

Научная статья

УДК 621.315+621.316

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31402>



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

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

 isvoronin@yandex.ru

ОПТИМАЛЬНАЯ РАССТАНОВКА АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Аннотация. Внедрение активно-адаптивных устройств – одно из ключевых направлений модернизации и реконструкции современной электроэнергетики. В настоящей статье предлагается и исследуется новый эффективный алгоритм для расстановки устройств управляемой продольной компенсации (УУПК) в электроэнергетической системе (ЭЭС) из тысяч узлов. Задача расстановки разбивается на две подзадачи: приближенный поиск множества перспективных мест установки (без анализа режимов ЭЭС) и уточнение поиска на найденном множестве (на основе анализа режимов). В рамках предлагаемого алгоритма подзадача приближенного поиска представляется задачей многоцелевой оптимизации и решается с помощью многопоточной реализации генетического алгоритма. Результатом работы алгоритма является множество наборов мест возможной установки УУПК, представляемое в виде фронта Парето. В работе представлены результаты моделирования в Matlab для расстановки УУПК в типовой сети IEEE с 300 узлами. Полученные множества Парето содержат десятки перспективных мест установки УУПК, причем с увеличением числа УУПК растет и число Парето-оптимальных решений. Также кратко рассмотрена использованная в работе реализация алгоритма построения множества Парето-оптимальных решений, выполненная на основе параллельных вычислений.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, активно-адаптивные устройства, многоцелевая оптимизация, параллельные вычисления, генетический алгоритм, оптимизация, статический синхронный продольный компенсатор, оптимальная расстановка активно-адаптивных устройств.

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:

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: <https://doi.org/10.18721/JEST.31402>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31402>*I.S. Voronin* ✉, *N.V. Korovkin*, *K.S. Dolbin*

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

✉ isvoronin@yandex.ru

OPTIMAL ALLOCATION OF FACTS DEVICES FOR LARGE-SCALE POWER SYSTEM MODELS

Abstract. The introduction of active-adaptive devices is one of the key areas in the modernization and reconstruction of the modern electric power industry. This paper proposes and investigates a new effective algorithm for optimal allocation of flexible alternating current transmission systems (FACTS) devices in an electric power system (EPS) of thousands of nodes. The optimal allocation problem is divided into two subtasks: an approximate search for a set of promising installation sites (without analyzing the modes of the power system) and clarifying the found set (based on the analysis of modes). Within the proposed algorithm, the approximate search is a multi-objective optimization problem. A multithreaded implementation of genetic algorithm finds solution for the problem. The result of the algorithm performance is a Pareto front. Each point of the front corresponds to a set of promising installation sites of FACTS. The paper presents the results of the algorithm performance for optimal placement of series FACTS in IEEE 300 bus system. The obtained Pareto sets contain dozens of promising FACTS locations. When number of FACTS increases, the number of points on the Pareto front rises. The paper also considers the implementation of the algorithm for constructing the set of Pareto-optimal solutions based on parallel computing.

Keywords: power system, FACTS, multi-objective optimization, parallel computing, genetic algorithm, optimization, SSSC, optimal allocation of FACTS.

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:

Voronin I.S., Korovkin N.V., Dolbin K.S., Optimal allocation of FACTS devices for large-scale power system models, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 26–40, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31402>

Введение

Актуальность

Активно-адаптивные устройства (ААУ), изменяя собственные параметры, способны изменять режимы работы электроэнергетической системы (ЭЭС), и их внедрение – одно из ключевых направлений модернизации и реконструкции современной электроэнергетики. Проблемы, связанные с внедрением ААУ, затрагивают всех участников электроэнергетического рынка, и об их актуальности свидетельствует большое число реализованных проектов по установке ААУ [1–4] и публикаций по этой теме, а ее игнорирование увеличивает резерв мощности, число отказов, аварий, затрат на эксплуатацию ЭЭС. Среди большого разнообразия ААУ [5] выделим устройства управляемой продольной компенсации (УУПК), реализуемые как конденсатор с управляемой емкостью (Thyristor-Controlled Series Capacitor, TCSC) или как статический синхронный продольный компенсатор (Static Synchronous Series Compensator, SSSC) [6], применяемые, как правило, для управления распределением мощности в сети [7] и повышения ее динамической устойчивости [8, 9].

Внедрение ААУ (УУПК) порождает комплекс проблем, включающих определение мест их наилучшего расположения [10–12], рассматриваемое в настоящей статье, а также определения мощностей [13–15] и алгоритмов управления ААУ [16, 17]. Очевидным критерием наилучшей расстановки является улучшение режима ЭЭС [18–20]. Однако сложность процедуры анализа режима, которую нужно провести многократно, существенно ограничивает размеры моделей ЭЭС, для которых выполнялись расчеты. Фактически рассматривались схемы с десятками узлов, в то время как современные модели ЭЭС содержат тысячи узлов.

В настоящей статье предлагается разбить задачу поиска на две подзадачи:

- поиск наилучших мест установки ААУ без анализа режимов, результатом решения которой будет множество перспективных мест установки;
- уточнение поиска на основе анализа режимов, выполняемого только для множества перспективных мест, определенного из решения предыдущей подзадачи.

Такой подход позволяет определить наилучшие места установки ААУ с использованием моделей ЭЭС с высоким уровнем детализации (сотни и тысячи узлов).

Первая подзадача сводится в настоящей статье к задаче многоцелевой оптимизации [21]. Решение выполняется с помощью многопоточной реализации генетического алгоритма (ГА) [22], в рамках которой ГА одновременно обрабатывает несколько популяций, находя наиболее перспективные места установки УУПК. Необходимость многопоточной реализации возникает ввиду большого числа возможных мест установки УУПК в схемах ЭЭС с сотнями и тысячами узлов. Эффективность предложенного подхода подтверждается моделированием в среде Matlab для расстановки УУПК в сети IEEE с 300 узлами.

