

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№3 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/2710-3420>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,

д.т.н., профессор

Никифоров А. С.,

д.т.н., профессор

Новожилов А. Н.,

д.т.н., профессор

Алиферов А. И.,

д.т.н., профессор (Российская Федерация)

Кошеков К. Т.,

д.т.н., профессор

Приходько Е. В.,

к.т.н., профессор

Кислов А. П.,

к.т.н., доцент

Нефтисов А. В.,

доктор PhD

Шеръязов С. К.

т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)

Искакова З. С.

технический редактор

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

**А. Б. Жантлесова¹, А. Д. Умурзакова², А. Е. Еруланова³,
П. Ш. Мадиди⁴, *А. Г. Калтаев⁵**

^{1,2,3,4}Казахский государственный

университет имени С. Сейфуллина,

Республика Казахстан, г. Астана;

⁵Торайғыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3730-0579>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7683-5256>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8429-8507>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5930-8112>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

*e-mail: abdulla911@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ МЕТОДОМ ДИАКОПТИКИ

Растущее число потребителей и нестабильный характер генерации возобновляемых источников энергии (ВИЭ) снижают эффективность традиционных методов моделирования крупных энергосистем. Метод диакоптики, основанный на декомпозиции системы на подсистемы, позволяет сократить объем вычислений, однако классические реализации требуют последовательного (итеративного) наращивания схемы, что приводит к высоким вычислительным затратам при масштабировании.

В данной статье предлагается модификация метода диакоптики для расчета обобщенных параметров (Z-матрицы) энергосистем. В отличие от классического подхода, основанного на последовательном наращивании схемы (например, классический метод Крона), предложенный метод учитывает топологию всей сети одновременно.

Исследование базируется на теории графов (построение матриц инцидентий и матриц токораспределения) и матричном анализе. Декомпозиция сложной системы на взаимодействующие подсистемы с различными характеристиками генерации и нагрузки позволяет независимо вычислять обобщенные параметры для каждой

подсистемы с последующей интеграцией в общее решение, что сокращает объем вычислений и упрощает моделирование.

Предложенный подход открывает возможности для анализа надежности, включая оценку резервирования узлов и выявление уязвимых элементов на основе графовых моделей, что способствует повышению устойчивости энергосистем в условиях интеграции ВИЭ. Разработанный алгоритм может служить основой для создания систем поддержки принятия решений при проектировании и эксплуатации крупных энергосистем.

Ключевые слова: диакоптика, электрические сети, топология, теория графов, модель, узел, режим.

Введение

В условиях глобальной трансформации электроэнергетического комплекса, связанной с активным внедрением возобновляемых источников энергии (ВИЭ), развитием распределённой генерации, цифровизацией процессов управления и формированием интеллектуальных электроэнергетических систем (Smart Grid) [1; 2; 3], существенно возрастает значимость задач обеспечения надёжности, устойчивости и адаптивности режимов работы энергосистем. Современные энергосистемы приобретают сетевую, иерархическую и модульную структуру, что требует применения новых аналитических форматов и методов расчёта, адекватных возросшей структурной и динамической сложности объектов [4; 5; 6].

Традиционные подходы к анализу и оптимизации, основанные на представлении энергосистемы как единого монолитного объекта, в условиях крупномасштабных сетей, высокой размерности математических моделей и стохастического характера генерации ВИЭ сталкиваются с существенными вычислительными, методическими и практическими ограничениями.

В данном контексте метод диакоптики представляет собой актуальный и методологически обоснованный инструмент анализа сложных электроэнергетических систем [6; 7; 8]. Его ключевая особенность заключается в реализации принципа декомпозиции, предполагающего разбиение исходной системы на совокупность взаимосвязанных, но автономно анализируемых подсистем. Такой подход позволяет формировать расчётные модели отдельных регионов, узлов или микросетей с различным характером генерации и нагрузки, включая зоны с высокой долей нестабильных ВИЭ, с последующим согласованным синтезом глобального решения.

