряжено с большим количеством вычислений критериев.

Первые модификации ГА для многокритериальной оптимизации были предложены в [14 и 15] (Vector Evaluated Genetic Algorithm (VEGA)). Алгоритм параллельно использовал несколько ГА с одной из целевых функций каждый. Алгоритм не учитывал концепцию доминированности и был малоэффективен в сравнении с позже разработанными алгоритмами.

Ключевым моментом в развитии многокритериальных ГА стало использование концепции доминированности при сравнении особей. Для улучшения популяции необходимо выбирать только недоминируемые решения, что последовательно в процессе работы ГА приближает множество недоминируемых решений к множеству эффективных оценок. Свойством недоминированности обладают несколько решений в популяции, поэтому было предложено [16] использовать понятие «разреженности» (sharing) для выбора улучшаемого решения. Согласно [18] необходимо выбирать те недоминируемые решения, вблизи которых содержится наименьшее число недоминируемых решений, что позволяет равномерно заполнять множество эффективных оценок и обеспечить разнообразие в популяции. На основе понятий доминированности и разреженности созданы различные алгоритмы и их последующие модификации. Наиболее известные из них:

NPGA (Niche Pareto Genetic Algorithm) [17];

FFMOGA (Fonseca and Fleming's GA for Multiobjective Optimization) [18];

NSGA (Non-dominated Sorting Genetic Algorithms) [19, 20];

SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) [21, 22];

PESA (Pareto Envelope-based Selection Algorithm) [23, 24].

Параллельно развивались алгоритмы, работающие по принципу декомпозиции, учитывающие локальную информацию о поведении целевых функций [25–27]. Существуют также и менее эффективные версии генетических алгоритмов, которые не нашли широкого применения [28–32].

**Многокритериальная оптимизация настроек фазоворотного трансформатора (ФПТ).** Рассмотрим оптимизацию настроек ФПТ установленного на ПС 500 кВ Ульке в Актюбинском районе Казахстана, одного из немногих эксплуатируемых на территории СНГ ФПТ. Актюбинский район является дефицитным, 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 российскими ВЛ 220 кВ. Параллельная работа сетей 220 и 500 кВ приводит к существенному недоиспользованию линии 500 кВ и перегрузке российских линий. Оптимизацию настроек ФПТ, установленного на ПС 500 кВ Ульке, выполним по следующим критериям:

- 1) максимизация потока по ВЛ 500 кВ Житикара–Ульке ( $P_{ВЛ}$ , МВт);
- 2) минимизация потерь активной мощности в сетях 110 кВ и выше Актюбинского района ( $\Delta P$ , МВт);
- 3) минимизация отклонений от заданных значений напряжений узлов нагрузки Актюбинского района ( $\Delta U$ , %).

Расчет установившихся режимов выполнен с использованием программно-вычислительного комплекса «RastrWin» ([www.rastrwin.ru](http://www.rastrwin.ru)). Расчетная модель включает однолинейную схему замещения сетей 110 кВ и выше ОЭС Сибири, Урала и ЭС Казахстана, сформированную по данным контрольных

замеров 2013 г. Параметры схемы замещения ФПТ рассчитываются согласно [33]. Расчетная модель содержит 1598 узлов, 2518 ветвей, общая нагрузка – 79,2 ГВт, нагрузка Актюбинского района – 712 МВт.

Регулирование потоков активной мощности по сети 500 и 220 кВ ФПТ обеспечивает изменение коэффициентов трансформации между обмотками ВН и СН (РПН  $\pm 8' 1,5\%$ ), а также между возбуждающей и регулировочной обмотками (РПН  $+16' 6,25\%$ ), что дает 289 различных значений настроек ФПТ. Поэтому в данной задаче множество Парето для выбора оптимальных настроек ФПТ можно найти перебором. Графическое представление множеств решений и эффективных оценок в пространстве критериев показано на рис. 1.

Анализ представленных на рис. 1 множеств эффективных оценок показывает, что при использовании всех трех критериев большинство решений являются эффективными (269 из 289), что является незначительным сужением области выбора. При учете только двух критериев качества – потока мощности по ВЛ 500 кВ и потерь активной мощности (см. рис. 1, б) – число эффективных решений снижается до 100, так как эти критерии конфликтуют (увеличение потока активной мощности приводит к увеличению потерь). Таким образом, анализируя множество эффективных оценок, можно находить зависимости между критериями качества.