Критерии наилучшей расстановки УУПК

Рассмотрим первую подзадачу – получение множества перспективных мест установки УУПК.

Влияние УУПК состоит в изменении режимного параметра ветви или узла относительно номинального значения в зависимости от сопротивления УУПК. Большее изменение режимного параметра соответствует более эффективному влиянию УУПК. Это влияние ослабевает с увеличением расстояния по графу от места расположения УУПК до узла или ветви, режимный параметр которых изменяется под его воздействием. Здесь и далее под «расстоянием» будем понимать:

- для пары узлов – число ветвей графа в кратчайшем пути между узлами выбранной пары;
- для пары ветвей – число ветвей графа в кратчайшем пути между серединами ветвей выбранной пары;
- для пары узел-ветвь – число ветвей графа в кратчайшем пути между серединой ветви и узлом выбранной пары.

В настоящей работе принимается, что УУПК, расположенное в некоторой ветви, влияет на все узлы и ветви, расположенные на расстоянии 1 и 2 от него. Это допущение не играет принципиальной роли и может быть ослаблено введением, например, влияния до расстояния 3. Однако, как показывают наши расчеты, расстояние 2 достаточно для получения представительного множества решения первой подзадачи.

Критерии наилучшей расстановки УУПК в ЭЭС формулируются из двух требований. Во-первых, должно быть как можно меньше узлов, на которые одновременно влияют два и более УУПК. В противном случае УУПК должны учитывать действие друг друга, что усложняет их законы управления. Во-вторых, в сети не должно быть узлов, на которые не влияет ни одно УУПК.

Алгоритм вычисления целевых функций

Предложенные критерии расстановки УУПК можно записать в виде целевых функций $F_1(\mathbf{x})$ и $F_2(\mathbf{x})$, где \mathbf{x} – вектор номеров ветвей, в которых размещены УУПК. Наилучшее расположение УУПК будет достигаться на множестве Парето двухцелевой задачи минимизации данных функций. За каждую пару УУПК, одновременно влияющих на узел, значение $F_1(\mathbf{x})$ увеличивается на P_1 (если узел удален на расстояние 1 от обоих УУПК), $P_{12} < P_1$ (если узел удален на расстояние 1 от одного УУПК и на расстояние 2 от другого УУПК) или $P_2 < P_{12}$ (если узел удален от обоих УУПК на расстояние 2). За каждый узел, на который не влияет ни одно УУПК, значение $F_2(\mathbf{x})$ увеличивается на P_0 . Пусть k_1, k_{12}, k_2 и k_0 – число приращений P_1, P_{12}, P_2 и P_0 соответственно, тогда:

$$F_1(\mathbf{x}) = k_1 P_1 + k_{12} P_{12} + k_2 P_2; \quad F_2(\mathbf{x}) = k_0 P_0. \quad (1)$$

Алгоритм вычисления целевых функций поясняется на рис. 1. Пусть ветви с УУПК имеют номера 1, 9 и 13. Узлы на расстоянии 1 (заливка) и расстоянии 2 (штриховка) от УУПК выделены цветом данного УУПК. Если на узел влияют несколько УУПК, узел выделен несколькими цветами. Узлы, на которые не влияет ни одно УУПК, отмечены черным.

У схемы, представленной на рис. 1, есть две особенности. Во-первых, в данной схеме, помимо линий электропередачи (ЛЭП), присутствуют трансформаторы, которые не могут выступать в роли ветвей для установки УУПК. Во-вторых, нумерация узлов непоследовательная: есть узлы с номерами 31, 32, 33 (всего узлов 20), пропущен узел 11. Такая нумерация узлов, поддерживающая удобство восприятия схемы, характерна для описания графов ЭЭС и сохранена нами. Схемные номера всех узлов записываются в вектор N . Вводится понятие программного номера узла, это – номер элемента вектора N , содержащего схемный номер узла. Программные номера очевидным образом упорядочены, и их последовательность не содержит пропусков, именно они используются при работе кода.

Рассмотрим алгоритм вычисления целевых функций для схемы, представленной на рис. 1, и вектора $\mathbf{x} = [1 \ 9 \ 13]^T$ (T – символ транспонирования). Исходные данные (табл. 1) представлены вектором N и матрицей V , содержащей информацию о граничных узлах и типе ветвей (3-й столбец V : 0 – ЛЭП, 1 – трансформатор). Незаполненные ячейки таблиц имеют значение 0.

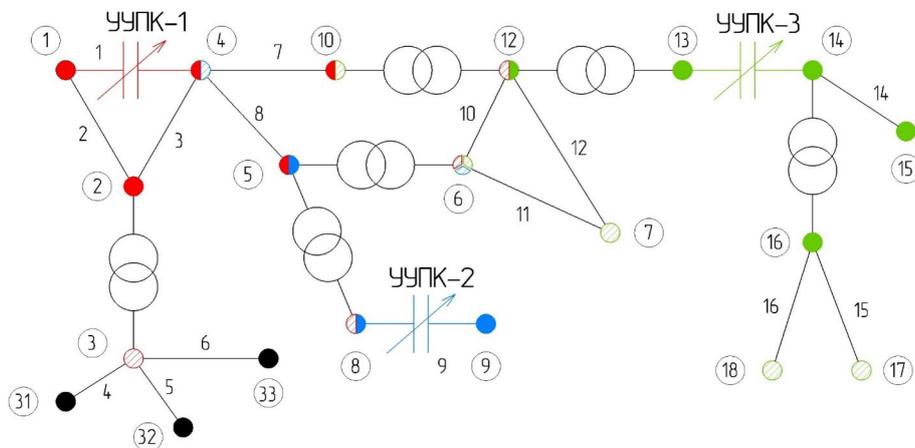


Рис. 1. Вычисление целевых функций
Fig. 1. Calculation of the objective functions