Применение диакоптического подхода обеспечивает ряд принципиальных преимуществ:

- существенное снижение вычислительной сложности и повышение масштабируемости моделей, что особенно важно при выполнении расчётов в реальном времени и сценарного анализа;
- повышение гибкости и адаптивности управления, за счёт возможности независимой оптимизации режимов отдельных подсистем с учётом их локальных технических и нормативных ограничений;
- упрощение анализа межсистемных связей, включая координацию потоков мощности, оценку устойчивости и минимизацию потерь в соответствии с требованиями действующих стандартов и регламентов.

Метод диакоптики формирует методологическую основу перехода от централизованных и монолитных расчётных схем к модульным и иерархическим моделям, что полностью соответствует современным тенденциям развития электроэнергетики. В настоящей статье рассматриваются принципы применения диакоптического подхода, приводятся результаты его апробации на тестовых моделях и обсуждаются перспективы использования метода для задач анализа и оптимального управления энергосистемами в условиях высокой доли ВИЭ и цифровизации энергетической отрасли [9; 10].

Материалы и методы

Проведенный анализ литературы показывает, что, несмотря на длительную историю развития метода диакоптики, большинство существующих работ ориентированы на энергосистемы средней размерности (до нескольких десятков узлов). Классические подходы [1] и их современные модификации [4] демонстрируют эффективность на тестовых схемах, однако их масштабирование на крупные системы с тысячами узлов сопряжено с высокими вычислительными затратами из-за необходимости последовательных итераций.

Кроме того, крайне ограничено число исследований, в которых метод диакоптики применяется непосредственно к анализу больших энергосистем в условиях интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Современные тенденции развития электроэнергетики требуют учета нестабильной генерации и усложнения топологии, что делает эту задачу особенно актуальной.

Таким образом, настоящее исследование восполняет выявленный пробел, распространяя метод диакоптики на крупные энергосистемы и демонстрируя снижение вычислительных затрат и повышение надежности при определении обобщенных параметров.

Для преодоления вычислительных ограничений традиционных методов при анализе крупных энергосистем в данной работе применяется метод диакоптики. Основой служит подход Г. Крона [1], модифицированный и развитый в исследованиях [5].

Задачи метода и последовательность их решения:

- Топологическое моделирование системы. На основе схемы энергосистемы (Рис. 1) методами теории графов строится её граф, определяются матрица инцидентий и осуществляется декомпозиция на связанные подсистемы.

- Расчёт параметров подсистем. Для каждой выделенной подсистемы независимо вычисляются собственные матрицы обобщённых параметров (собственные Z-матрицы).

- Учёт связей между подсистемами. Формируется матрица токораспределения, математически описывающая взаимодействия на границах декомпозиции (в ветвях разделения).

- Синтез общих параметров. На основе матриц подсистем и матрицы связей выполняется сборка полной матрицы обобщённых параметров (Z-матрицы) для всей энергосистемы.

Предлагаемый метод направлен на достижение кардинального (на несколько порядков) сокращения объема вычислений при анализе режимов, оптимизации потоков мощности и оценке устойчивости крупных энергосистем, с обязательным сохранением требуемой точности расчетов. Достоверность и эффективность разработанной методики подтверждены ее апробацией в рамках конференции.

В качестве основы для сопоставления результатов использована модель энергосистемы (Рисунок 1). Применение теории графов для исследования топологии сети позволило получить важные данные о структуре и функциональных особенностях сложного энергообъекта. Математический аппарат теории графов обеспечил эффективное моделирование взаимосвязей в системе, что углубило понимание ее динамики и существенно упростило решение задач по оптимизации и управлению.