Одному значению потока активной мощности (например 250 МВт) может соответствовать не-

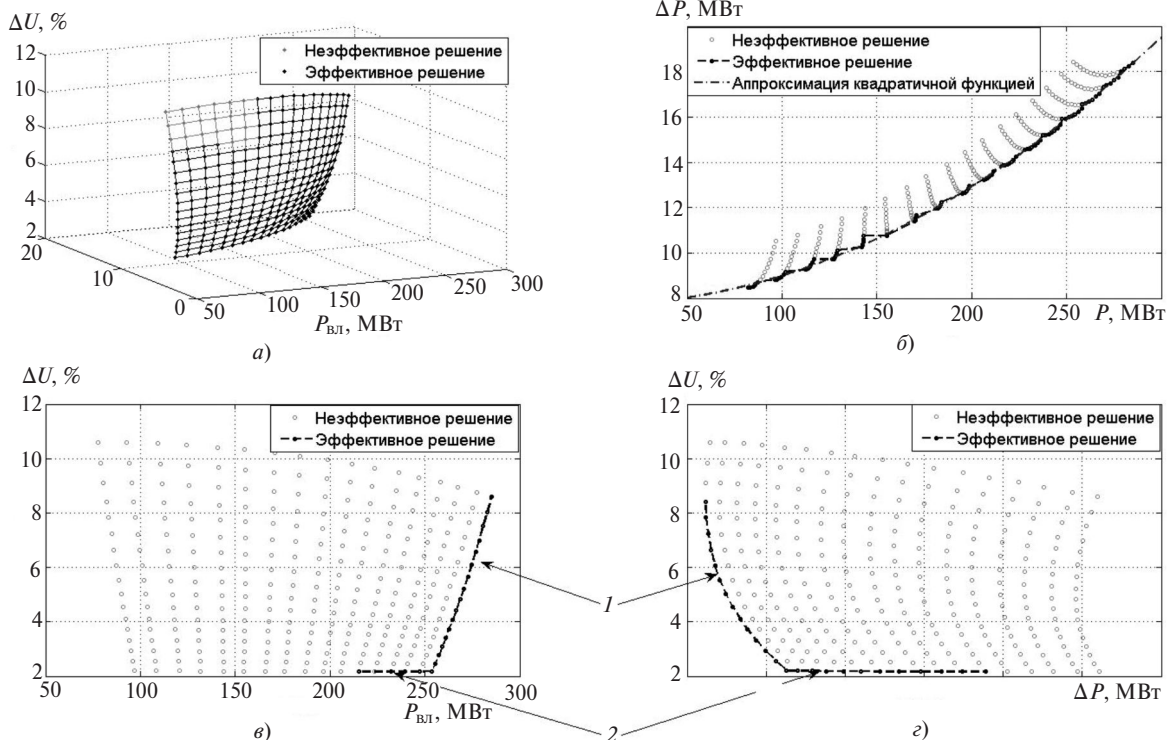


Рис. 1. Множество решений и множество эффективных оценок для оптимизации настроек ФПТ

сколько различных комбинаций положений РПН ВДТ и АТ, однако оптимально только одно решение. Для потока мощности 250 МВт по ВЛ 500 кВ 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 элемент, а для 2-го и 3-го критериев 25 элементов (см. рис. 1, в и г). Относительно небольшой размер множества Парето объясняется связью между критериями:

для 1-го и 3-го критериев увеличение потока мощности по ВЛ 500 кВ приводит к снижению напряжения на шинах 110 кВ и у потребителя;

для 2-го и 3-го критериев снижение напряжения приводит к увеличению потерь на передачу мощности.

Участки 1 множества эффективных оценок на рис. 1, в и г оптимальны с точки зрения управляемости, так как обеспечивают изменение контролируемых критериев вдоль множества эффективных оценок. Участки 2 близки к горизонталям, хотя решения, составляющие их, и входят во множество Парето, однако работать при таких настройках не следует, так как изменение настроек ФПТ на данном участке изменяет только один из критериев. Незначительное изменение режима приведет к резкому ухудшению одного из критериев (резкий рост потерь) или выходу режима из оптимальной зоны. Стоит отметить, что при скалярной оптимизации  $DU \rightarrow \min$  в качестве оптимального решения будет 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 кВ.

