

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.31

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32101>



К.С. Долбин  , Н.В. Коровкин, И.С. Воронин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 kirill.dolbin.02@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Аннотация. Ключевым направлением оптимизации режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) является внедрение устройств продольной компенсации (УПК). В настоящей работе решается задача определения оптимальных параметров активно-адаптивных устройств в ЭЭС большой размерности. Определение параметров осуществляется для заранее известного множества перспективных мест установки УПК, представленного в виде фронта Парето и полученного с помощью многопоточного генетического алгоритма. Представлен метод формирования целевых функций оптимизации, базирующийся на теории чувствительности электрических цепей. При составлении целевых функций используются критерии статической и динамической устойчивости, а также анализ установившихся режимов ЭЭС, что направлено на комплексное повышение надежности ЭЭС. Практическая значимость подхода демонстрируется на примере расчета типовой сети IEEE с 300 узлами. Результаты представлены в виде множеств Парето-оптимальных решений для различных вариантов расстановки УПК в сети. Предварительно необходимо решить задачу расстановки устройств в ЭЭС, которая была рассмотрена нами ранее.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм, устройства продольной компенсации, оптимальные параметры активно-адаптивных устройств, билинейная теорема.

Благодарности: Исследование выполнено за счет субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ (Соглашение №075-15-2025-532).

Для цитирования:

Долбин К.С., Коровкин Н.В., Воронин И.С. Определение оптимальных параметров активно-адаптивных устройств для моделей энергосистем большой размерности // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 1. С. 7–21. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32101>



K.S. Dolbin ✉, *N.V. Korovkin*, *I.S. Voronin*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ kirill.dolbin.02@mail.ru

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF ACTIVE ADAPTIVE DEVICES FOR LARGE-SCALE POWER SYSTEM MODELS

Abstract. A key direction in optimizing the operating modes of electric power systems (EPS) is the introduction of series compensation devices (SCDs). The paper addresses the problem of determining the optimal parameters of active-adaptive devices in large-scale EPS. The parameters are determined for a pre-known set of prospective SCD installation sites, represented as a Pareto front and obtained using a multithreaded genetic algorithm. A method for formulating optimization objective functions based on the theory of sensitivity of electrical circuits is presented. The objective functions are formulated using criteria of static and dynamic stability, as well as an analysis of steady-state operating modes of the EPS, which is aimed at comprehensively improving the reliability of the EPS. The practical significance of the approach is demonstrated by the calculation example for a typical IEEE network with 300 nodes. The results are presented in the form of sets of Pareto-optimal solutions for various options for the placement of SCD in the network. Preliminary work requires solving the problem of arranging devices in the EPS, which was previously addressed by the authors.

Keywords: electric power system, multicriteria optimization, genetic algorithm, series compensation devices, optimal parameters of active adaptive devices, bilinear theorem.

Acknowledgements: The study was carried out using a subsidy from the federal budget to higher education institutions for the implementation of activities aimed at supporting student scientific communities (Agreement No. 075-15-2025-532).

Citation:

Dolbin K.S., Korovkin N.V., Voronin I.S., Determination of optimal parameters of active adaptive devices for large-scale power system models, *Global Energy*, 32 (01) (2026) 7–21, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32101>

Введение. Активно-адаптивные устройства (ААУ) являются одним из ключевых элементов модернизации электроэнергетики, обеспечивающим гибкое управление режимами работы электроэнергетической системы (ЭЭС) [1, 2]. Их способность оперативно изменять параметры сети позволяет решать задачи повышения статической и динамической устойчивости. Среди многообразия ААУ особую роль играют устройства продольной компенсации (УПК), которые посредством изменения реактивного сопротивления линий электропередач (ЛЭП) влияют на напряжения и потоки мощности в ЭЭС [3–5]. Внедрение УПК порождает комплекс задач, среди которых можно выделить следующие: определение оптимальной расстановки УПК, расчет оптимальных параметров УПК для выбранной конфигурации и разработка алгоритмов управления УПК. Настоящая статья рассматривает задачи определения оптимальных параметров УПК при условии, что их местоположение в сети уже известно и предварительно обосновано.

Актуальность этой задачи обусловлена тем, что традиционные методы оптимизации, основанные на многократном расчете установившихся режимов, требуют значительных вычислительных ресурсов. Поскольку расчет установившегося режима сводится к решению системы

нелинейных уравнений, время определения параметров УПК может на порядок и более превышать время актуальности самого режима ЭЭС, что делает невозможной их настройку в реальном времени. Совершенствование вычислительной техники в обозримой перспективе не позволяет устранить этот разрыв [6, 7]. Это особенно актуально для моделей ЭЭС большой размерности.

Работа направлена на разработку метода, позволяющего быстро (в режиме реального времени) определять параметры предустановленных УПК, обеспечивающие оптимальный по заданным критериям установившийся режим работы ЭЭС. В работе принято обобщенное представление УПК как элемента, изменяющего эквивалентное реактивное сопротивление ЛЭП, что позволяет использовать подход для различных устройств: постоянный (неуправляемый) последовательный конденсатор, тиристорно-управляемый последовательный конденсатор (TCSC), статический синхронный последовательный компенсатор (SSSC), универсальный регулятор потока мощности (UPFC) как устройство, включающее функцию последовательной компенсации. Предварительно решается задача расстановки устройств в ЭЭС, рассмотренная нами в [8], где оптимальная расстановка УПК минимизирует совместное влияние на один элемент нескольких устройств и одновременно максимизирует число элементов ЭЭС, на которые воздействует УПК.

В настоящей работе под оптимальным понимается режим, обеспечивающий электроснабжение потребителей с минимальными потерями в сетевых элементах при соблюдении требований надежности и качества электроэнергии [9]. Эти требования формулируются в виде векторного критерия качества или вектора скалярных критериев [10, 11]:

- отклонение напряжений узлов ЭЭС от их номинальных значений (показатель качества электроэнергии);
- потери активной мощности в линиях электропередачи (экономичность);
- соблюдение допустимой пропускной способности ЛЭП (надежность).