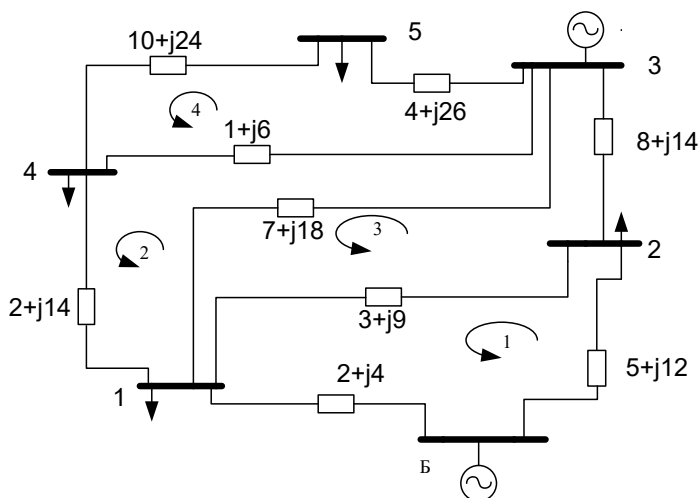


Рисунок 1 – Схема энергосистемы

В основе анализа структуры энергосистемы лежит теория графов, которая позволяет представить ее в виде совокупности двух элементов: узлов (вершин) и соединяющих их ветвей (ребер). В данной модели узлы символизируют генераторы, трансформаторы и центры потребления, а ветви – линии передачи, обеспечивающие их взаимосвязь.

При разработке метода приняты следующие допущения:

- энергосистема рассматривается как линейная, что справедливо для установившихся режимов и расчетов токов короткого замыкания.
- параметры ветвей (сопротивления, проводимости) считаются постоянными и не зависящими от режима работы.
- все узлы системы сохраняются при декомпозиции (полнота графа).
- ветви разделения выбираются таким образом, чтобы сохранялась связность подсистем.
- матрицы инцидентий строятся для ориентированного графа с произвольно выбранными направлениями ветвей.

Топология системы должна быть известна полностью, так как частично определенные графы требуют предварительного восстановления связей.

На рисунке 2 приведено графическое отображение такой модели: исходная схема и соответствующий ей направленный граф, где каждый узел и каждая ветвь имеют индивидуальный номер.

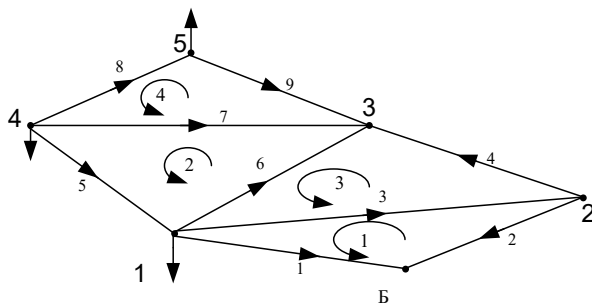


Рисунок 2 – Схема графов энергосистемы

Энергосистема представляется в виде ориентированного графа $G(V, E)$, где V – множество узлов ($|V| = n$), E – множество ветвей ($|E| = m$). Для исследуемой схемы $n = 11$, $m = 21$. Чтобы разомкнуть все циклы (контуры) в графе, оставив при этом все узлы нетронутыми, требуется удалить наименьшее возможное число связей. Результат такой операции – образование деревьев графа. На рисунке 3 показаны 2 варианта дерева графа для одной и той же энергосистемы из 75 деревьев.

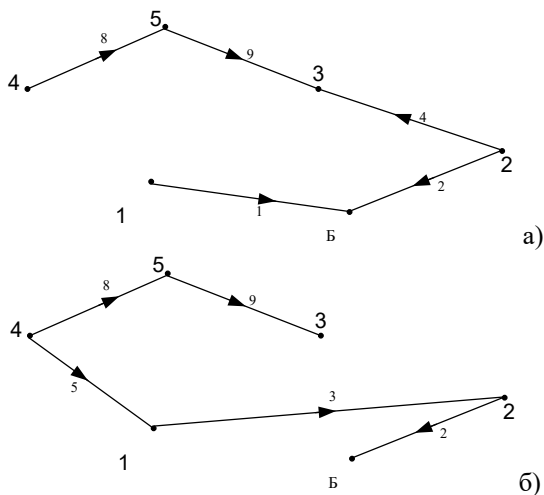


Рисунок 3 – Варианты деревьев графа для энергосистемы:

(а) дерево графа с началом в узле 1,

(б) дерево графа с началом в узле базового узла

Ветви, которые были удалены в процессе построения дерева, именуются хордами графа. Их последовательное присоединение к исходной древовидной структуре приводит к образованию замкнутых контуров. Следовательно, количество независимых контуров в электрической цепи строго соответствует числу хорд.