Таблица 1

Исходные данные для вычисления целевых функций

Table 1

Initial data for calculating the objective functions

	N	V			f(Δf)																				V _{new}			
		1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	1	2		
1	1	1	4		♦	♦	♦				♦	♦					♦									1	4	
2	2	1	2		♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦					♦									1	2	
3	3	2	4		♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦															2	4	
4	31	2	3	1		♦	♦	♦	♦	♦																3	31	
5	32	3	31			♦	♦	♦	♦	♦																3	32	
6	33	3	32			♦	♦	♦	♦	♦																3	33	
7	4	3	33		♦	♦	♦				♦	♦	♦		♦		♦	♦								4	10	
8	5	4	10		♦	♦					♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦								4	5	
9	6	10	12	1							♦	♦	♦	♦	♦		♦	♦	♦							8	9	
10	7	4	5								♦	♦	♦				♦	♦	♦							6	12	
11	8	5	8	1							♦	♦	♦		♦	♦										6	7	
12	9	8	9								♦				♦	♦										7	12	
13	10	5	6	1	♦	♦					♦	♦	♦	♦		♦	♦	♦								13	14	
14	12	6	12								♦	♦	♦	♦		♦	♦	♦	♦							14	15	
15	13	6	7									♦	♦				♦	♦	♦	♦	♦	♦				16	17	
16	14	7	12															♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	16	18	
17	15	12	13	1															♦	♦	♦	♦						
18	16	13	14																	♦	♦	♦	♦	♦	♦			
19	17	14	15																		♦		♦	♦	♦			
20	18	14	16	1																		♦		♦	♦	♦		
21	X	16	17																									
22	X	16	18																									

Также однократно вычисляется матрица $f_{20 \times 20}$ инцидентности графа ЭЭС, а также матрицы Δf и V_{new} (табл. 1). Матрица Δf вычисляется по формуле:

$$\Delta f = \neg(f \leftrightarrow f^2). \tag{2}$$

Если ненулевые элементы f расположены на пересечении программных номеров узлов, удаленных на расстояние 1 друг от друга, то ненулевые элементы Δf расположены на пересечении программных номеров узлов, удаленных на расстояние 2 друг от друга.

Матрица V_{new} составляется из строк V , соответствующих ЛЭП (трансформаторы не подходят для установки УУПК). Затем третий столбец V_{new} исключается. Нумерация ЛЭП на рис. 1 соответствует порядку строк V_{new} .

Далее формируется нулевая матрица $M_{3 \times 20}$ и поочередно рассматриваются элементы x . Результаты описываемых далее промежуточных вычислений представлены в табл. 2. Первый элемент x равен 1. Схемные номера граничных узлов линии 1 равны элементам первой строки

матрицы V_{new} , т.е. 1 и 4. Программные номера этих узлов равны номерам элементов N со значением 1 и 4, т.е. 1 и 7 соответственно. Далее вычисляется вектор-строка f_{new1} как логическая сумма первой и седьмой строк f . Номера элементов f_{new1} с ненулевыми значениями соответствуют программным номерам узлов на расстоянии 1 от УУПК в линии 1. Далее вычисляется вектор-строка f_{new2} как логическая сумма первой и седьмой строк Δf . Элементам f_{new2} с номерами ненулевых элементов f_{new1} присваивается значение 0, после чего номера элементов f_{new2} с ненулевыми значениями соответствуют программным номерам узлов на расстоянии 2 от УУПК в линии 1. Элементам первой строки M с номерами ненулевых элементов f_{new1} присваивается значение 100, с номерами ненулевых элементов f_{new2} присваивается значение 1. Операция повторяется для оставшихся элементов x и строк M .

Затем суммированием строк M вычисляется вектор-строка S , элементы которой поочередно рассматриваются для определения значений k_1, k_{12}, k_2 и k_0 . Пусть a – значение j -го элемента S ; $\Delta k_1, \Delta k_{12}, \Delta k_2$ и Δk_0 – число приращений P_1, P_{12}, P_2 и P_0 за j -й элемент S . Если $a = 0$, то узел j не охвачен влиянием УУПК, следовательно, $\Delta k_0 = 1, \Delta k_1 = \Delta k_{12} = \Delta k_2 = 0$. Если $a \neq 0$, то число УУПК, от которых узел j удален на расстояние 1, равно N_1 ; на расстояние 2 – равно N_2 , причем:

$$N_1 = \text{entier}(a/100), \quad N_2 = a - 100N_1; \quad (3)$$

$$\Delta k_1 = C_{N_1}^2 = \frac{N_1!}{2!(N_1 - 2)!} = 0,5N_1(N_1 - 1); \quad (4)$$

$$\Delta k_{12} = N_1N_2; \quad (5)$$

$$\Delta k_2 = C_{N_2}^2 = \frac{N_2!}{2!(N_2 - 2)!} = 0,5N_2(N_2 - 1). \quad (6)$$

При этом, очевидно, $\Delta k_0 = 0$. После рассмотрения всех элементов S :

$$k_1 = \sum \Delta k_1, \quad k_{12} = \sum \Delta k_{12}, \quad k_2 = \sum \Delta k_2, \quad k_0 = \sum \Delta k_0. \quad (7)$$

Результаты промежуточных вычислений при рассмотрении S представлены в табл. 2. Согласно (7), $k_1 = 1, k_{12} = 4, k_2 = 3$ и $k_0 = 3$. Здесь и далее принимается $P_1 = 20, P_{12} = 10, P_2 = 5$ и $P_0 = 20$. Тогда $F_1(x) = 75$ и $F_2(x) = 60$ по (1).