Полученные множества эффективных оценок показывают неэффективность методов свертки, так на практике этим методом невозможно получить решения, составляющие участок 1 в силу его прямолинейности. Трудности использования минимаксной свертки создает большая разница между абсолютными значениями функционалов (проблема априорного масштабирования); так поток мощности по ВЛ меняется в диапазоне 215–285 МВт, а отклонение напряжения – в диапазоне 2,1–8,6%.

**Многокритериальная оптимизация режима работы Кольской ЭЭС.** Рассматриваемая схема замещения Кольской ЭЭС содержит 452 узла, 527 ветвей и распределяет совокупную нагрузку в 1810 МВт. Оптимизация режимов проводится за счет изменения:

генерации реактивной мощности генераторных узлов (13 узлов),

отпаек трансформаторов (14 ветвей).

Перебор сочетаний настроек для поиска множества эффективных решений, как это было сделано

в предыдущей задаче, в данном случае невозможен, так как число возможных комбинаций параметров  $\sim 940^{14}$ . В качестве целевых функционалов рассматривались потери активной мощности ( $DP$ , МВт) и отклонение модуля напряжения в узлах нагрузки ( $DU$ , %).

При этом учитывались ограничения по току в ветвях, напряжению в узлах и ограничения на значение потока активной мощности по контролируемым сечениям. Для численного поиска множества, приближенного к множеству Парето, целесообразно использовать NSGA-II [20].

На рис. 2 представлены множества эффективных оценок, полученных при различном числе расчетов целевых функционалов, также для сравнения приведено множество оценок, полученное простым случайным поиском. Скорость вычисления целевых функционалов составила  $\sim 20$  шт./с при следующих параметрах ПК: IntelCore2 DUO 3 ГГц, ОЗУ 4 Гб. В рассмотренной задаче, с числом возможных комбинаций входных переменных более чем  $940^{14}$ , для получения приближения к множеству эффективных оценок достаточно 5000–25000 вычислений целевых функционалов, что требует от 25 до 1250 с. При этом эффективность использования генетического алгоритма на порядки превышает эффективность случайного поиска.

Многокритериальная оптимизация ЭЭС с использованием ГА сопряжена с большим числом вычислений целевых функционалов, каждый расчет которых требует расчета режима ЭЭС. Существенное (на порядки) ускорение этих вычислений возможно с использованием методик аппроксима-

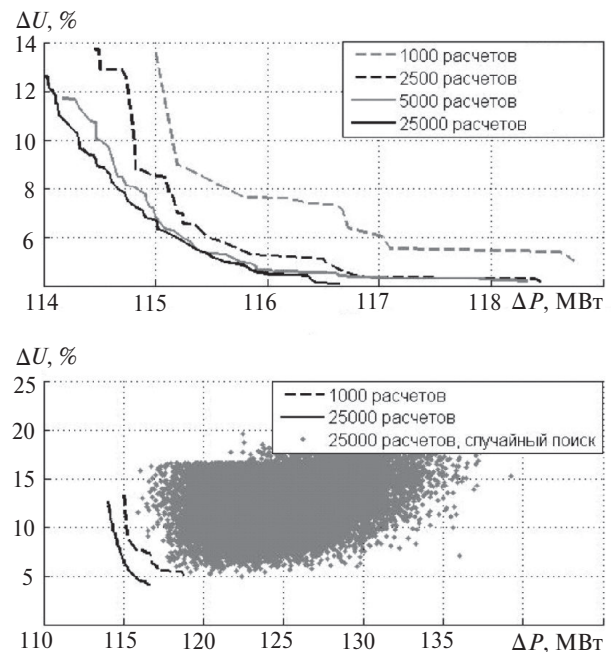


Рис. 2. Множество решений и множество эффективных оценок для Кольской ЭЭС; сравнение NSGA-II и метода случайного поиска

ции основных характеристик режимов, рассматриваемых в [34, 35].

**Заключение.** Применение предлагаемого векторного критерия качества для оптимизации режимов ЭЭС позволяет найти зависимости между целевыми функционалами, а также определить область настроек, в которой управление параметрами будет наиболее эффективно. При значительном числе варьируемых параметров, исключающем перебор, для построения множества эффективных оценок целесообразно применение специализированных модификаций генетического алгоритма (пример — многокритериальная оптимизация Кольской ЭЭС). В целом, по мнению авторов, использование векторных критериев и методов многокритериальной оптимизации целесообразно для оптимизации и управления режимами ЭЭС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Идельчик В.И.** Электрические системы и сети. — М.: Энергоатомиздат, 1989, 592 с.
2. **Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А.** Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. — М.: Энергоатомиздат, 1990, 352 с.
3. **Коровкин Н.В., Фролов О.В.Ю., Одинцов М.В., Нетребка К.И., Лысенко Г.С., Беляев Н.А., Язенин Р.А.** Энергосбережение и комплексные задачи электроэнергетики. — СПб: Изд-во Политехнического университета, 2014.
4. **Мисриханов М. Ш., Русина А.Г.** Инновационный подход к решению режимных задач при управлении электроэнергетическими системами. — Вестник ИНЭУ, 2012, № 3, pp. 1–6.
5. **Van Hertem D., Rimez J. and Belmans R.** Power Flow Controlling Devices as a Smart and Independent Grid Investment for Flexible Grid Operations: Belgian Case Study. — IEEE Transactions on Smart Grid, September 2013, vol. 4, №. 3, pp. 1656–1664.
6. **Lukomski R. and Wilkosz K.** Optimization of reactive power flow in a power system for different criteria: Stability problems. — 2013 8th Intern. Symposium «Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)», 23–25 May 2013, pp. 1–6.
7. **Asghari M. and Mohammadi J.** Fuzzy Multi-Objective OPF Considering Voltage Security and Fuel Emission Minimization. — Power and Energy Engineering Conf. 2012 Asia-Pacific (APPEEC), 27–29 March 2012, pp. 1–6.
8. **Belazzoug M. and Boudour M.** FACTS placement multiobjective optimization for reactive power system compensation. — 2010 7th Intern. Multi-Conference «Systems Signals and Devices (SSD)», 27–30 June 2010, pp. 1–6.
9. **Lombardi P., Stotzer M., Styczynski Z. and Orths A.** Multi-criteria optimization of an energy system within a Virtual Power Plant architecture. — Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. 24–29 July, 2011, pp. 1–6.
10. **Xu Daming and Kang Longyun.** Multi-criteria Optimization of Off-grid Renewable Energy Systems. — Proc. of 2013 35th Intern. Telecommunications Energy Conf. «Smart Power and Efficiency (INTELEC)», 13–17 Oct. 2013, pp. 1–5.
11. **Черноруцкий И.Г.** Методы принятия решений. — СПб: Изд-во БХВ-Петербург, 2005, 408 с.
12. **Luke S. Essentials of Metaheuristics.** A Set of Undergraduate Lecture Notes: <http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/Essentials.pdf>
13. **Holland J.P.** Adaptive algorithms for discovering and using general patterns in growing knowledge bases. — Intern. Journal of Policy Analysis and Information Systems, 1980, vol. 4, №. 3, pp. 245–268.
14. **Schaffer J.D.** Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. — Proc. First Int. Conf. on Genetic Algorithms, 1985, pp. 93–100.
15. **Wengiang Zhang, Fujimura S.** Improved Vector Evaluated Genetic Algorithms with Archive for Solving Multiobjective PPS Problem. — 2010 Intern. Conf. «E-Product E-Service and E-Entertainment (ICEEE)», 7–9 Nov. 2010, pp. 1–4.
16. **Goldberg D.E. and Richardson J.** Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization. — Proc. of the Second Intern. Conf. on Genetic Algorithms and their application. — Hillsdale, NJ (USA), 1987, pp. 41–49.
17. **Horn J., Nafpliotis N. and Goldberg D.E.** A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. 1994 IEEE World Congress on Computation Intelligence. Proc. of the First Conf. «Evolutionary Computation», 27–29 Jun 1994, vol. 1, pp. 82–87.
18. **Fonseca C.M. and Fleming P.J.** Genetic Algorithms for Multi-objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. — Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Genetic Algorithms, 1993, pp. 416–423.
19. **Srnivas N. and Deb K.** Multi-objective Optimization using Nondominated sorting in Genetic Algorithms. — Evolutionary Computations, 1993, vol. 2, №. 3, pp. 221–248.
20. **Deb K., Pratap A., Agarwal S. and Meyarivan T.** A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. — Evolutionary Computation IEEE Transactions on, 2002, vol. 6, №. 2, pp. 182–197.
21. **Zitzler E. and Thiele L.** Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. — Evolutionary Computation IEEE Transactions on, Nov. 1999, vol. 3, №. 4, pp. 257–271.
22. **Zitzler E., Laumanns M. and Lothar T.** SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. — Evolutionary Methods for Design, Optimization, and Control. — Barcelona, CIMNE, 2002, pp. 19–26.
23. **Knowles J. and Corne D.** The Pareto achieved evolution strategy: A new baseline algorithm for Pareto multiobjective optimization. — Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proc. of the 1999 Congress on (vol. 1). — Washington (DC), 1999, pp. 98–105.
24. **Corne D.W., Knowles J.D. and Oates M.J.** The Pareto-Envelope-based Selection Algorithm for Multiobjective Optimization. — Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. — Paris, 2000, pp. 839–848.
25. **Ishibuchi H., Murata T.** Multi-objective Genetic Local Search algorithms. — Proc. of the 1996 Int. Conf. on Evolutionary Computation, 1996, pp. 119–124.
26. **Jaszkiewicz A., Hapke M. and Kominek P.** Performance of multiple objective evolutionary algorithms on a distribution system design problem — Computational experiment. — Proc. of 1st Intern. Conf. on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. — Zurich, 2001.
27. **Zhang Q. and Li H.** A Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. — IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2007, vol. 11, №. 6, pp. 712–731.
28. **Kursawe F.** A Variant of Evolution Strategies for Vector Optimization. — Volume 496 of Lecture Notes in Computer Science. — Berlin: Springer-Verlag, 1991, pp. 193–197.
29. **Laumanns M., Rudolph G. and Schewefel H.** A Spatial Predator-Prey Approach to Multi-objective Optimization: A Preliminary Study. — Parallel Problem Solving from Nature PPSN V. — Amsterdam, 1998, pp. 241–249.

30. Kita H., Yabumoto Y., Mori N. and Nishikawa Y. Multi-objective Optimization by Means of the Thermodynamical Genetic Algorithm. – Parallel Problem Solving from Nature PPSN IV. – Berlin, 1996, pp. 504–512.

31. Eschenauer H., Koski J., Osyczka A. Multicriteria Design Optimization: Procedures and Applications. – Springer, 1990, 482 p.

32. Osyczka A. and Kundu S. A New Method to Solve Generalized Multi-criteria Optimization Problems using the Simple Genetic Algorithm. – Structural optimization, 1995, vol. 10, No. 2, pp. 94–99.

33. Евдокунин Г.А. и др. ФПТ впервые в СНГ применен в Казахстане. – Новости электротехники, 2008, vol. 6, №. 48, с. 38–41.

34. Коровкин Н.В. и Фролов О.В. Новый подход к исследованию режимов работы энергосистем. – 83-й Межд. научн. сем. «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» им. Ю.Н. Руденко. – Иваново, 2011, с. 289–208.

35. Беляев Н.А., Коровкин Н.В., Фролов О.В., Чудный В.С. Использование билинейной теоремы для решения задач оптимизации потоков мощности в энергосистемах. – Электротехнические комплексы и системы управления, 2012, vol. 1, с. 77–80.

[6.11.14]

Авторы: **Коровкин Николай Владимирович** окончил электромеханический факультет Ленинградского

политехнического института (ныне Национальный исследовательский Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (НИСПбГПУ) в 1977 г. В 1997 г. защитил докторскую диссертацию «Построение синтетических схем для численного анализа электромагнитных процессов, описываемых жесткими уравнениями. Профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» НИСПбГПУ.

**Одинцов Михаил Вячеславович** окончил магистратуру НИСПбГПУ в 2010 г., инженер лаборатории схем выдачи мощности электрических станций и схем внешнего электроснабжения потребителей Научно-технического центра Единой энергетической (ОАО «НТЦ УЭС»), аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» института энергетики и транспортных систем НИСПбГПУ.

**Фролов Олег Валерьевич** окончил электромеханический факультет (ЭМФ) СПбГТУ в 1995 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Оптимизация режимов энергосистемы северо-запада на основе применения фазорегулирующих устройств». Генеральный директор ОАО «НТЦ ЭЭС».

*Elektrichestvo (Electricity)*, 2015, No. 1, pp. 13–19.

## Control of Power System Steady-State Operating Modes Using a Vector Quality Criterion

N.V. KOROVKIN, M.V. ODINTSOV, and O.V. FROLOV

*The operating modes of electric power systems are characterized by a large number of possible states, all of which are characterized by a set of independent indicators reflecting reliability, stability, economic efficiency, etc. These indicators are interpreted as operating mode quality criteria. For comprehensively estimating the operating mode quality, a vector quality criterion is introduced. Accordingly, for searching the set of best operating modes, multicriterion optimization is used, which is also regarded as a method for making efficient decisions. The traditionally used methods for constructing the sets of best solutions (such as the main criterion method, the linear convolution method, and so on) are in many respects subjective and are efficient only if the person who makes decisions has considerable experience in the relevant field. The set of efficient solutions is estimated using a genetic algorithm. An analysis of the pattern in which elements of this set are distributed in the space of criteria makes it possible to reveal the zones of optimal control. The proposed graphic approach to representing the sets of efficient solutions opens the possibility of adopting less subjective decisions, thus improving their quality.*

Key words: power system, operating modes, multicriterion optimization, vector quality criterion

### REFERENCES

1. Idel'chik V.I. *Elektricheskiye sistemy i seti* (Electrical networks and systems). Moscow, Publ. «Energoatomizdat», 1989, 592 p.
2. Venikov V.A., Zhuravlev V.G., Filippova T.A. *Optimizatsiya rezhimov elektrostantsii i energosistem* (Optimization of power plants and power systems). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1990, 352 p.
3. Kоровкин N/V., Frolov O.V., Odintsov M.V. *Energoberezheniye i kompleksnye zadachi elektroenergetiki* (Energy saving and complex problems of electric power engineering). St. Petersburg, Publ. St. Petersburg Polytechnic University, 2014, p.
4. Misrikhanov M.Sh., Rusina A.G. *Vestnik INEU (Bulletin of the INEU)*, 2012, No. 3, pp. 1–6.

5. Van Hertem D., Rimez J. and Belmans R. Power Flow Controlling Devices as a Smart and Independent Grid Investment for Flexible Grid Operations: Belgian Case Study. – IEEE Transactions on Smart Grid, September 2013, vol. 4, No. 3, pp. 1656–1664.

6. Lukomski R. and Wilkosz K. Optimization of reactive power flow in a power system for different criteria: Stability problems. – 2013 8th Intern. Symposium Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 23–25 May 2013, pp. 1–6.

7. Asghari M. and Mohammadi J. Fuzzy Multi-Objective OPF Considering Voltage Security and Fuel Emission Minimization. – Power and Energy Engineering Conf., 2012 Asia-Pacific (APPEEC), 27–29 March 2012, pp. 1–6.

8. **Belazzoug M. and Boudour M.** FACTS placement multiobjective optimization for reactive power system compensation. – 2010 7th Intern. Multi-Conference Systems Signals and Devices (SSD), 27–30 June 2010, pp. 1–6.
9. **Lombardi P., Stotzer M., Styczynski Z. and Orths A.** Multi-criteria optimization of an energy system within a Virtual Power Plant architecture. – Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. 24–29 July, 2011, pp. 1–6.
10. **Xu Daming and Kang Longyun.** Multi-criteria Optimization of Off-grid Renewable Energy Systems. – Proc. of 2013 35th Intern. Telecommunications Energy Conf. «Smart Power and Efficiency (INTELEC)», 13–17 Oct. 2013, pp. 1–5.
11. **Chernorutskii I.G.** *Metody prinyatiya reshenii* (Decision-making Methods). St. Petersburg: BKhV-Petersburg, 2005, 408 p.
12. **Luke S.** Essentials of Metaheuristics. A Set of Undergraduate Lecture Notes: <http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/Essentials.pdf>
13. **Holland J.P.** Adaptive algorithms for discovering and using general patterns in growing knowledge bases. – Intern. Journal of Policy Analysis and Information Systems, 1980, vol. 4, No. 3, pp. 245–268.
14. **Schaffer J.D.** Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. – Proc. First Int. Conf. on Genetic Algorithms. 1985, pp. 93–100.
15. **Wengiang Zhang, Fujimura S.** Improved Vector Evaluated Genetic Algorithms with Archive for Solving Multiobjective PPS Problem. – 2010 Intern. Conf. E-Product E-Service and E-Entertainment (ICEEE), 7–9 Nov. 2010, pp. 1–4.
16. **Goldberg D.E. and Richardson J.** Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization. – Proc. of the Second Intern. Conf. on Genetic Algorithms and their application. – Hillsdale, NJ (USA), 1987, pp. 41–49.
17. **Horn J., Nafpliotis N. and Goldberg D.E.** A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. 1994 IEEE World Congress on Computation Intelligence. Proc. of the First Conf. – Evolutionary Computation, 27–29 Jun 1994, vol. 1, pp. 82–87.
18. **Fonseca C.M. and Fleming P.J.** Genetic Algorithms for Multi-objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. – Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Genetic Algorithms, 1993, pp. 416–423.
19. **Srnivas N. and Deb K.** Multi-objective Optimization using Nondominated sorting in Genetic Algorithms. – Evolutionary Computations, 1993, vol. 2, No. 3, pp. 221–248.
20. **Deb K., Pratap A., Agarwal S. and Meyarivan T.** A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. – Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 2002, vol. 6, No. 2, pp. 182–197.
21. **Zitzler E. and Thiele L.** Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. – Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, Nov. 1999, vol. 3, No. 4, pp. 257–271.
22. **Zitzler E., Laumanns M. and Lothar T.** SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. – Evolutionary Methods for Design, Optimization, and Control. – Barcelona, CIMNE, 2002, pp. 19–26.
23. **Knowles J. and Corne D.** The Pareto achieved evolution strategy: A new baseline algorithm for Pareto multiobjective optimization. – Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proc. of the 1999 Congress on vol. 1. – Washington (DC). 1999, pp. 98–105.
24. **Corne D.W., Knowles J.D. and Oates M.J.** The Pareto-Envelope-based Selection Algorithm for Multiobjective Optimization. – Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. – Paris, 2000, pp. 839–848.
25. **Ishibuchi H., Murata T.** Multi-objective Genetic Local Search algorithms. – Proc. of the 1996 Int. Conf. on Evolutionary Computation, 1996, pp. 119–124.
26. **Jaszkiewicz A., Hapke M. and Kominek P.** Performance of multiple objective evolutionary algorithms on a distribution system design problem – Computational experiment/ – Proc. of 1st Intern. Conf. on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. – Zurich, 2001.
27. **Zhang Q. and Li H.** A Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. – IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2007, vol. 11, No. 6, pp. 712–731.
28. **Kursawe F.** A Variant of Evolution Strategies for Vector Optimization. – Volume 496 of Lecture Notes in Computer Science. – Berlin: Springer-Verlag, 1991, pp. 193–197.
29. **Laumanns M., Rudolph G. and Schewefel H.** A Spatial Predator-Prey Approach to Multi-objective Optimization: A Preliminary Study. – Parallel Problem Solving from Nature PPSN V: Amsterdam, 1998, pp. 241–249.
30. **Kita H., Yabumoto Y., Mori N. and Nishikawa Y.** Multi-objective Optimization by Means of the Thermodynamical Genetic Algorithm. Parallel Problem Solving from Nature PPSN IV: Berlin, 1996, pp. 504–512.
31. **Eschenauer H., Koski J., Osyczka A.** Multicriteria Design Optimization: Procedures and Applications. – Springer, 1990, 482 p.
32. **Osyczka A. and Kundu S.** A New Method to Solve Generalized Multi-criteria Optimization Problems using the Simple Genetic Algorithm. – Structural optimization, 1995, vol. 10, No. 2, pp. 94–99.
33. **Evdokunin G.A. et al.** *Novosti elektrotehniki (News of Electrical Engineering)*, 2008, vol. 6, No. 48, pp. 38–41.
34. **Korovkin N.V., Frolov O.V.** *Novyi podkhod k issledovaniyu rezhimov raboty energosistem. – 83 Mezhdunarod. nauchn. seminar «Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki»* (A new approach to the study of operating conditions of power systems). – 83th Inter. Sci. Seminar «Methodical research questions the reliability of large power systems». Ivanovo, 2011.
35. **Belyayev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudnyi V.S.** *Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy* (Electrical Engineering Complexes and Systems), 2012, vol. 1, pp. 77–80.

*Authors: Korovkin Nikolai Vladimirovich (St. Petersburg, Russia) – Doctor Techn. Sci., Head of the Department, National Scientific St. Petersburg State Polytechnical University (NSSPbSPU).*

*Odintsov Mikhail Vyacheslavovich (St. Petersburg, Russia) – Ph.D. Student at the NSSPbSPU, Engineer of the JSC «Scientific and Technical Centre of the Unified Energy System» (STC UES).*

*Frolov Oleg Vasil'yevich (St. Petersburg, Russia) – Cand. Techn. Sci., General director of the JSC «STC UES».*