Переходя к аналитическому описанию энергосистемы, следует отметить, что в его основе может лежать любое из множества возможных деревьев графа, поскольку выбор конкретной формы дерева не влияет на количество уравнений, описывающих систему. Для иллюстрации на рисунке 3 приведены два варианта таких деревьев.

Традиционный подход требует расчета обобщенных параметров для каждой подсистемы с последующим учетом соединительных ветвей и объединением в единую матрицу.

Результаты и обсуждения

Предложенный алгоритм учитывает все ветви сети одновременно, что позволяет кратно сократить вычислительные затраты и повысить общую эффективность расчетов. Составляется диагональная матрица $\underline{Z}_V$ размерности $m \times m$, где диагональные элементы равны сопротивлению соответствующей ветви. Исходными данными для программы служат значения сопротивлений ветвей $\underline{Z}_V$, определяемые по схеме на рисунке 1. Указанные сопротивления формируют диагональную матрицу, элементами которой являются комплексные числа:

$$\underline{Z}_V = \text{diag}\{2+4i, 5+12i, 3+9i, 8+14i, 2+14i, 7+18i, 1+6i, 10+24i, 4+26i\}$$

Топология энергосистемы описывается матрицей инцидентности M (таблица 1), которая устанавливает соответствие между узлами и ветвями, отображая структуру связей системы. Строки матрицы идентифицируют узлы, столбцы – ветви. Заполнение матрицы осуществляется по направленному графу (рисунок 2) по следующему правилу: элемент m_{ij} принимает значение $+1$, если j -я ветвь исходит из i -го узла; -1 , если ветвь входит в узел; и 0 при отсутствии связи между данным узлом и ветвью.

Таблица 1 – Матрица 2 инцидентности М

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0	1	0	-1	1	0	0	0
2	0	1	-1	1	0	0	1	0	0
3	0	0	0	-1	0	-1	-1	0	-1
4	0	0	0	0	1	0	1	1	0
5	0	0	0	0	0	0	0	-1	1

Нулевые элементы соответствуют отсутствию связи. Построение полной матрицы инцидентности является ключевым этапом, так как именно она позволяет в дальнейшем перейти к одновременному учету всех ветвей без последовательного наращивания схемы.

Предложенный подход упрощает расчёты за счёт одновременного учёта всех ветвей сети. Использование матриц инцидентности М и токораспределения С (таблица 2) обеспечивает точное описание связей в системе, что важно для её анализа и оптимизации. На основе матрицы инцидентности и матрицы проводимостей ветвей была рассчитана матрица токораспределения С. Фрагмент матрицы представлен в таблице 2. Значения коэффициентов токораспределения показывают, как токи ветвей распределяются между узлами системы

Матрица потоков распределения С определяется по формуле:

$$\underline{C} = \underline{Z}_v^T * \underline{M} * \underline{Z}_v \quad (1)$$