Реализация поиска

Поиск множества оптимальных x осуществляется с помощью ГА. Несмотря на то, что анализ режимов работы ЭЭС не выполняется, время построения этого множества достаточно велико, что является следствием большого числа вариантов расстановки УУПК. Так, оценка числа возможных вариантов расстановки 20 УУПК в схеме с 300 ветвями дает $\sim 10^{30}$, поэтому для эффективного построения множества оптимальных x желательно использование параллельных вычислений. В настоящей работе в рамках ГА одновременно на разных ядрах однопроцессорного компьютера запускается обработка нескольких (по числу ядер) популяций, независимо развивающихся в течение нескольких десятков поколений. По завершении этого внутреннего расчетного этапа независимые популяции обмениваются Парето-оптимальными решениями, создают на их основе новые независимые популяции, и процесс повторяется (внешний расчетный этап). Как показал опыт наших расчетов, число повторений на внешнем расчетном этапе

Таблица 2

Результаты промежуточных вычислений

Table 2

Results of intermediate calculations

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
f_{new1}	♦	♦					♦	♦					♦								
f_{new2}			♦						♦		♦			♦							
M	100	100	1				100	100	1		1		100	1							
							1	100	1		100	100									
									1	1			1	100	100	100	100	100	100	1	1
S	100	100	1				101	200	3	1	101	100	101	101	100	100	100	100	100	1	1
Δk_0				1	1	1															
N_1	1	1					1	2			1	1	1	1	1	1	1	1	1		
N_2			1				1		3	1	1		1	1						1	1
Δk_1								1													
Δk_{12}							1				1		1	1							
Δk_2									3												

невелико и составляет 6–8. По завершении повторений внешнего расчетного этапа популяции объединяют свои множества Парето в один фронт Парето, который и является результатом решения первой подзадачи.

Реализация внешнего расчетного этапа поясняется на рис. 2 для схемы, представленной на рис. 1. Число УУПК $N_{УПК} = 3$, размер популяции $N_{поп} = 5$, число популяций, одновременно обрабатываемых в рамках ГА, $N_{ГА} = 3$. Все операции внешнего расчетного этапа, кроме обмена Парето-оптимальными решениями между популяциями, выполняются в блоке параллельных вычислений. Порядок выполнения операций следующий:

1. Формируется нулевая матрица $Y_{3 \times 15}$ размерностью $N_{ГА} \times (N_{поп} \cdot N_{УПК})$.
2. Парето-оптимальные решения i -й популяции представляются в виде матрицы размерностью $N_{пар} \cdot N_{УПК}$, где $N_{пар}$ – число точек на фронте Парето (каждая строка соответствует одной точке на фронте Парето), и строки данной матрицы последовательно записываются в i -ю строку Y .
3. В рамках операции обмена Парето-оптимальными решениями между популяциями создается матрица $G_{3 \times 30}$ размерностью $N_{ГА} \times 2(N_{поп} \cdot N_{УПК})$. Первая строка G получается объединением первой и последней строки Y , i -я строка ($i > 1$) получается объединением i -й и $(i - 1)$ -й строки Y .
4. Новая i -я популяция ГА формируется из i -й строки G путем последовательного выделения ненулевых строк по $N_{УПК} = 3$ элемента.

Число точек на фронте Парето i -й популяции может превысить заданный размер популяции $N_{поп}$. Тогда результат не может быть записан в Y размерностью $N_{ГА} \times (N_{поп} \cdot N_{УПК})$, и алгоритм прекратит работу. Выходом из сложившейся ситуации является реализация процедуры, увеличивающей $N_{поп}$ и размерность Y при необходимости. Например, можно создать вектор P с $N_{ГА}$ -элементами и по завершении обработки i -й популяции записывать число точек на фронте Парето в i -й элемент P . При выполнении операции формирования новых начальных популяций, если $P(i) + P(i - 1) > N_{поп}$, увеличивать размер популяции i -го алгоритма до $P_{\Sigma} = P(i) + P(i - 1)$ и изменять размерность Y на $N_{ГА} \times (P_{\Sigma} \cdot N_{УПК})$, размерность G на $N_{ГА} \times 2(P_{\Sigma} \cdot N_{УПК})$.

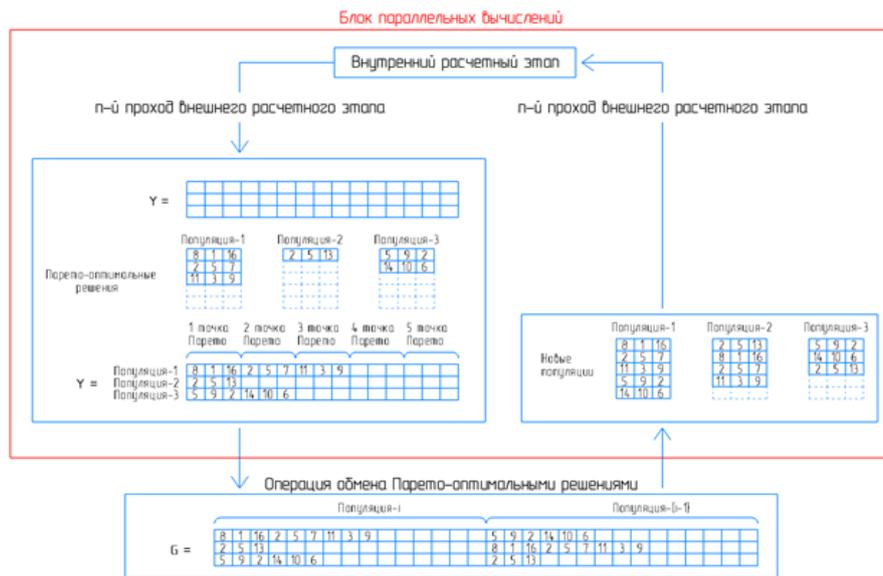


Рис. 2. К описанию реализации поиска

Fig. 2. On the description of the search implementation

Результаты и обсуждение

Эффективность предложенного алгоритма [22] демонстрируется на задаче приближенного поиска оптимальных мест установки УУПК в тестовой схеме IEEE с 300 узлами [23]. Влияние скорости приращения $F_1(x)$ на решение задачи исследовалось авторами в [24], в настоящей статье задача была решена три раза для разного числа устанавливаемых УУПК. Параметры ГА были заданы следующими: размер популяции – 222, число поколений – 100, число внешних расчетных этапов – 8, число популяций, одновременно обрабатываемых в рамках ГА, – 96. Результаты решения представлены на рис. 3 в виде фронтов Парето.

В каждом фронте Парето можно выделить следующие точки:

- 1) точка, соответствующая минимуму $F_1(x)$;
- 2) точка, соответствующая минимуму $F_2(x)$;
- 3) серединная точка множества Парето;
- 4) типичный представитель кластера Парето-оптимальных решений.

Данные точки приведены в табл. 3 и выделены цветом: красным – для первой точки, синим – для второй, зеленым – для третьей и черным – для четвертой. Нумерация ЛЭП соответствует порядку строк в таблице исходных данных по ветвям [23]. В реальности каждой точке (F_1 , F_2) на фронте Парето соответствуют десятки неодинаковых x , в таблицах записаны типичные представители множеств этих x .

Каждой выделенной точке множества Парето соответствует набор ЛЭП. Данные ЛЭП отмечены кружками на схеме IEEE с 300 узлами на рис. 4. Цвет кружка на рис. 4 соответствует цвету точки в табл. 3.

Для точной идентификации ЛЭП, выделенных на рис. 4, приводятся номера их граничных узлов в схеме IEEE с 300 узлами (табл. 4) согласно [23].

При увеличении числа устанавливаемых УУПК от 6 до 8 фронт Парето смещается в сторону меньших значений $F_2(x)$, число Парето-оптимальных решений увеличивается. Первое объясняется тем, что увеличение числа УУПК позволяет управлять параметрами режима в большем числе узлов. Второе – увеличением числа вариантов расстановки (в том числе оптимальных по Парето) УУПК при увеличении числа последних.

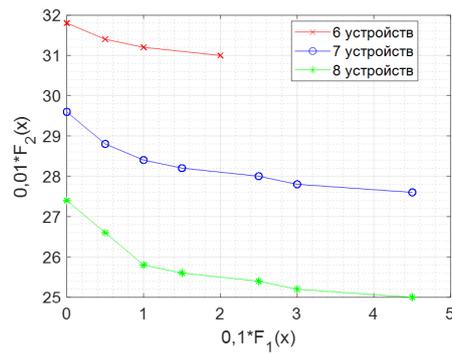


Рис. 3. Фронты Парето для задачи оптимальной расстановки УУПК в сети IEEE с 300 узлами
 Fig. 3. Pareto fronts for the optimal allocation of series FACTS in IEEE 300 bus system

Таблица 3

Выделенные точки множеств Парето при разном числе УУПК

Table 3

Selected points of Pareto sets at different numbers of series FACTS

	x							$F_1(x)$	$F_2(x)$	
Фронт Парето при 6 УУПК	60	82	128	332	317	214	X	0	3180	
	82	27	128	214	317	60		20	3100	
	60	82	220	188	317	128		5	3140	
	60	82	220	188	317	128		5	3140	
Фронт Парето при 7 УУПК	53	164	214	128	332	82	317	0	2960	
	128	189	27	60	317	220	82	45	2760	
	128	190	28	60	317	220	82	15	2820	
	128	188	28	82	317	60	220	10	2840	
Фронт Парето при 8 УУПК	82	214	53	332	317	164	128	174	0	2740
	332	27	82	128	189	220	317	60	45	2500
	220	60	82	28	332	190	317	128	15	2560
	220	60	82	332	128	188	317	181	5	2660

Дискуссия

Несмотря на эффективность предложенного алгоритма приближенного поиска, по прошествии 6–8 циклов расчета генетическое разнообразие полностью исчерпывается, Парето-оптимальные решения параллельных потоков ГА полностью совпадают. Если в какой-то популяции появляются лучшие по Парето решения, то на последующих циклах расчета данные решения входят в другие популяции и оказываются более перспективными родителями. Таким образом уничтожаются генетические отличия популяций, параллельно обрабатываемых ГА. Вопрос улучшения алгоритма обмена лучшими особями между популяциями требует дальнейшего изучения.

Выводы

1. Предложен алгоритм, позволяющий решить задачу оптимальной расстановки заданного числа УУПК для реальных схем ЭЭС с сотнями и даже тысячами узлов.

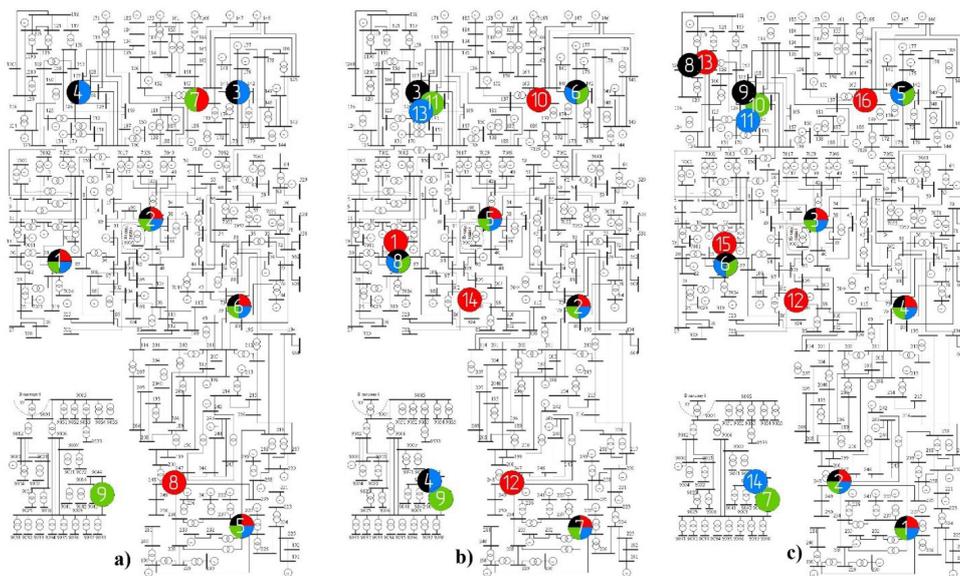


Рис. 4. Оптимальное размещение УУПК в сети IEEE с 300 узлами: а) 6 УУПК, б) 7 УУПК, в) 8 УУПК

Fig. 4. Optimal allocation of series FACTS in IEEE 300 bus system: a) 6 FACTS, b) 7 FACTS, c) 8 FACTS

Таблица 4

Номера граничных узлов выделенных ЛЭП на рис. 4

Table 4

Numbers of the boundary nodes of the selected power lines in fig. 4

№ по рис. 4	а	б	в
1	19–21 (60)	12–21 (53)	231–237 (317)
2	37–41 (82)	73–79 (128)	247–248 (332)
3	140–142 (220)	126–127 (188)	37–41 (82)
4	126–127 (188)	9004–9044 (28)	73–79 (128)
5	231–237 (317)	37–41 (82)	140–142 (220)
6	73–79 (128)	140–142 (220)	19–21 (60)
7	137–140 (214)	231–237 (317)	9003–9044 (27)
8	247–248 (332)	19–21 (60)	119–120 (181)
9	9003–9044 (27)	9003–9044 (27)	126–127 (188)
10	—	137–140 (214)	126–129 (189)
11	—	126–129 (189)	126–132 (190)
12	—	247–248 (332)	104–108 (164)
13	—	126–132 (190)	115–122 (174)
14	—	104–108 (164)	9004–9044 (28)
15	—	—	12–21 (53)
16	—	—	137–140 (214)

2. В рамках алгоритма формулируется подзадача приближенного поиска мест перспективной установки УУПК, которая не требует анализа режимов ЭЭС. Целевыми функциями служат одновременное влияние нескольких УУПК и отсутствие влияния УУПК на узлы графа ЭЭС.

3. В алгоритме используется многопоточная реализация ГА, которая, по нашим представлениям, ускоряет построение множества Парето на порядок по сравнению с обычным ГА.

4. Получены результаты работы алгоритма (места перспективной установки УУПК) для типовой сети IEEE с 300 узлами при различном числе устанавливаемых УУПК. Из полученных результатов по итогам расчета режима ЭЭС можно выделить наилучшие.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Sharma S., Gupta S., Zuhaib M., Bhuria V., Malik H., Almutairi A., Afthanorhan A., Asef Hossaini M. A comprehensive review on STATCOM: paradigm of modeling, control, stability, optimal location, integration, application, and installation, *IEEE Access*, 12 (2024) 2701–2729. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3345216
- [2] Hagh M.T., Borhany M.A.J., Taghizad-Tavana K., Oskouei M.Z. A comprehensive review of flexible alternating current transmission system (FACTS): topologies, applications, optimal placement, and innovative models, *Heliyon*, 11 (1) (2025) e41001. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e41001
- [3] Paramalingam J., Nakamura F., Matsuda A., Yamanaka D., Tsuchiya T. Application of FACTS devices for a dynamic power system within the USA, 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 – ECCE Asia), (2018) 2329–2334. DOI: 10.23919/IPEC.2018.8507559
- [4] Meikandasivam S., Nema R.K., Jain S.K. Performance of installed TCSC projects, *India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010)*, (2011) 1–8. DOI: 10.1109/IICPE.2011.5728103
- [5] Бердников Р.Н., Бушуев В.В., Васильев С.Н. и др. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2012.
- [6] Ordóñez C.A., Gómez-Expósito A., Maza-Ortega J.M. Series compensation of transmission systems: a literature survey, *Energies*, 14 (6) (2021) 1717. DOI: 10.3390/en14061717
- [7] Cao F., Hu L., Zhang J., Almenweer R.A., Alnasseir J., Almaghout F. Study on power flow improvement using static compensators and thyristor controlled series capacitor in transmission network, 2023 5th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEEET), (2023) 354–359. DOI: 10.1109/CEEET59667.2023.10420634
- [8] 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 (ElConRus), (2021) 1562–1565. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396305
- [9] Šešok A., Pavić I. Transient stability improvement of Croatian power system using FACTS, 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia), (2022) 51–55. DOI: 10.1109/ISGTA-sia54193.2022.10003484
- [10] Kamarposhti M.A., Shokouhandeh H., Colak I., Band S.S., Eguchi K. Optimal location of FACTS devices in order to simultaneously improving transmission losses and stability margin using artificial bee colony algorithm, *IEEE Access*, 9 (2021) 125920–125929. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3108687
- [11] Khan N.H., Wang Y., Tian D., Jamal R., Iqbal S., Saif M.A.A., Ebeed M.A. Novel modified lightning attachment procedure optimization technique for optimal allocation of the FACTS devices in power systems, *IEEE Access*, 9 (2021) 47976–47997. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3059201
- [12] Kar M.K., Kanungo S., Alsaif F., Ustun T.S. Optimal placement of FACTS devices using modified whale optimization algorithm for minimization of transmission losses, *IEEE Access*, 12 (2024) 130816–130831. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3458039
- [13] Ismail B., Abdul Wahab N.I., Othman M.L., Radzi M.A.M., Naidu Vijyakumar K., Mat Naain M.N. A comprehensive review on optimal location and sizing of reactive power compensation using hybrid-based approaches for power loss reduction, voltage stability improvement, voltage profile enhancement and loadability enhancement, *IEEE Access*, 8 (2020) 222733–222765. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043297

- [14] Shehata A.A., Refaat A., Ahmed M.K., Korovkin N.V. Optimal placement and sizing of FACTS devices based on autonomous groups particle swarm optimization technique, Archives of Electrical Engineering, 70 (1) (2021) 161–172. DOI: 10.24425/aee.2021.136059
- [15] Zadehbagheri M., Ildarabadi R., Javadian A.M. Optimal power flow in the presence of HVDC lines along with optimal placement of FACTS in order to power system stability improvement in different conditions: technical and economic approach, IEEE Access, 11 (2023) 57745–57771. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3283573
- [16] Kumar T.S., Sathiyasekar K. Enhancing system stability with FACTS devices using least mean square based neural network algorithm, 2023 4th International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC), (2023) 1462–1466. DOI: 10.1109/ICOSEC58147.2023.10276121
- [17] Pandya M. Rotor angle stability analysis with coordinated control of FACTS devices using particle swarm optimization, 2024 IEEE 12th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), (2024) 42–46. DOI: 10.1109/SEGE62220.2024.10739519
- [18] Khan N.H., Wang Y., Tian D., Jamal R., Kamel S., Ebeed M. Optimal siting and sizing of SSSC using modified salp swarm algorithm considering optimal reactive power dispatch problem, IEEE Access, 9 (2021) 49249–49266. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3061503
- [19] Siregar Y., Agustina P.N., Pane Z. Optimization placement of SVC and TCSC in power transmission network 150 kV SUMBAGUT using artificial bee colony algorithm, 2021 4th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), (2021) 635–639. DOI: 10.1109/ISRITI54043.2021.9702832
- [20] Saini M., Djalal M.R., Shiddiq Yunus A.M. FACTS: SVC optimization for optimal power flow using craziness particle swarm optimization in Sulsehrabar system, 2024 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia, (2024) 346–351. DOI: 10.1109/ICPSAsia61913.2024.10761326
- [21] Ahmad A.A., Sirjani R. Optimal placement and sizing of multi-type FACTS devices in power systems using metaheuristic optimisation techniques: An updated review, Ain Shams Engineering Journal, 11 (3) (2020) 611–628. DOI: 10.1016/j.asej.2019.10.013
- [22] Воронин И.С., Коровкин Н.В., Модулина А.Н., Чернышева В.В. Программа с использованием многоядерной обработки данных для оптимальной расстановки активно-адаптивных устройств в ЭЭС на основе двух критериев качества. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2025685976 Российская Федерация; заявитель и правообладатель Воронин И.С. № 2025684731; заявл. 17.09.2025; опублик. 26.09.2025, Бюл. № 10. 1 с.
- [23] 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).
- [24] Voronin I.S., Korovkin N.V. Optimization of placement of FACTS in electric power system based on soft computing, 2025 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), (2025) 142–146. DOI: 10.1109/UralCon67204.2025.11206624

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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>

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>

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>

REFERENCES

- [1] **S. Sharma, S. Gupta, M. Zuhaib, V. Bhuria, H. Malik, A. Almutairi, A. Afthanorhan, M. Asef Hossaini**, A comprehensive review on STATCOM: paradigm of modeling, control, stability, optimal location, integration, application, and installation, *IEEE Access*, 12 (2024) 2701–2729. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3345216
- [2] **M.T. Hagh, M.A.J. Borhany, K. Taghizad-Tavana, M.Z. Oskouei**, A comprehensive review of flexible alternating current transmission system (FACTS): topologies, applications, optimal placement, and innovative models, *Helion*, 11 (2025) e40948, DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e41001
- [3] **D. Sullivan, B. Buterbaugh, J. Paramalingam, F. Nakamura, A. Matsuda, D. Yamanaka, T. Tsuchiya**, Application of FACTS devices for a dynamic power system within the USA, 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia), (2018) 2329–2334. DOI: 10.23919/IP-EC.2018.8507559
- [4] **S. Meikandasivam, R.K. Nema, S.K. Jain**, Performance of installed TCSC projects, *India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010)*, (2011) 1–8. DOI: 10.1109/IICPE.2011.5728103
- [5] **R.N. Berdnikov, V.V. Bushuev, S.N. Vasil'ev et al.**, *Kontseptsiiia intellektual'noi elektroenergeticheskoi sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoi set'iu* [The concept of an intelligent electric power system of Russia with an active-adaptive network], Moscow: OAO “FSK EES”, 2012.
- [6] **C. Ordóñez, A. Gómez-Expósito, J.M. Maza-Ortega**, Series compensation of transmission systems: a literature survey, *Energies*, 14 (2021) 1717. DOI: 10.3390/en14061717
- [7] **F. Cao, L. Hu, J. Zhang, R.A. Almenweer, J. Alnasseir, F. Almaghout**, Study on power flow improvement using static compensators and thyristor controlled series capacitor in transmission network, 2023 5th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT), (2023) 354–359. DOI: 10.1109/CEECT59667.2023.10420634
- [8] **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
- [9] **A. Šešok, I. Pavić**, Transient stability improvement of Croatian power system using FACTS, 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), (2022) 51–55. DOI: 10.1109/ISGTAsia54193.2022.10003484
- [10] **M.A. Kamarposhti, H. Shokouhandeh, I. Colak, S.S. Band, K. Eguchi**, Optimal location of FACTS devices in order to simultaneously improving transmission losses and stability margin using artificial bee colony algorithm, *IEEE Access*, 9 (2021) 125920–125929. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3108687
- [11] **N.H. Khan, Y. Wang, D. Tian, R. Jamal, S. Iqbal, M.A.A. Saif, M.A. Ebeed**, Novel modified lightning attachment procedure optimization technique for optimal allocation of the FACTS devices in power systems, *IEEE Access*, 9 (2021) 47976–47997. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3059201
- [12] **M.K. Kar, S. Kanungo, F. Alsaif, T.S. Ustun**, Optimal placement of FACTS devices using modified whale optimization algorithm for minimization of transmission losses, *IEEE Access*, 12 (2024) 130816–130831. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3458039
- [13] **B. Ismail, N.I. Abdul Wahab, M.L. Othman, M.A.M. Radzi, K. Naidu Vijayakumar, M.N. Mat Naain**, A comprehensive review on optimal location and sizing of reactive power compensation using hybrid-based

approaches for power loss reduction, voltage stability improvement, voltage profile enhancement and loadability enhancement, *IEEE Access*, 8 (2020) 222733–222765. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043297

[14] **A.A. Shehata, A. Refaat, M.K. Ahmed, N.V. Korovkin**, Optimal placement and sizing of FACTS devices based on autonomous groups particle swarm optimization technique, *Archives of Electrical Engineering*, 70 (2021) 161–172. DOI: 10.24425/ae.2021.136059

[15] **M. Zadehbagheri, R. Ildarabadi, A.M. Javadian**, Optimal power flow in the presence of HVDC lines along with optimal placement of FACTS in order to power system stability improvement in different conditions: technical and economic approach, *IEEE Access*, 11 (2023) 57745–57771. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3283573

[16] **T.S. Kumar, K. Sathiyasekar**, Enhancing system stability with FACTS devices using least mean square based neural network algorithm, 2023 4th International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC), (2023) 1462–1466. DOI: 10.1109/ICOSEC58147.2023.10276121

[17] **M. Pandya**, Rotor angle stability analysis with coordinated control of FACTS devices using particle swarm optimization, 2024 IEEE 12th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), (2024) 42–46. DOI: 10.1109/SEGE62220.2024.10739519

[18] **N.H. Khan, Y. Wang, D. Tian, R. Jamal, S. Kamel, M. Ebeed**, Optimal siting and sizing of SSSC using modified salp swarm algorithm considering optimal reactive power dispatch problem, *IEEE Access*, 9 (2021) 49249–49266. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3061503

[19] **Y. Siregar, P.N. Agustina, Z. Pane**, Optimization placement of SVC and TCSC in power transmission network 150 kV Sumbagut using artificial bee colony algorithm, 2021 4th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), (2021) 635–639. DOI: 10.1109/ISRITI54043.2021.9702832

[20] **M. Saini, M.R. Djalal, A.M.S. Yunus**, FACTS: SVC optimization for optimal power flow using craziness particle swarm optimization in Sulselrabar system, 2024 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia, (2024) 346–351. DOI: 10.1109/ICPSAsia61913.2024.10761326

[21] **A.A. Ahmad, R. Sirjani**, Optimal placement and sizing of multi-type FACTS devices in power systems using metaheuristic optimisation techniques: An updated review, *Ain Shams Engineering Journal*, 11 (3) (2020) 611–628. DOI: 10.1016/j.asej.2019.10.013

[22] **I.S. Voronin, N.V. Korovkin, A.N. Modulina, V.V. Chernysheva**, Programma s ispolzovaniyem mnogoyadernoy obrabotki dannykh dlya optimalnoy rasstanovki aktivno-adaptivnykh ustroystv v EES na osnove dvukh kriteriyev kachestva [A program using multicore data processing for optimal placement of FACTS devices in a power grid based on two quality criteria], Russian Federation Certificate of state registration of a computer program, No. 2025685976 (2025).

[23] Department of energy of the Institute of socio-economic and energy problems of the north of the Komi scientific center of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Test schemes, energy.komisc.ru/dev/test_cases#Link_3. Accessed October 11, 2025

[24] **I.S. Voronin, N.V. Korovkin**, Optimization of placement of FACTS in electric power system based on soft computing, 2025 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), (2025) 142–146. DOI: 10.1109/UralCon67204.2025.11206624

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Iliia S. VORONIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.

E-mail: isvoronin@yandex.ru

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

Nikolay V. KOROVKIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

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

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>

Поступила: 13.10.2025; Одобрена: 08.12.2025; Принята: 16.12.2025.

Submitted: 13.10.2025; Approved: 08.12.2025; Accepted: 16.12.2025.