Математическая формулировка этих критериев определяет вектор целевых функций, используемый в многоцелевой оптимизации. Минимизация данных критериев приводит также к повышению статической и динамической устойчивости [12] режима ЭЭС. Задачи такого типа известны ресурсоемкостью, связанной многократными расчетами статических режимов ЭЭС. Для уменьшения объема расчетов режимов в статье применяется теория чувствительности электрических цепей [13], в частности, билинейная теорема (БТ) используется в работе для определения аналитических соотношений между параметрами УПК и параметрами режима ЭЭС [14, 15]. За счет аппроксимации уравнений, описывающих взаимосвязи параметров УПК и характеристик режима ЭЭС, значительно (на порядки!) снижается трудоемкость решения многоцелевой задачи.

Для минимизации векторного критерия качества в работе используется генетический алгоритм (ГА), который, несмотря на простоту, успешно справляется с этой задачей [16]. Большое число работ рассматривает определение наилучшего алгоритма оптимизации [17–19], сокращающего время решения задачи в разы. В данной статье предлагается сосредоточиться на получении эффективных аналитических соотношений, описывающих влияние УПК на ЭЭС и позволяющих уменьшить время решения задачи на несколько порядков.

Целью работы являются разработка и анализ алгоритма определения оптимальных по заданным критериям параметров УПК в ЭЭС большой размерности, основанного на теории чувствительности и методах многокритериальной оптимизации, обеспечивающего возможность регулирования установившихся режимов ЭЭС в реальном времени.

Скалярные целевые функции

Для записи целевых функций необходимо определить соотношения между параметрами УПК и параметрами режима ЭЭС. Вывод этих соотношений подробно описан в [20]. Однако

ранее рассматривались варианты ЭЭС с малым числом устройств. Необходимые выражения для напряжений и мощностей имеют форму (1) и (2) соответственно.

$$\dot{U}_{n,k} = \frac{\dot{a}_{n,k} + \dot{b}_{n,k}x_k}{1 + \dot{c}_{n,k}x_k}. \quad (1)$$

Здесь $\dot{U}_{n,k}$ – комплекс напряжения n -го узла, x_k – сопротивление ЛЭП, в которой установлено УПК, $\dot{a}_{n,k}$, $\dot{b}_{n,k}$, $\dot{c}_{n,k}$ – комплексные константы.

$$\dot{S}_{l,k}^{(b)} = P_{l,k}^{(b)} + jQ_{l,k}^{(b)} = \frac{\dot{a}_{l,k}^{(b)} + \dot{b}_{l,k}^{(b)}x_k + \dot{c}_{l,k}^{(b)}x_k^2}{1 + \dot{d}_{l,k}^{(b)}x_k + \dot{e}_{l,k}^{(b)}x_k^2}. \quad (2)$$

Здесь $\dot{S}_{l,k}^{(b)}$ – комплексная мощность начала ЛЭП под номером l , x_k – сопротивление ЛЭП, в которой установлено УПК, $\dot{a}_{l,k}^{(b)}$, $\dot{b}_{l,k}^{(b)}$, $\dot{c}_{l,k}^{(b)}$, $\dot{d}_{l,k}^{(b)}$, $\dot{e}_{l,k}^{(b)}$ – комплексные константы. Индекс (b) обозначает начало ЛЭП, при записи аналогичного выражения для конца линии используется индекс (e) . Далее из решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) определяются комплексные константы в выражениях (1) и (2). Погрешность определения параметров режима и обусловленности матриц СЛАУ подробно рассмотрены в [20]. Важным преимуществом использования БТ является независимость констант от режима работы ЭЭС, их пересчет выполняется лишь в случае изменения конфигурации сети.

В качестве параметров оптимизации используются сопротивления линий, а параметры УПК определяются как разность значений сопротивлений ЛЭП исходного режима и результата решения задачи оптимизации. Для записи целевых функций используем аналитические выражения критериев оптимальности: девиации D_n напряжения (3), потерь ΔP_l активной мощности (4) в ЛЭП и пропускной способности p_l ЛЭП (5), позволяющие записать вектор $\mathbf{F} = \{f_1; f_2; f_3\}$ целевых функций (6).

$$D_n = \frac{|\dot{U}_{n,k}| - U_{0,n}}{U_{0,n}}; \quad (3)$$

$$\Delta P_l = P_{l,k}^{(b)} - P_{l,k}^{(e)}; \quad (4)$$

$$p_l = \begin{cases} P_{l,k}^{(b)} - 0.8P_{nom}, & P_{l,k}^{(b)} \geq 0.8P_{nom} \\ 0.4P_{nom} - P_{l,k}^{(b)}, & P_{l,k}^{(b)} \leq 0.4P_{nom} \end{cases}, \quad (5)$$

где $U_{0,n}$ – напряжение узла n режима без УПК, P_{nom} – номинальная мощность линии l .

$$\mathbf{F} = \left\{ \sqrt{\frac{\sum_n D_n^2}{card(N)}}, \sqrt{\frac{\sum_l \Delta P_l^2}{card(L)}}, \sqrt{\frac{\sum_l p_l^2}{card(L)}} \right\}, \forall_{n \in N}, \forall_{l \in L}. \quad (6)$$

Финальная запись целевых функций (7.1–7.3) с применением БТ $\forall_{n \in N}, \forall_{l \in L}, \forall_{k \in K \subseteq L}$ имеет вид:

$$f_1 = \sqrt{\frac{1}{card(N)} \sum_n \frac{1}{U_{0,n}^2} \left(\left| \frac{\dot{a}_{n,k} + \dot{b}_{n,k}x_k}{1 + \dot{c}_{n,k}x_k} \right| - U_{0,n} \right)^2}; \quad (7.1)$$

$$f_2 = \sqrt{\frac{1}{\text{card}(L)} \sum_l \left(\Re \left(\frac{\dot{a}_{l,k}^{(b)} + \dot{b}_{l,k}^{(b)} x_k + \dot{c}_{l,k}^{(b)} x_k^2}{1 + \dot{d}_{l,k}^{(b)} x_k + \dot{e}_{l,k}^{(b)} x_k^2} - \frac{\dot{a}_{l,k}^{(e)} + \dot{b}_{l,k}^{(e)} x_k + \dot{c}_{l,k}^{(e)} x_k^2}{1 + \dot{d}_{l,k}^{(e)} x_k + \dot{e}_{l,k}^{(e)} x_k^2} \right) \right)^2}; \quad (7.2)$$

$$f_3 = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{\text{card}(L)} \sum_l \left(\Re \left(\frac{\dot{a}_{l,k}^{(b)} + \dot{b}_{l,k}^{(b)} x_k + \dot{c}_{l,k}^{(b)} x_k^2}{1 + \dot{d}_{l,k}^{(b)} x_k + \dot{e}_{l,k}^{(b)} x_k^2} \right) - 0.8P_{nom} \right)^2}, & P_l \geq 0.8P_{nom} \\ \sqrt{\frac{1}{\text{card}(L)} \sum_l \left(0.4P_{nom} - \Re \left(\frac{\dot{a}_{l,k}^{(b)} + \dot{b}_{l,k}^{(b)} x_k + \dot{c}_{l,k}^{(b)} x_k^2}{1 + \dot{d}_{l,k}^{(b)} x_k + \dot{e}_{l,k}^{(b)} x_k^2} \right) \right)^2}, & P_l \leq 0.4P_{nom} \end{cases}. \quad (7.3)$$

Здесь N и L – множества узлов и ветвей графа ЭЭС, находящихся под воздействием УПК. Множество $K \subseteq L$ является множеством номеров ЛЭП, в которых установлены УПК. Для работы алгоритма и записи целевых функций узлы перенумеровываются, так как в исходных данных схемы IEEE-300 номера имеют техническое значение¹.

Алгоритм определения параметров УПК

Для определения оптимальных параметров УПК рассмотрены пять вариантов расстановки устройств, отличающиеся числом и положением устанавливаемых УПК. Предлагаемый алгоритм исследуется на неоднократно рассмотренной различными группами исследователей схеме IEEE-300², используемой здесь в качестве тестовой для верификации подхода авторов и оценки возможности его использования в режиме реального времени. Варианты расстановки УПК представлены в табл. 1, где порядковые номера ветвей соответствуют указанным выше данным³, на рис. 1 обозначены темно-коричневым цветом. Зеленым цветом выделены позиции УПК при расстановке шести УПК, красными и синими треугольниками – варианты расстановки для семи УПК, а окружностями тех же цветов – для восьми УПК (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Варианты расстановки устройств

Table 1

Device placement options

Расстановка УПК	Номера ветвей с устройствами	Обозначение на схеме
6	60, 82, 128, 214, 317, 332	зеленый
7.1	60, 82, 128, 185, 214, 317, 332	красный треугольник
7.2	53, 82, 128, 164, 214, 317, 332	синий треугольник
8.1	53, 82, 128, 164, 185, 214, 317, 332	красная окружность
8.2	53, 82, 128, 164, 175, 214, 317, 332	синяя окружность

Все рассматриваемые расстановки УПК не имеют узлов и(или) ветвей, находящихся под воздействием более чем одного УПК, метод получения таких расстановок рассмотрен нами в [8].

¹ Отдел энергетики Института социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра УрО Российской АН. Тестовые схемы. Режим доступа: http://energy.komisc.ru/dev/test_cases#Link_3 (дата обращения: 11.10.2025).

² Там же.

³ Там же.

Это позволяет использовать однопараметрическую запись БТ, что значительно упрощает оценку целевых функций и позволяет использовать рассматриваемый подход для моделей относительно большой размерности. Именно поэтому в качестве схемы для исследования предлагаемого подхода выбрана IEEE-300 узловая схема, в то время как большинство исследователей решает аналогичные задачи на схемах в несколько десятков узлов [6, 7, 9].

Для снижения вычислительной сложности задачи, помимо определения констант БТ, одновременно определяется и зона влияния УПК. Как показано в [15], для моделей ЭЭС малой размерности зоны действия устройств на напряжения узлов и мощности, передаваемые по линиям, существенно различаются. При фиксированной расстановке УПК рассчитываются и хранятся данные о зонах влияния устройства. Для определения зоны влияния УПК рассчитываются режимы ЭЭС при установке одного устройства с нулевым и максимальным значениями его параметра, из которых определяются отклонения напряжений в узлах и изменения активных мощностей линий. Отклонения напряжения вычисляются по формуле (3), аналогично вычисляются и отклонения активной мощности в начале линии. Формально каждое устройство влияет на всю систему, поэтому введем понятие «слабого» влияния, когда относительное изменение мощности и напряжения при действии УПК не превосходит 1%. Величина такого порога обоснована в [15] и уже для схем малой размерности существенно упрощает расчеты, не снижая их валидности. Информация о зонах влияния хранится в матрицах размерности $card(K)*card(L)$ и $card(K)*card(N)$ для мощности и напряжения соответственно, а элементы матриц определяются формулами (8).

$$\Delta_{k,l} = \begin{cases} 1, & D_l \geq 1\% \\ 0, & D_l < 1\% \end{cases}, \forall_{k \in K}, \forall_{l \in L}; \quad \Delta_{k,n} = \begin{cases} 1, & D_n \geq 1\% \\ 0, & D_n < 1\% \end{cases}, \forall_{k \in K}, \forall_{n \in N}. \quad (8)$$

В работе использованы относительные значения функций цели, нормирование выполнено с помощью вектора $\mathbf{F}_0 = \{f_{1,0}; f_{2,0}; f_{3,0}\}$, при подстановке значений сопротивления ЛЭП из исходных данных ЭЭС, соответственно, минимизируемая вектор функцию имеет вид:

$$\mathbf{F} = \{f_1/f_{1,0}; f_2/f_{2,0}; f_3/f_{3,0}\}. \quad (9)$$

Результаты применения алгоритма

Выполненные расчеты показали, что для определения оптимальных по выбранным критериям параметров УПК достаточно $\sim 2 \cdot 10^5$ оценок скалярных целевых функций. При стандартном подходе, не использующем БТ, столько же раз необходимо рассчитать установившийся режим в исследуемой цепи посредством специализированного программного обеспечения. Эта оценка справедлива при существенном дистанцировании рассчитываемых режимов от границ устойчивости, в противном случае число необходимых расчетов режима дополнительно увеличится. При использовании описанного в статье алгоритма число расчетов режима для шести одновременно установленных УПК составляет 30, для семи – 35 и для восьми – 40. Некоторое уменьшение времени оценки скалярных целевых функций с ростом числа устройств связано с лучшей сходимостью ГА. Повышение скорости сходимости ГА с увеличением числа устройств можно связать с повышением регулируемости ЭЭС, а именно – с увеличением числа элементов сети, зависимых от УПК. Число расчетных режимов определяется исключительно числом констант и числом УПК, следовательно, никак не зависит от изменения настроек ГА. Поэтому суммарная трудоемкость задачи поиска наилучших параметров УПК многократно снижается, позволяя управлять УПК в реальном времени. Полученные в результате работы алгоритма множества Парето-оптимальных решений представлены на рис. 2.

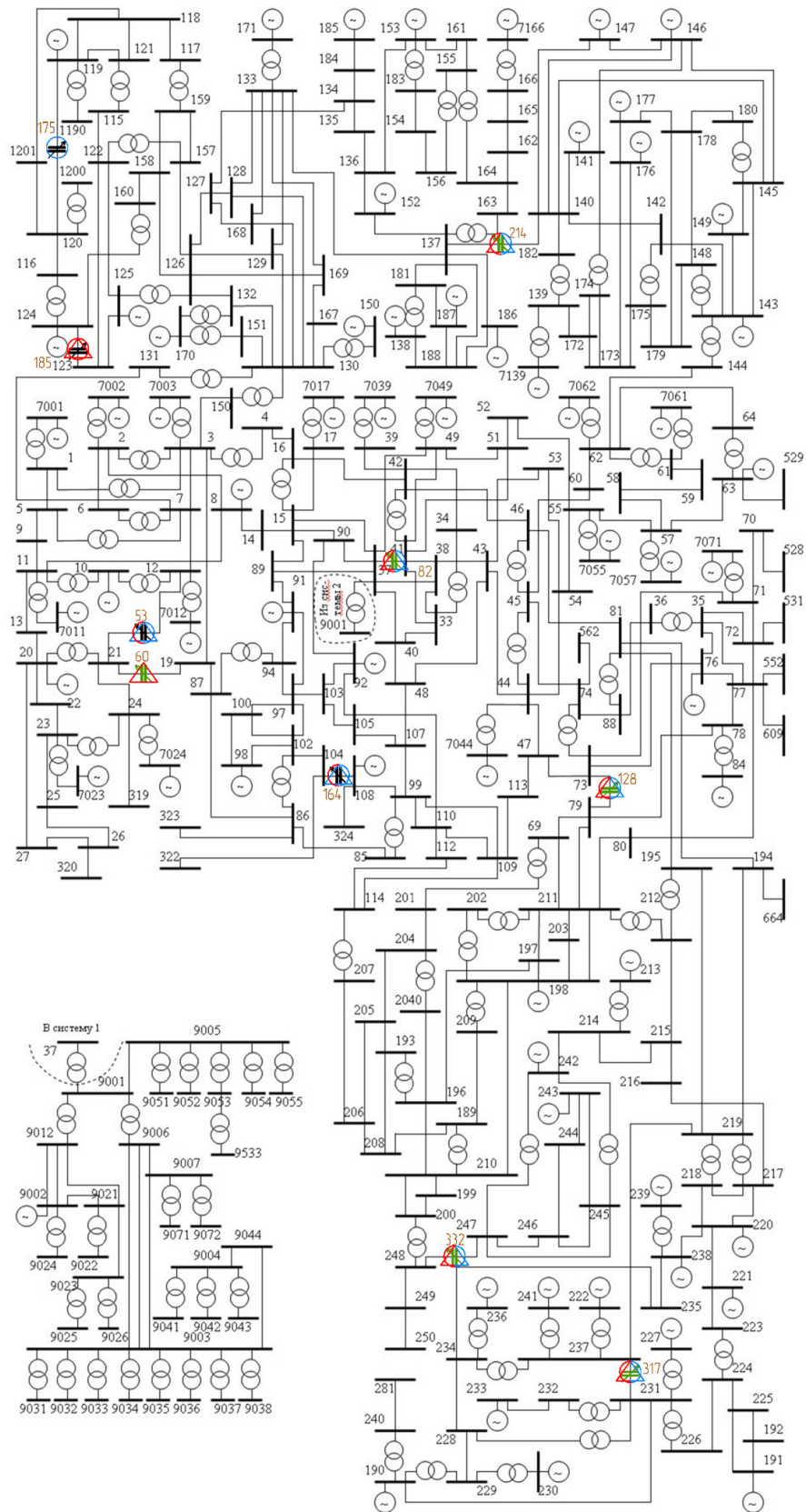


Рис. 1. Расстановка УПК на схеме IEEE-300

Fig. 1. IEEE-300 scheme with indication of the SCD arrangement

Решения, полученные с помощью ГА, представляют собой множество поверхностей (рис. 2). Детальный анализ подобных неструктурированных множеств обычно выполняется с применением методов кластеризации, что выходит за рамки настоящей статьи. Здесь для визуализации решений была выбрана поверхность с минимальными значениями целевых функций f_1 и f_2 .

Отметим ряд характерных свойств полученных фронтов Парето:

- снижение значений целевых функций в целом не превышает 3% и ожидаемо усиливается с увеличением количества УПК; для ряда вариантов расстановки изменение превышает 3% и 4%, что определяет наилучшие положения УПК;

- размерность всех полученных множеств Парето далека от 2D, ближе к 1D, что, во-первых, существенно сужает область поиска наилучшего режима и, во-вторых, несет важную количественную информацию о неочевидных функциональных связях критериев – так, снижение девиации напряжений узлов ведет к увеличению потерь в сетевых элементах (см. зависимости $f_2(f_1)$ на рис. 3–7);

- фронт Парето для шести УПК имеет три компоненты связности, для семи УПК – две, а для восьми УПК является односвязным, что, по нашему мнению, соответствует повышению управляемости режимом с увеличением количества УПК.

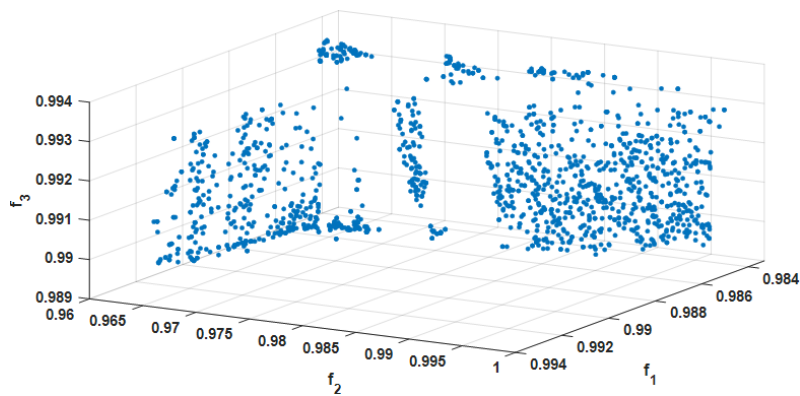


Рис. 2. Фронт Парето при установке восьми УПК (вариант 1)

Fig. 2. Pareto Front for eight SCDs (option 1)

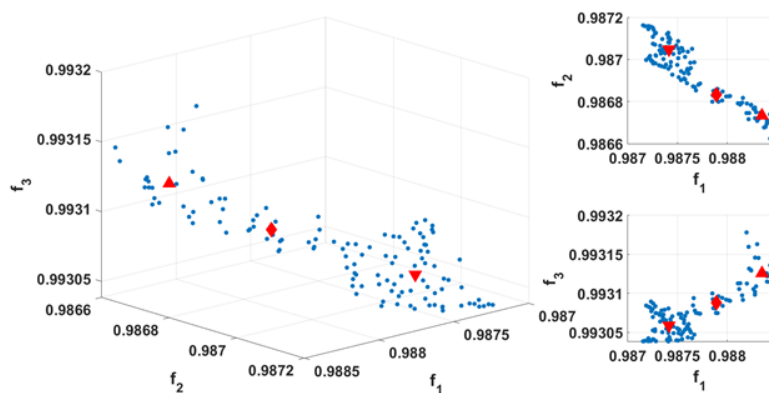


Рис. 3. Фрагмент фронта Парето при установке шести УПК

Fig. 3. Pareto front fragment for six SCDs

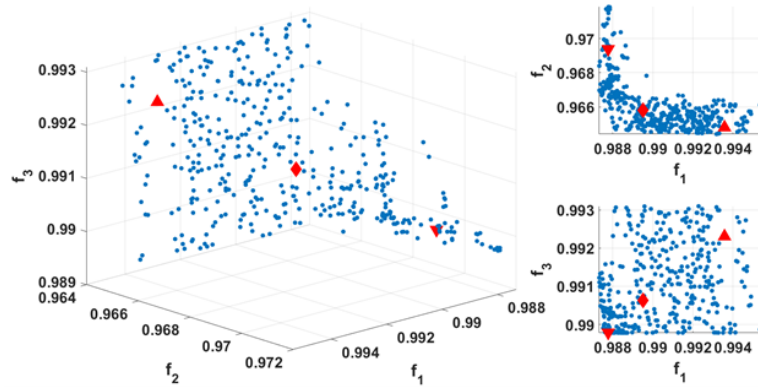


Рис. 4. Фрагмент фронта Парето при установке семи УПК (вариант 1)
 Fig. 4. Pareto front fragment for seven SCDs (option 1)

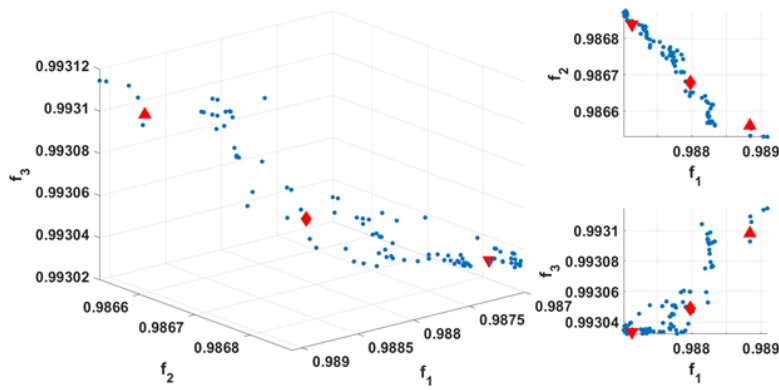


Рис. 5. Фрагмент фронта Парето при установке семи УПК (вариант 2)
 Fig. 5. Pareto front fragment for seven SCDs (option 2)

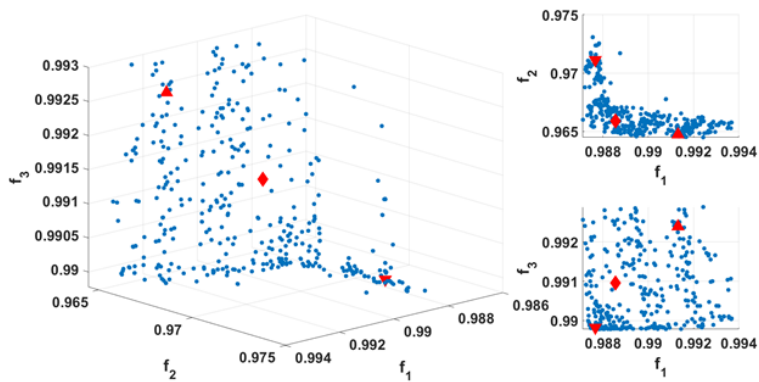


Рис. 6. Фрагмент фронта Парето при установке восьми УПК (вариант 1)
 Fig. 6. Pareto front fragment for eight SCDs (option 1)

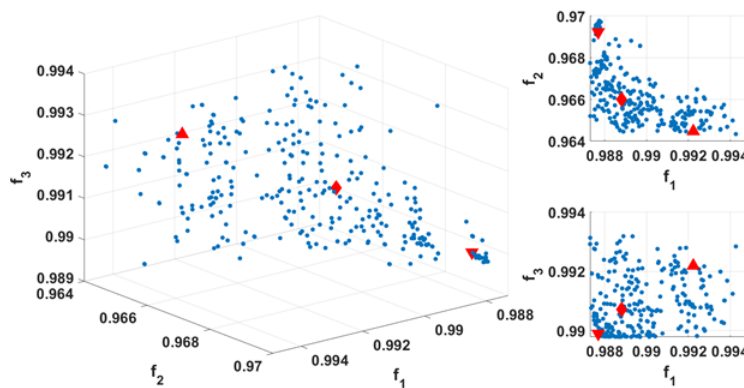


Рис. 7. Фрагмент фронта Парето при установке восьми УПК (вариант 2)

Fig. 7. Pareto front fragment for eight SCDs (option 2)

После получения множества Парето остается открытым один из наиболее сложных в многоцелевой оптимизации в целом вопрос о наилучшем решении. Очевидно, что изучение только свойств полученного решения не может дать ответа на этот вопрос, так как множество Парето уже содержит все оптимальные решения. Следовательно, для выбора «наилучшего» из них необходима дополнительная, не содержащаяся в постановке решенной задачи информация. К настоящему времени разработан ряд достаточно сложных алгоритмов сужения множества Парето [21, 22], рассмотрение которых выходит за рамки настоящей статьи. Здесь выполним разделение фронта Парето на три зоны (кластера) с различающимися значениями вектор-функций и выберем в каждой зоне одну характерную точку (помечены на рис. 2 маркерами « Δ », « \diamond » и « ∇ »). Характеристики выделенных точек сведены в табл. 2. В третьем столбце табл. 2 указаны сопротивления (приведенные к исходным значениям) для ЛЭП, оснащенных УПК, перечень соответствует порядку их нумерации в табл. 1. В четвертом столбце приведены относительные изменения целевых функций, в пятом – элементы ЭЭС, находящиеся под влиянием УПК, в последнем – значения относительного уменьшения девиации в зоне покрытия, а также суммарные скомпенсированные потери мощности для ЛЭП, входящих в эту зону.

Точки выбраны в порядке уменьшения относительно значений функции f_3 . Можно предположить, что наиболее перспективные кандидаты на наилучшее решение находятся в области 2, однако финальный выбор остается за лицом, принимающим решение (ЛПР), – диспетчером, ведущим режим, в нашем случае. Можно видеть, что полученные параметры УПК ведут к уменьшению девиации напряжения узлов в среднем на 1%, снижению потерь на 2,5%, увеличению пропускной способности примерно на 1% в зоне покрытия. Исходя из числа покрываемых элементов и диапазонов изменения целевых функций можно сказать, что наибольший потенциал для регулирования имеют варианты 7.1 и 8.1.

Дискуссия

Несмотря на эффективность предложенного алгоритма построения множества Парето и получения значений относительных целевых функций ниже единицы, вопрос сужения множества Парето остается открытым, и анализ получаемых оптимальных множеств требует дальнейшей проработки.

Исходно принятое положение об отсутствии совместного влияния нескольких УПК на элементы сети не всегда (не для всех схем) является корректным. Отказ от него потребует применения многопараметрической БТ и более точного определения зон влияния и параметров УПК, что усложнит алгоритм и увеличит время его работы. Тем не менее, по мнению авторов, использование предложенного подхода в реальном времени будет возможно.

Таблица 2

Представители множества Парето

Table 2

Representatives of the Pareto set

Расстановка УПК	Точка	Приведенный вектор параметров, %	Улучшение целевых функций, %	Число покрытых элементов ЭЭС		Суммарное регулирование	
				Узлы	Ветви	D, %	ΔP , МВт
6	1	99.2, 70.4, 95.5, 94.8, 99.2, 99.5	1.2, 1.3, 0.7	101	14	5.31	3.33
	2	99.6, 70.2, 96.1, 95.7, 98.8, 98.8	1.2, 1.3, 0.7	91	13	4.91	3.27
	3	99.4, 70.1, 88.5, 96.3, 98.9, 99.4	1.3, 1.3, 0.7	78	11	4.52	3.33
7.1	1	92.7, 96.7, 91.7, 98.7, 94, 89.7, 79.3	0.6, 3.5, 0.8	98	24	3.15	7.47
	2	92.7, 97.2, 91.7, 98.5, 95.7, 97.6, 74.9	1.0, 3.4, 0.9	82	22	2.31	7.57
	3	92.8, 82, 90.7, 96.7, 96.4, 99, 72.8	1.2, 3.1, 1.0	100	31	3.86	9.34
7.2	1	99.6, 70.3, 95.9, 97.8, 94.8, 99.3, 98.8	1.1, 1.3, 0.7	107	13	5.61	3.27
	2	99.3, 70.1, 96.1, 96.8, 95.7, 99.5, 97.	1.2, 1.3, 0.7	99	13	5.15	3.27
	3	99.7, 70, 87.9, 96.9, 96, 100, 99.3	1.3, 1.3, 0.7	92	13	4.87	3.32
8.1	1	92.7, 97.1, 95.3, 97.8, 98.9, 96.3, 94.7, 79.4	0.9, 3.5, 0.8	101	21	3.1	7.46
	2	92.7, 92.5, 93.5, 98.9, 99.3, 97.6, 98, 75.7	1.1, 3.4, 0.9	85	23	2.42	7.78
	3	92.8, 77.8, 77.2, 96.8, 99, 97.1, 97.5, 73	1.2, 2.9, 1.0	132	35	6.47	11.31
8.2	1	92.6, 96.7, 89, 97.4, 98.1, 93.8, 98, 79	0.8, 3.6, 0.8	106	21	3.46	7.46
	2	92.7, 93.2, 91.7, 98.3, 98.5, 96.2, 98.9, 75.2	1.1, 3.4, 0.9	84	24	2.5	7.78
	3	92.7, 82.2, 89.9, 97.1, 97, 97, 96.1, 73.1	1.2, 3.1, 1.0	97	29	3.62	9.33

Выводы

1. Предложен алгоритм, позволяющий решить задачу определения оптимальных параметров УПК при заданной расстановке для схем ЭЭС с сотнями и даже тысячами узлов. Показана применимость алгоритма к работе в режиме реального времени. Число расчетов режимов при использовании алгоритма сокращается в среднем в $6 \cdot 10^3$ раз. Дополнительным преимуществом алгоритма является предварительно определенная зона влияния устройств на параметры режима в элементах ЭЭС, что важно для устройств автоматического регулирования, которые в будущем могут использовать данный алгоритм для регулирования УПК в режиме реального времени.

2. Эффективная работа алгоритма подтверждена его применением к оптимизации параметров УПК для типовой сети IEEE с 300 узлами.

3. Определяемые в ходе предложенного подхода константы БТ и зона влияния УПК актуальны при сохранении конфигурации сети и постоянстве генерируемой ЭЭС мощности. Такие изменения приведут к пересчету режимов, что незначительно повышает время работы алгоритма. Это дает возможность использования данного подхода в реальном времени, и при изменениях генерации или конфигурации сети время работы алгоритма изменяется незначительно.

4. Приведен анализ физического влияния устройств на ЭЭС. Анализ подобных влияний классическими методами практически невозможен, что делает применение многокритериальной оптимизации необходимостью при рассмотрении вопросов настройки УПК. Классические методы чаще сводятся к решению конкретных локальных задач без учета влияния на всю систему.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Belyaev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudny V.S.** Enhancing efficiency and performance of electric power systems by using smart grid technology, 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, (2013) 846–849.

[2] **Belyaev N.A., Korovkin N.V., Chudny V.S., Frolov O.V.** Clustering of electric network for effective management of Smart grid, 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), (2014) 1987–1990. DOI: 10.1109/ISIE.2014.6864921

[3] **Shehata A.A., Tolba M.A., El-Rifaie A.M., Korovkin N.V.** Power system operation enhancement using a new hybrid methodology for optimal allocation of FACTS devices, Energy Reports, 8 (2022) 217–238. DOI: 10.1016/j.egy.2021.11.241

[4] **Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б., Попов М.М.** Режимы работы микрогидроэлектростанции со стабилизацией выходного напряжения при помощи управления инвертором // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 8. С. 51–58. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4190

[5] **Ananth D.V.N., Sureshkumar L.V., Boddepalli M.** Modelling and Design of Static Compensator and UPFC Based FACTS Devices for Power System Oscillations Damping and Voltage Compensation. Intelligent Computing in Control and Communication, 702 (2021) 357–371. DOI: 10.1007/978-981-15-8439-8_29

[6] **Abdelmalek Z., Chemachema M., Sofiane B., Boulkaibet I.** Fault Tolerant Predictive Control for Constrained Hybrid Systems with Sensors Failures, Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications (ICEECA), 682 (2019) 973–984. DOI: 10.1007/978-981-15-6403-1_67

[7] **Akbari E., Shabestari S.F.M., Pirouzi S., Jadidoleslam M.** Network flexibility regulation by renewable energy hubs using flexibility pricing-based energy management, Renewable Energy, 206 (2023) 295–308. DOI: 10.1016/j.renene.2023.02.050

[8] **Воронин И.С., Коровкин Н.В., Долбин К.С.** Оптимальная расстановка активно-адаптивных устройств для моделей энергосистем большой размерности // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 26–40. DOI: 10.18721/JEST.31402

[9] **Дерзский В.Г., Скиба В.Ф.** Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2009. № 8. С. 55–58.

[10] **Korovkin N.V., Krivosheev S.I., Shishigin D.S., Minevich T.G., Boronin V.N.** Mathematical modeling of grounding systems under impact of pulse currents, IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2018) 686–691. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317187

- [11] **Dolbin K.S.** Fast algorithm for obtaining mathematical relations for optimizing the operating mode of an electric power system, *E3S Web of Conferences*, 551 (2024) 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202455101009
- [12] **Smolovik S.V., Chudny V.S., Liamov A.S., Ryndina I.E., Denisenko A.I.** Application of a static synchronous series compensator to increase the transient stability of a powerful HPP, *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, (2021) 1562–1565. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396305
- [13] **Гехер К.** Теория чувствительности и допусков электронных цепей. Москва: Сов. радио, 1973.
- [14] **Dolbin K.S.** A fast algorithm for estimating the voltage deviation of the nodes of an electrical power system with longitudinal compensation, *2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)*, (2023) 1–5. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378785
- [15] **Dolbin K.S.** Algorithm for determining the optimal position and selection of parameters of devices for longitudinal reactive power compensation using the bilinear theorem, *2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon)*, (2024) 346–349. DOI: 10.1109/EICon61730.2024.10468517
- [16] **Janković Z., Vesin B.** Clean Genetic Algorithm Architecture for Improved Modularity and Extensibility, *2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)*, (2023) 1–4. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378827
- [17] **Ђурана П., Хок О., Данко М.** Optimisation of Reactive Energy Flow in Public Lighting Systems, *2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)*, (2023) 1–4. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378758
- [18] **Altayara I.A., Bin Salamah Y., Al-Ammar E.A.** Power Quality Disturbance Detection using Autoencoder Neural Network, *2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)*, (2023) 1–4. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378776
- [19] **Alhaider M.M.** Optimal Placement of Capacitor in the Distribution Grids using Dragonfly Algorithm, *2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)*, (2023) 1–6. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378770
- [20] **Dolbin K.S.** Algorithm for Minimizing the Error in Determining the Currents and Voltages of a Linear Electrical Circuit by Means of a Bilinear Theorem, *2023 Seminar on Networks, Circuits and Systems (NCS)*, (2023) 39–44. DOI: 10.1109/NCS60404.2023.10397477
- [21] **Бекузин В., Железняк В., Коровкин Н.** Сужение множества Парето на основе выборки предпочтений и попарной обработки критериев для оптимизации конструкции турбогенераторов // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2025. № 2. С. 95–113. DOI: 10.7868/S3034649525020075
- [22] **Ногин В.Д.** Алгоритм сужения множества Парето на основе произвольного конечного набора «квантов» информации // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2013. № 1. С. 63–69.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДОЛБИН Кирилл Сергеевич — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: kirill.dolbin.02@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6112-1297>

КОРОВКИН Николай Владимирович — заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

ВОРОНИН Илья Сергеевич – студент магистратуры, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: isvoronin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7655-2921>

REFERENCES

- [1] **N.A. Belyaev, N.V. Korovkin, O.V. Frolov, V.S. Chudny**, Enhancing efficiency and performance of electric power systems by using smart grid technology, 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, (2013) 846–849.
- [2] **N.A. Belyaev, N.V. Korovkin, V.S. Chudny, O.V. Frolov**, Clustering of electric network for effective management of Smart grid, 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), (2014) 1987–1990. DOI: 10.1109/ISIE.2014.6864921
- [3] **A.A. Shehata, M.A. Tolba, A.M. El-Rifaie, N.V. Korovkin**, Power system operation enhancement using a new hybrid methodology for optimal allocation of FACTS devices, Energy Reports, 8 (2022) 217–238. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.11.241
- [4] **B.V. Lukutin, E.B. Shandarova, M.M. Popov**, Operating modes of micro-hydroelectric power plant with output voltage stabilization using inverter control, Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 334 (8) (2023) 51–58. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4190
- [5] **D.V.N. Ananth, L.V. Sureshkumar, M. Boddepalli**, Modelling and Design of Static Compensator and UPFC Based FACTS Devices for Power System Oscillations Damping and Voltage Compensation. Intelligent Computing in Control and Communication, 702 (2021) 357–371. DOI: 10.1007/978-981-15-8439-8_29
- [6] **Z. Abdelmalek, M. Chemachema, B. Sofiane, I. Boulkaibet**, Fault Tolerant Predictive Control for Constrained Hybrid Systems with Sensors Failures, Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications (ICEECA), 682 (2019) 973–984. DOI: 10.1007/978-981-15-6403-1_67
- [7] **E. Akbari, S.F.M. Shabestari, S. Pirouzi, M. Jadidoleslam**, Network flexibility regulation by renewable energy hubs using flexibility pricing-based energy management, Renewable Energy, 206 (2023) 295–308. DOI: 10.1016/j.renene.2023.02.050
- [8] **I.S. Voronin, N.V. Korovkin, K.S. Dolbin**, Optimal allocation of FACTS devices for large-scale power system models, Global Energy, 31 (04) (2025) 26–40, DOI: 10.18721/JEST.31402
- [9] **V.G. Derzskii, V.F. Skiba**, Vybór meropriyatii po snizheniiu poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh setiakh [Selection of measures to reduce electricity losses in distribution networks], Energy saving. Power engineering. Energy audit, 8 (2009) 55–58.
- [10] **N.V. Korovkin, S.I. Krivosheev, D.S. Shishigin, T.G. Minevich, V.N. Boronin**, Mathematical modeling of grounding systems under impact of pulse currents, IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2018) 686–691. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317187
- [11] **K.S. Dolbin**, Fast algorithm for obtaining mathematical relations for optimizing the operating mode of an electric power system, E3S Web of Conferences, 551 (2024) 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202455101009
- [12] **S.V. Smolovik, V.S. Chudny, A.S. Liamov, I.E. Ryndina, A.I. Denisenko**, Application of a static synchronous series compensator to increase the transient stability of a powerful HPP, 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2021) 1562–1565. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396305
- [13] **K. Géher**, Theory of Network Tolerances, Budapest: Akadémiai Kiadó, 1971.
- [14] **K.S. Dolbin**, A fast algorithm for estimating the voltage deviation of the nodes of an electrical power system with longitudinal compensation, 2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), (2023) 1–5. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378785

- [15] **K.S. Dolbin**, Algorithm for determining the optimal position and selection of parameters of devices for longitudinal reactive power compensation using the bilinear theorem, 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), (2024) 346–349. DOI: 10.1109/El-Con61730.2024.10468517
- [16] **Z. Janković, B. Vesin**, Clean Genetic Algorithm Architecture for Improved Modularity and Extensibility, 2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), (2023) 1–4. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378827
- [17] **P. Đurana, O. Hock, M. Danko**, Optimisation of Reactive Energy Flow in Public Lighting Systems, 2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), (2023) 1–4. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378758
- [18] **I.A. Altayara, Y. Bin Salamah, E.A. Al-Ammar**, Power Quality Disturbance Detection using Autoencoder Neural Network, 2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), (2023) 1–4. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378776
- [19] **M.M. Alhaider**, Optimal Placement of Capacitor in the Distribution Grids using Dragonfly Algorithm, 2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), (2023) 1–6. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378770
- [20] **K.S. Dolbin**, Algorithm for Minimizing the Error in Determining the Currents and Voltages of a Linear Electrical Circuit by Means of a Bilinear Theorem, 2023 Seminar on Networks, Circuits and Systems (NCS), (2023) 39–44. DOI: 10.1109/NCS60404.2023.10397477
- [21] **V.I. Bekuzin, N.V. Korovkin, V.N. Zheleznyak**, Pareto Set Narrowing Based on Preference Sampling and Pairs of Criteria Processing for Turbogenerator Design Optimization, Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics, 2 (2025) 95–113. DOI: 10.7868/S3034649525020075
- [22] **V.D. Nugin**, Algoritm suzheniia mnozhestva Pareto na osnove proizvol'nogo konechnogo nabora "kvantov" informatsii [An algorithm for narrowing the Pareto set based on an arbitrary finite set of information "quanta"], Artificial Intelligence and Decision Making, 1 (2013) 63–69.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Kirill S. DOLBIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: kirill.dolbin.02@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6112-1297>

Nikolay V. KOROVKIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

Iliia S. VORONIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: isvoronin@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7655-2921>

Поступила: 20.11.2025; Одобрена: 15.03.2026; Принята: 15.03.2026.
Submitted: 20.11.2025; Approved: 15.03.2026; Accepted: 15.03.2026.