Таблица 2 – Матрица 3 потоков распределения С

	1	2	3	4	5
1	1.5940+0.2530i	0.1027+0.2780i	0.0506+0.1450i	0.0506+0.1450i	0.0506+0.1450i
2	0.1458+0.4080i	1.7223+0.6140i	-0.0673-0.1930i	0.0979+0.2670i	-1.8987-1.0960i
3	0.1229+0.3170i	-0.0981-0.2990i	1.8827+0.7230i	-0.0778-0.2240i	-1.8297-0.5170i
4	0.0886+0.2410i	0.1558+0.4470i	-0.1120-0.3340i	1.9667+0.8110i	-2.0991-1.1650i
5	-0.1052-0.2900i	0.0001+0.0000i	0.0000+0.0001i	0.1052+0.2900i	0.0000+0.0011i
6	0.1561+0.4030i	0.0011+0.0000i	-0.0892-0.2760i	0.0011+0.0000i	-0.0669-0.1270i
7	0.0000+0.0011i	0.2792+0.8010i	-0.2678-0.7700i	0.2836+0.8190i	-0.2950-0.8500i
8	0.0000+0.0011i	0.0000+0.0011i	0.0000+0.0011i	0.1047+0.3020i	-0.1047-0.3020i
9	0.0000+0.0011i	0.0000+0.0011i	-0.0518-0.1490i	0.0000+0.0011i	-0.0518-0.1490i

По формуле (1) нашли матрицу обобщенных параметров $\underline{Z}$ (таблица 3):

$$\underline{Z} = \underline{C}^T * \underline{Z}_v * \underline{C} \quad (2)$$

Таблица 3 – Матрица 4 обобщенных параметров $\underline{Z}$

	1	2	3	4
1	2.176+6.882i	1.266+3.525i	1.591+5.015i	1.857+5.942i
2	1.266+3.525i	1.590+4.410i	1.723+4.913i	1.986+6.106i
3	1.591+5.015i	1.723+4.913i	2.604+8.054i	2.427+7.540i
4	1.857+5.942i	1.986+6.106i	2.427+7.540i	2.954+9.110i

Также можно определить токи и напряжение в электрической системе по формулам

$$\underline{I} = \underline{Z}_v^{-1} * \underline{Z}_v * \underline{C} * \underline{J}, \underline{U} = \underline{C}^T * \underline{Z}_v * \underline{C} * \underline{J} \quad (3)$$

где $\underline{J}$ столбцевая матрица задающих токов.

Если принять $\underline{J}=[2, -1, 3, 0]^T$ А, то

$$\underline{U}=[7.859+25.284j, 6.111+17.379j, 9.271+29.279j, 9.009+28.398j]^T$$

Для каждой ветви k , соединяющей узел и базу $I_k=Y_k(U_p-U_q)$ то $\underline{I}=[5.8427+0.9566j, 1.4153+0.0802j, 0.8488+0.0887j, 0.5436-0.1960j, 0.2065+0.0494j, 0.1663-0.0068j, 0.001-0.001j, 1.1415+0.1002j, 1.1536-0.1791j]^T$

Диакоптика позволяет проводить комплексный анализ надёжности энергосистем, включая оценку резервирования и устойчивости к отказам, производить анализ доступности резервных мощностей в узлах, оценить надёжность и пропускную способность линий электропередач, помогает определить, насколько система готова к перераспределению нагрузок в случае выхода из строя отдельных элементов.

Анализ показывает, что предложенный модернизированный диакоптический метод имеет как сильные стороны, так и ограничения. Ключевое преимущество подхода заключается в отсутствии накопления погрешности, характерного для традиционного метода диакоптики при дроблении схемы на множество подсистем, если систему делить на подсистемы, то при решении накапливается погрешность, примерно в 2 %. Однако, платой за высокую точность является увеличение времени расчета по сравнению с классическим делением на подсистемы.

Выводы

Проведённое исследование показало, что модернизированный метод диакоптики является эффективным инженерным инструментом анализа и управления сложными электроэнергетическими системами в условиях децентрализации генерации и высокой доли возобновляемых источников энергии. В отличие от традиционных централизованных расчётных подходов, предложенный метод обеспечивает масштабируемость моделей и адаптацию унаследованных сетей к современной архитектуре энергосистем.

Результаты расчётов для крупномасштабных сетей со сложной топологией подтверждают повышение точности и вычислительной эффективности: погрешность снижена на 2 %. В отличие от существующих подходов, требующих последовательного (итеративного) наращивания схемы, предложенный метод учитывает топологию всей сети одновременно, что позволяет исключить вычислительную сложность, характерную для многоузловых систем.

Проведенный анализ показывает, что расчет единой системы гарантирует высокую точность и отсутствие эффекта накопления ошибки, характерного для декомпозиционных методов.

Метод диакоптики также повышает надёжность и устойчивость энергосистем, обеспечивая корректное моделирование аварийных режимов, анализ резервных путей и выявление критически уязвимых узлов с использованием графовых моделей. Дополнительно показано, что разработанный алгоритм может служить основой для создания цифровых двойников энергосистем и оптимизации потоков мощности, что подтверждает его высокую практическую ценность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Kron, G.** Tensor analysis of rotating machinery // Electrical Engineering. – 1933. – Vol. 52(1). – P. 51–51. – <https://doi.org/10.1109/EE.1933.6430593>
- 2 **Pu, H., Fan, X. and Zhen, Z.** Fault Section Location Method of Distribution Network Based On Graph Attention Network. – SSRN Preprint. – <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5342027>
- 3 **Akhmetbaev, D. S., Jandigulov, A. R. and Akhmetbaev, A. D.** Improving Algorithms for Searching for Trees of Directed Graphs of Electrical Power Systems // Power Technology and Engineering. – 2024. – Vol. 58(2). – P. 349–355. – <https://doi.org/10.1007/s10749-024-01819-6>
- 4 **Zhantlessova, A., Akhmetbayev, D., and Issabekova, B.** Determination of Generalised Parameters of Large Power Systems By the Diacoptics Method //

2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2024. – P. 443–447. – <https://doi.org/10.1109/UralCon62137.2024.10718917>

5 **Labrador Rivas, E. and Abrão, T.** Faults in smart grid systems: Monitoring, detection and classification // Electric Power Systems Research. – 2020. – Vol. 189. – P. 106602. – <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106602>.

6 **Ali, O., Elmarghany, M. R., Abdelsalam, M. M., Sabry, M. N. and Hamed, A. M.** Closed-loop home energy management system with renewable energy sources in a smart grid: A comprehensive review // Journal of Energy Storage. – 2022. – Vol. 50. – P. 104609. – <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104609>

7 **Matousek, D. and Brtnik, B.** Diakoptic Method as a Generalized Form of the Thevenin's Theorem // 2022 32nd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA). – 2022. – P. 01–04. – <https://doi.org/10.1109/RADIOELEKTRONIKA54537.2022.9764948>

8 **Gao, H., Yu, X., Sui, Y., Shao, F. and Sun, R.** Topological Graph Convolutional Network Based on Complex Network Characteristics // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 64465–64472. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3183103>

9 **Lai, X., Cao, M., Liu, S. and Sun, C.** Low-voltage distribution network topology identification method based on characteristic current // 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). – 2021. – P. 1233–1238. – <https://doi.org/10.1109/ACPEE51499.2021.9437092>

10 **Pesteh, S., Moayyed, H. and Miranda, V.** Favorable properties of Interior Point Method and Generalized Correntropy in power system State Estimation // Electric Power Systems Research. – 2020. – Vol. 178. – P. 106035. – <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106035>

Поступило в редакцию 26.04.26.

Поступило с исправлениями 29.04.26.

Принято в печать 31.08.26.

*А. Б. Жантлесова¹, А. Д. Умурзакова², А. Е. Еруланова³,
П. Ш. Мадия⁴, *А. Г. Калтаев⁵*

^{1,2,3,4}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

⁵Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

26.04.26 ж. баспаға түсті.

29.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ДИАКОПТИКА ӘДІСІМЕН ЭНЕРГИЯ ЖҮЙЕСІНІҢ ЖАЛПЫЛАНҒАН ПАРАМЕТРЛЕРІН АНЫҚТАУ

Тұтынушылардың көбеюі және жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) өндірудің тұрақсыз сипаты ірі электр жүйелерін модельдеудің дәстүрлі әдістерінің тиімділігін төмендетеді. Жүйенің ішкі жүйелерге ыдырауына негізделген диакоптика әдісі есептеу көлемін азайтуға мүмкіндік береді, бірақ классикалық іске асырулар тізбектің дәйекті (итеративті) өсуін талап етеді, бұл масштабтау кезінде жоғары есептеу шығындарына әкеледі.

Бұл мақалада энергия жүйелерінің жалпыланған параметрлерін (z-матрицаларын) есептеу үшін диакоптика әдісін өзгерту ұсынылады. Схеманы дәйекті түрде құруға негізделген классикалық тәсілден айырмашылығы (мысалы, классикалық Крон әдісі), ұсынылған әдіс бүкіл желінің топологиясын бір уақытта ескереді.

Зерттеу графиктер теориясына (оқиға матрицалары мен ток тарату матрицаларын құру) және матрицалық талдауға негізделген. Күрделі жүйенің әртүрлі генерация және жүктеме сипаттамалары бар өзара әрекеттесетін ішкі жүйелерге ыдырауы әрбір Ішкі жүйе үшін жалпыланған параметрлерді дербес есептеуге мүмкіндік береді, содан кейін жалпы шешімге біріктіріледі, бұл есептеу көлемін азайтады және модельдеуді жеңілдетеді.

Ұсынылған тәсіл сенімділікті талдауға, соның ішінде түйіндерді резервтеуді бағалауға және графикалық модельдер негізінде осал элементтерді анықтауға мүмкіндік береді, бұл ЖЭК интеграциясы жағдайында энергия жүйелерінің тұрақтылығын арттыруға ықпал етеді. Өзірленген алгоритм ірі электр желілерін жобалау және пайдалану кезінде шешімдерді қолдау жүйелерін құруға негіз бола алады.

Кілтті сөздер: диакоптика, электр желілері, топология, графика теориясы, модель, түйін, режим.

*A. B. Zhantlessova¹, A. D. Umurzakova², A. E. Yerulanova³,
P. S. Madi⁴, *A. G. Kaltayev⁵*

*^{1,2,3,4}S. Seifullin Kazakh State University,
Republic of Kazakhstan, Astana;*

*⁵Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.*

Received 26.04.26.

Received in revised form 29.04.26.

Accepted for publication 31.08.26.

DETERMINATION OF GENERALIZED PARAMETERS OF THE POWER SYSTEM BY THE METHOD OF DIACOPTICS

The growing number of consumers and the unstable nature of the generation of renewable energy sources (RES) reduce the effectiveness of traditional methods of modeling large energy systems. The method of diacopectics, based on the decomposition of the system into subsystems, reduces the amount of calculations, however, classical implementations require sequential (iterative) circuit expansion, which leads to high computational costs when scaling.

This article proposes a modification of the diacopectic method for calculating generalized parameters (Z-matrices) of power systems. Unlike the classical approach based on sequential circuit expansion (for example, the classical Crohn's method), the proposed method takes into account the topology of the entire network at the same time.

The research is based on graph theory (construction of incidence matrices and current distribution matrices) and matrix analysis. The decomposition of a complex system into interacting subsystems with different generation and load characteristics makes it possible to independently calculate generalized parameters for each subsystem, followed by integration into a common solution, which reduces the amount of calculations and simplifies modeling.

The proposed approach opens up opportunities for reliability analysis, including node redundancy assessment and identification of vulnerable elements based on graph models, which helps to increase the stability of energy systems in the context of renewable energy integration. The developed algorithm can serve as a basis for creating decision support systems for the design and operation of large power systems.

Keywords: diacopectics, electrical networks, topology, graph theory, model, node, mode.

Теруге 07.09.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

19,0 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Шукитова А. Б.

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4601

Сдано в набор 07.09.2026 г. Подписано в печать 30.09.2026 г.

Электронное издание

19,0 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: Шукитова А. Б.

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4601

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz