

УДК 621.331.3.025.1

Повышение эффективности электроснабжения южной части Ирака за счет формирования единой энергосистемы

М. Д. Д. Алсултан^{1,2}, М. В. Шевлюгин¹

¹Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Российская Федерация, 127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

²Университет Кербелы, Ирак, Кербела

Для цитирования: Алсултан М. Д. Д., Шевлюгин М. В. Повышение эффективности электроснабжения южной части Ирака за счет формирования единой энергосистемы // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 341–350. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-341-350

Аннотация

Цель: Электроэнергетическая система южной части Ирака играет ключевую роль в обеспечении региона энергией, необходимой для его социально-экономического развития. Однако существующая инфраструктура характеризуется децентрализованным расположением питающих центров, которые функционируют с ограниченной координацией между собой. Это приводит к нестабильности энергоснабжения, частым отключениям электроэнергии; потерям энергии при транспортировке; ограничению интеграции возобновляемых источников энергии (например, солнечной и ветровой). **Методы:** Одним из эффективных решений для преодоления этих проблем является объединение (закольцовывание) питающих центров энергосистемы, представляющее собой объединение всех питающих центров в единую сеть. **Результаты:** Этот подход позволит значительно повысить устойчивость энергосистемы к перегрузкам и аварийным отключениям, обеспечив бесперебойную подачу электроэнергии в регионе. В статье рассматриваются основные преимущества закольцовывания, включая снижение энергопотерь, оптимизацию распределения нагрузки, экономическую эффективность и интеграцию новых источников энергии, в том числе возобновляемых. Особое внимание уделяется техническим аспектам реализации, таким как строительство новых линий электропередачи, модернизация подстанций, внедрение цифровых технологий управления и подготовка квалифицированных кадров. **Практическая значимость:** Объединение различных центров снабжения, расположенных в южной части Ирака, в единую взаимосвязанную энергосистему представляет собой чрезвычайно важный маневр, направленный на укрепление энергетической безопасности в этом конкретном регионе, который столкнулся с многочисленными проблемами в области энергоснабжения и распределения энергии. Этот инновационный подход не только повысит надежность и стабильность энергоснабжения в регионе, но и заложит прочную основу для устойчивого и продолжительного экономического роста и инициатив в области развития, необходимых для будущего процветания региона. Успешное осуществление этого амбициозного проекта требует значительных инвестиционных ресурсов и согласованных усилий многих заинтересованных сторон, однако существенные преимущества, которые он обещает дать в долгосрочной перспективе, делают его не только необходимым, но и исключительно обнадеживающим для общего развития региона. Такая интеграция имеет серьезные последствия, поскольку она не только решает неотложные энергетические проблемы, но и открывает путь к созданию более устойчивой инфраструктуры, способной поддерживать различные виды экономической деятельности и повышать качество жизни местного населения.

Ключевые слова: Электроснабжение, кольцевая сеть, потери электроэнергии, надежность энергоснабжения, дефицит мощности, синхронизация потребления, энергетическая эффективность.

Введение

Объединенные (кольцевые) электрические сети — это тип электрической сети, в которой энергия имеет возможность передаваться по кольцу линий электропередачи. Замкнутые сети представляют собой сети, в которых электроэнергия доставляется к потребителям как минимум с двух сторон. Это позволяет обеспечить высокую надежность и отказоустойчивость системы, так как при повреждении одного из элементов сети подача электроэнергии может быть перенаправлена по другим линиям и кольцо продолжит функционировать [1].

В случае выхода из строя какого-либо участка радиальных (не кольцевых) сетей многие потребители остаются без электричества, что является значительным недостатком таких сетей. В связи с этим для обеспечения надежного электроснабжения важных потребителей, которым нельзя позволить длительные перерывы в электроснабжении, используются замкнутые сети [2–6].

Существуют различные типы замкнутых сетей, включая простые, где нагрузки питаются только с двух сторон, и сложные, где электроэнергия может подаваться к узловым точкам с трех и более сторон [7, 8].

Объединение энергосистемы

Объединение питающих центров в кольцевую систему, помимо надежности электроснабжения, несет еще очень важную функцию — возможность маневра и перераспределения потребляемых и генерирующих мощностей в режиме реального времени для компенсации их дефицита и избытка [9, 10]. На рис. 1. изображена схема объединения различных центров питания в единую энергетическую систему на карте Южного Ирака (ЭЭС). зеленым цветом показаны предлагаемые ЛЭП для закольцовывания энергосистемы

Рис. 2 представляет изменение показателей питания и потребления для каждой энергетической

системы (ЭС) в течение суток, обозначает различные энергетические системы по районам. Некоторые линии демонстрируют резкие изменения в конкретные часы, что может быть связано с изменением нагрузки или потребностей в этих регионах.

Следует отметить, что полное объединение питающих центров всех районов южной части Ирака (рис. 2) не решает проблемы дефицита мощности, особенно в утреннее и вечернее время. В связи с этим из экономических и технических факторов была предложена методика ранжирования районов энергопотребления в виде целевой функции по трем параметрам:

1. Синхронизация времени генерации и потребления энергии в объединенных районах. При этом в одно и то же время сумма генерирующих мощностей объединенных районов должна соответствовать сумме мощностей потребителей тех же районов (выражение 1) [11]:

$$P(t)_{\text{эл.э}}^{\text{ген}} = P(t)_{\text{эл.э}}^{\text{пот}}, \quad (1)$$

где $P(t)_{\text{эл.э}}^{\text{ген}}$ — мощность генерации электроэнергии в конкретный момент времени.

$P(t)_{\text{эл.э}}^{\text{пот}}$ — мощность потребления электроэнергии в конкретный момент времени.

2. Снижение дефицита мощности в объединенных районах (выражение 2) [11]:

$$\begin{aligned} \Delta P(t)_{\text{эл.э}} &= P(t)_{\text{эл.э}}^{\text{ген}} - P(t)_{\text{эл.э}}^{\text{пот}} = \\ &= \sum_{i=1}^n P(t)_i^{\text{ген}} - \sum_{j=1}^m P(t)_j^{\text{пот}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta P(t)_{\text{эл.э}}$ — дефицит мощности в конкретный момент времени.

n — количество регионов южного Ирака;

$P(t)_i^{\text{ген}}$ — мощность генерации электроэнергии в конкретный момент времени i -того региона южного Ирака;

$P(t)_j^{\text{пот}}$ — мощность потребления электроэнергии в конкретный момент времени j -того региона южного Ирака.

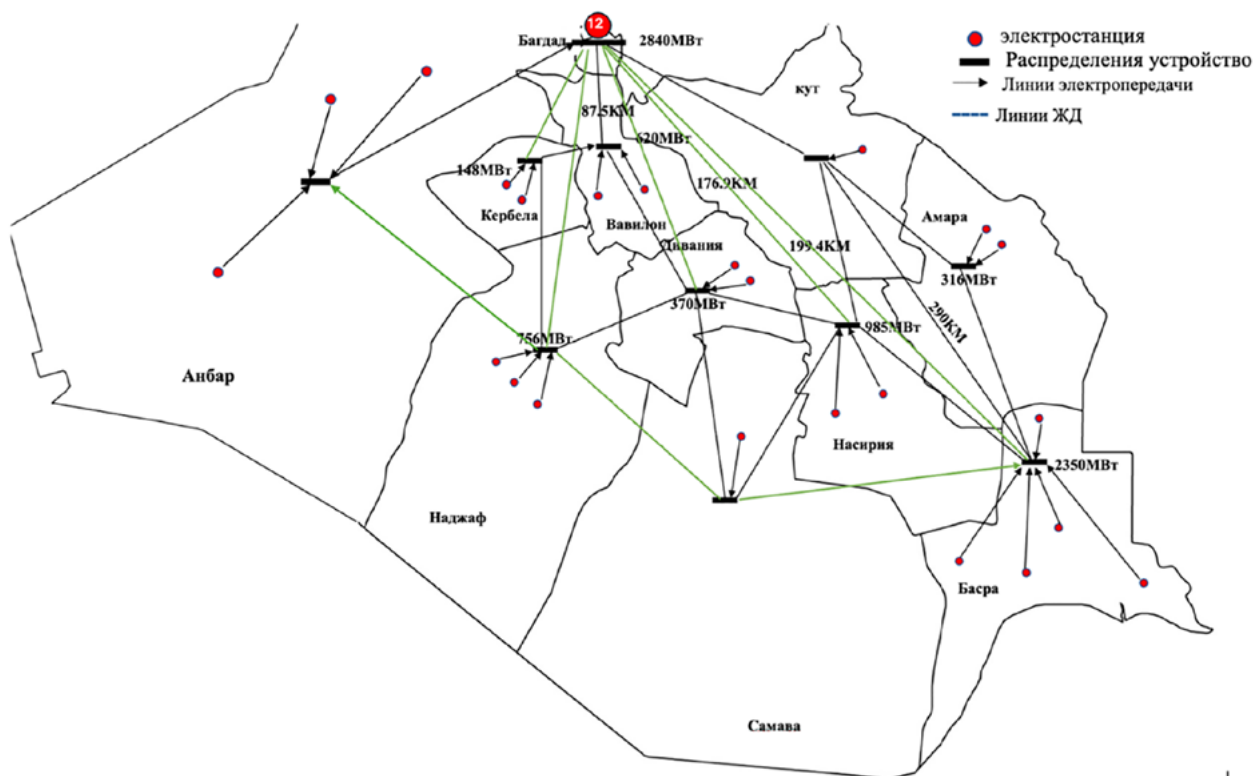


Рис. 1. Объединение питающих центров в единую ЭЭС

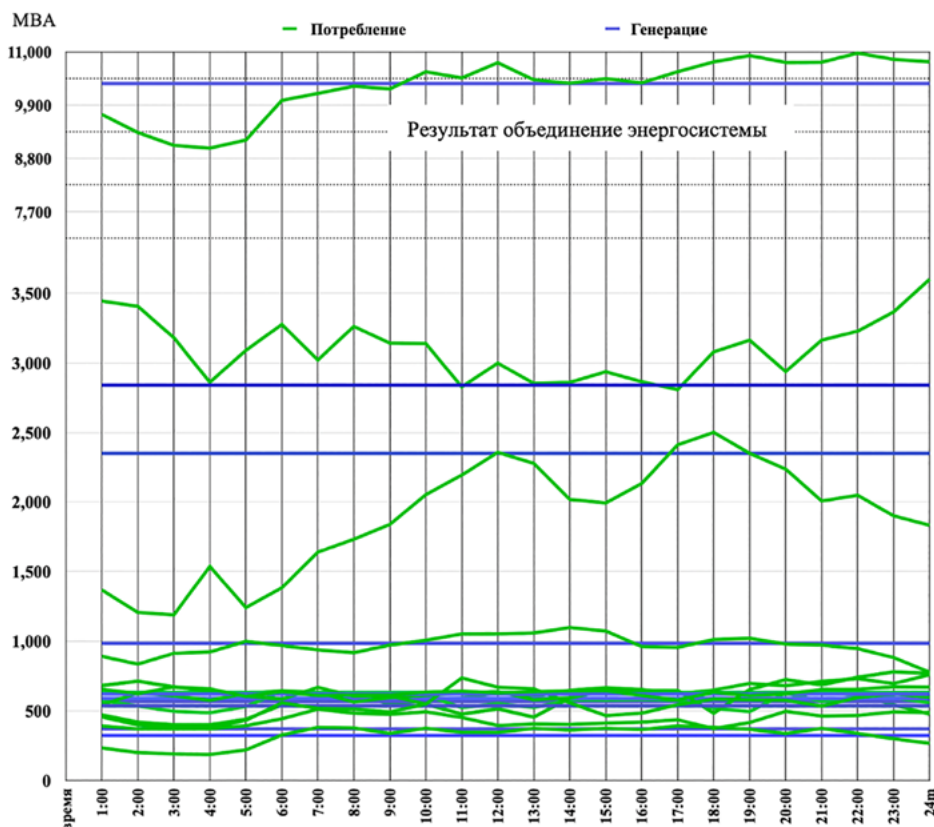


Рис. 2. Показание питания и потребления каждой ЭС и результат объединения ЭЭС всех районов южной части Ирака (МВА/ч)

Как следствие, выравниваются годовые значения выработки и потребления электроэнергии (выражение 3), а также снизится общий ее дефицит (выражения 4 и 5) [11].

$$A_{\text{эл.э}}^{\text{год. ген}} = A_{\text{эл.э}}^{\text{год. пот}}, \quad (3)$$

где $A_{\text{эл.э}}^{\text{год. ген}}$ — годовая выработка электроэнергии южной части Ирака.

$A_{\text{эл.э}}^{\text{год. пот}}$ — годовое потребление электроэнергии южной части Ирака.

$$D_{\text{эл.э}}^{\text{год}} = A_{\text{эл.э}}^{\text{год. ген}} + A_{\text{эл.э}}^{\text{год. имп}} - A_{\text{эл.э}}^{\text{год. пот}}, \quad (4)$$

где $D_{\text{эл.э}}^{\text{год}}$ — дефицит электроэнергии в год;

$A_{\text{эл.э}}^{\text{год. ген}}$ — энергия генерации в год;

$A_{\text{эл.э}}^{\text{год. имп}}$ — энергия импорта в год;

$A_{\text{эл.э}}^{\text{год. пот}}$ — потребление энергии в год.

$$D_{\text{эл.э}}^{\text{год}} = \sum_{i=1}^n \int_0^{T_{\text{год}}} P(t)_i^{\text{ген}} dt + \sum_{j=1}^m \int_0^{T_{\text{год}}} P(t)_j^{\text{имп}} dt - \sum_{k=1}^h \int_0^{T_{\text{год}}} P(t)_k^{\text{пот}} dt, \quad (5)$$

где $P(t)_i^{\text{ген}}$ — мощность генерации электроэнергии в конкретный момент времени i -того региона южного Ирака;

$P(t)_j^{\text{пот}}$ — мощность потребления электроэнергии в конкретный момент времени j -того региона южного Ирака;

$P(t)_j^{\text{имп}}$ — мощность импорта электроэнергии в конкретный момент времени j -того региона южного Ирака.

3. Снижение протяженности ЛЭП в объединенных районах (близость регионов друг к другу).

Общая математическая форма целевой функции для определения приоритетных районов для объединения ЭЭС имеет следующий вид [11]:

$$f(t, p, l)^{\text{объед}} = \begin{cases} t_i^{\text{ген}} = t_i^{\text{пот}} \\ \sum_{i=1}^n P(t)_i^{\text{ген}} - \sum_{j=1}^m P(t)_j^{\text{пот}} \rightarrow \min \\ \sum_{k=1}^h L_k^{\text{ЛЭП}} \rightarrow \min \end{cases} \quad (6)$$

где $P(t)_i^{\text{ген}}$ — мощность генерации электроэнергии в конкретный момент времени i -того региона южного Ирака;

$P(t)_j^{\text{пот}}$ — мощность потребления электроэнергии в конкретный момент времени j -того региона южного Ирака;

$t_i^{\text{ген}}$ — конкретный момент времени при генерации энергии;

$t_i^{\text{пот}}$ — конкретный момент времени при потреблении энергии;

n — количество регионов южного Ирака.

На рис. 3 и 4 представлен пример объединения трех районов Ирака (Анбар — Наджав — Басра). По суммарным графикам генерации и потребления энергии видно, что дефицит мощности сведен к минимуму, а близость расположения районов друг к другу позволяет снизить капитальные затраты на строительство ЛЭП.

На рис. 4 демонстрируется эффект от объединения энергосистем (ЭЭС) трех районов южной части Ирака. На основе данных графиков и анализа можно выделить следующие ключевые аспекты:

- объединение позволяет минимизировать дефицит электроэнергии за счет эффективного перераспределения мощности между районами. Это особенно важно в условиях, когда отдельные регионы сталкиваются с дефицитом в утренние и вечерние часы [12, 13];

- благодаря близкому расположению районов друг к другу снижается протяженность линий электропередачи (ЛЭП). Это приводит к уменьшению потерь энергии при транспортировке [14, 15];



Рис. 3. Объединение ЭЭС трех районов южной части Ирака

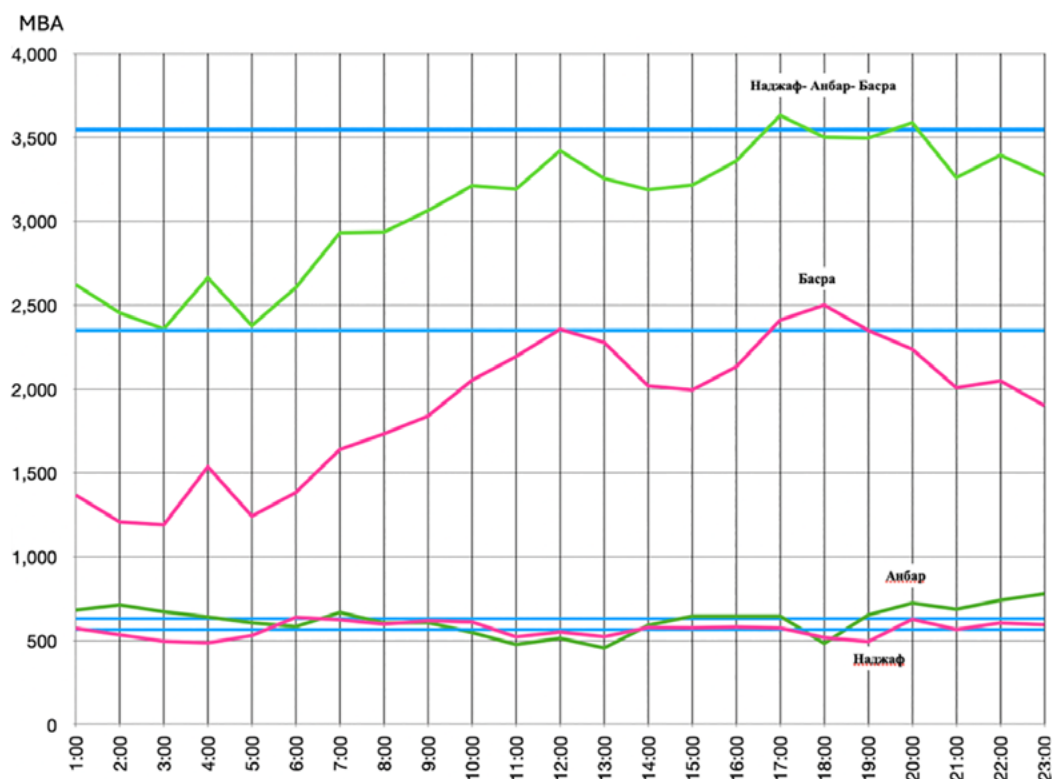


Рис. 4. Эффект мощности от объединения ЭЭС трех районов южной части Ирака (МВА/ч)

– суммарные графики показывают синхронизацию генерации и потребления, что способствует выравниванию нагрузок в системе. При объединении три региона действуют как единая сеть, что дает возможность компенсировать локальные пики нагрузки [16, 17];

– сокращение капитальных затрат на строительство новых ЛЭП связано с оптимальным использованием существующей инфраструктуры и снижением необходимости резервирования мощностей;

– в случае аварии на одной из линий энергия может быть перенаправлена через другие участки сети, что обеспечивает более стабильное энергоснабжение.

Заключение

Объединение питающих центров южной части Ирака в единую кольцевую энергетическую систему представляет собой важный шаг к повышению надежности и эффективности энергоснабжения региона. Реализация данной концепции позволяет сократить потери электроэнергии, оптимизировать распределение нагрузок и интеграцию возобновляемых источников энергии. Кроме того, кольцевые сети обеспечивают устойчивость к перегрузкам и аварийным ситуациям, что значительно повышает энергетическую безопасность региона [18–20].

Стратегическое значение данного проекта заключается не только в улучшении текущих условий энергоснабжения, но и в создании базы для долгосрочного экономического развития региона. Хотя проект требует значительных усилий и инвестиций, его потенциальные выгоды делают его крайне перспективным [21].

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой экономически оптимальных решений для внедрения кольцевых сетей, учетом региональных особенностей и продвижением инновационных технологий управления энергосистемами [22].

Список источников

1. Al-Hamadani S. Solar energy as a potential contributor to help bridge the gap between electricity supply and growing demand in Iraq: A review / S. Al-Hamadani // *International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS)*. — 2020. — Vol. 9. — Pp. 302–312. — DOI: 10.11591/ijaas.v9.i4.pp302-312.
2. Barth D. Optimization of electrical network configuration: Complexity and algorithms for ring topologies / D. Barth, T. Mautor, A. De Moissac, D. Watel et al. // *Theoretical Computer Science*. — 2021. — Vol. 859. — Pp. 162–173.
3. Beiranvandi H. A resilience-oriented restoration framework for multi-area active distribution network following a disaster / H. Beiranvandi, A. Samanfar, M. Doostizadeh, R. Saki // *IET Renewable Power Generation*. — 2024. — Vol. 18. — Pp. 3810–3824. — DOI: org/10.1049/rpg2.13042.
4. Biller M. Protection algorithms for closed-ring grids with distributed generation / M. Biller, J. Jaeger // *IEEE Transactions on Power Delivery*. — 2022. — Vol. 37. — Pp. 4042–4052. DOI: 10.1109/TPWRD.2022.3144004.
5. Stumbrger M. Permanent closed-loop operation as a measure for improving power supply reliability in a rural medium voltage distribution network / M. Stumbrger, M. Roser, M. Pintaric, B. Polajzer // *19th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'21)* — Almeria (Spain), 28th to 30th July 2021. — Vol. 19. — Pp. 523–527. — DOI: 10.24084/repqj19.335.
6. Mosaed I. M. A new analytical approach of cost benefit analysis for automated medium voltage closed ring distribution networks / I. M. Mosaed, S. Hasan // *2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. — Cairo, 17–19 December 2020. — IEEE, 2019. — Pp. 1095–1100. — DOI: 10.1109/mecon47431.2019.9007985.
7. De Groot R. J. W. Closed-ring operation of medium voltage distribution grids: theory meets practice / R. J. W. De Groot, J. Morren, J. G. Slootweg // *23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2015)*. — Lyon 15–18 June 2015. — Pp. 1–5.
8. Survilo J. Enhancement and comparison of simple types of closed networks / J. Survilo, J. Rozenkrons // *Latvian journal of physics and technical sciences*. — 2009. — Vol. 46. — Pp. 36–50. — DOI: 10.2478/v10047-009-0016-z.

9. Simpson-Porco J. W. Voltage collapse in complex power grids / J. W. Simpson-Porco, F. Dörfler, F. Bullo // *Nature communications*. — 2016. — Vol. 7. — P. 10790. — DOI: 10.1038/ncomms10790.
10. Javaid S. Real-time power supply and demand mediation algorithm for Energy on Demand system / S. Javaid, T. Kato // 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW). — Taipei 12–14 June 2017. — IEEE, 2017. — Pp. 191–192. — DOI: 10.1109/ICCE-China.2017.7991060.
11. Шевлюгин М. В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / М. В. Шевлюгин. — М., 2013. — 48 с.
12. Gao Y. Study on the optimal allocation of resources for regional integrated energy stations based on the interconnection of multiple operators / Y. Gao, Q. Li, Y. Yang, L. Zhang // *Second International Conference on Energy, Power, and Electrical Technology (ICEPET 2023)*. — Kuala Lumpur 25 September 2023. — SPIE, 2023. — Vol. 12788. — Pp. 298–307. — DOI: 10.1117/12.3004272.
13. Sehrawat S. A cost optimal alternative for district power supply through an integrated system / S. Sehrawat, A. Srivastava, A. Mishra, K. Shukla et al. // *7th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*. — Patiala 17–19 November 2016. — IEEE, 2016. — Pp. 1–6. — DOI: 10.1109/IICPE.2016.8079343.
14. Salman H. M. Review on Causes of Power Outages and Their Occurrence: Mitigation Strategies / H. M. Salman, J. Pasupuleti, A. H. Sabry // *Sustainability*. — 2023. — Vol. 15. — P. 15001. — DOI: 10.3390/su152015001.
15. Fanti M. P. A district energy management based on thermal comfort satisfaction and real-time power balancing / M. P. Fanti, A. M. Mangini, M. Roccotelli, W. Ukovich // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. — 2015. — Vol. 12. — Pp. 1271–1284. — DOI: 10.1109/TASE.2015.2472956.
16. King D. M. Power distribution management based on distributed networking protocol analytics / D. M. King, R. D. King // *U.S. Patent and Trademark Office*. — 2024. — № 11,989,069.
17. Gaur G. Demand side management in a smart grid environment / G. Gaur, N. Mehta, R. Khanna, R. Kaur // 2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC). — Singapore 23–26 July 2017. — IEEE, 2017. — Pp. 227–231. — DOI: 10.1109/ICSGSC.2017.8038581.
18. Serrano-Arévalo T. I. The impact of circular economy indicators in the optimal planning of energy systems / T. I. Serrano-Arévalo, F. A. Díaz-Alvarado, J. Tovar-Facio, J. M. Ponce-Ortega // *Sustainable Production and Consumption*. — 2024. — Vol. 44. — Pp. 234–249. — DOI: 10.1016/j.spc.2023.12.018.
19. Jawad I. M. Enhancing and improving the performance of the Iraqi super grid 400kV by connection distributed generation based on optimization techniques / I. M. Jawad, W. S. Majeed // *AIP Conference Proceedings*. — AL-Samawa 26–27 May 2021. — AIP Publishing, 2021. — Vol. 2404. — DOI: 10.1063/5.0071004.
20. Abass A. Z. Load Flow and Transient Stability Analyses for an Integrated Solar Combined Cycle Station in Iraqi Southern by Using ETAP / A. Z. Abass, D. A. Pavlyuchenko, A. V. Prokopov, S. H. Zozan // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. — 2021. — Vol. 14. — Pp. 5–16. — DOI: 10.17516/1999-494X-0285.
21. Li Z. Optimal Operation of Integrated Energy System Considering Power Supply Reliability / Z. Li, S. Lin, J. Tan // 2024 7th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE). — Yangzhou 26–28 April 2024. — IEEE, 2024. — Pp. 1468–1473. — DOI: 10.1109/CEEPE62022.2024.10586490
22. Zlobina N. Impact of energy economy development on the region's population life quality / N. Zlobina, O. Kondrakov, E. Merkulova, E. Muratova et al. // *E3S Web of Conferences*. — EDP Sciences, 2019. — Vol. 110. — P. 02106. — DOI: 10.1051/e3sconf/201911002106.

Дата поступления: 23.03.2025

Решения о публикации: 22.04.2025

Контактная информация:

АЛСУЛТАН Мохаммед Джафар Джасим — аспирант;
1144648@edu.rut-miit.ru

ШЕВЛЮГИН Максим Валерьевич — д-р техн. наук,
доц., зав. кафедрой «Электроэнергетика транспорта»;
mx_sh@mail.ru

Improving the Efficiency of Electricity Supply in the Southern Part of Iraq Through the Formation of a Unified Energy System

M. J. J. Alsultan^{1,2}, M. V. Shevlyugin¹

¹Russian University of Transport, 9, bld 9, GSP-4, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation

²University of Karbala, Karbala, Iraq

For citation: Alsultan M. J. J., Shevlyugin M. V. Improving the Efficiency of Electricity Supply in the Southern Part of Iraq Through the Formation of a Unified Energy System // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 341–350. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-341-350

Summary

Purpose: The electricity system of southern Iraq plays a key role in providing the region with the energy it needs for its socio-economic development. However, the existing infrastructure is characterized by decentralized feeder centres that operate with limited coordination among themselves. This leads to energy supply instability and frequent blackouts; loss of energy during transportation; limited integration of renewable energy sources (e.g., solar and wind). **Methods:** One of the most effective solutions to overcome these problems is to unify (loop) the power supply centres. This involves integrating all feeder centres into a single network. **Results:** This approach will significantly increase the resilience of the power system to overloads and emergency shutdowns ensuring uninterrupted power supply in the region. The article provides a comprehensive overview of the key benefits of looping, including reduced energy losses, optimized load sharing, cost-effectiveness and the integration of new energy sources including renewables. Key focus areas include the technical aspects of implementation, such as the construction of new transmission lines, the modernization of substations, the introduction of digital control technologies and the training of qualified personnel. **Practical significance:** The integration of feeder centres located in southern Iraq into a single interconnected power system is a critical manoeuvre aimed at strengthening energy security in this region, which is facing numerous challenges in the field of energy supply and distribution. This innovative approach will enhance the reliability and stability of the region's energy supply and lay the foundation for sustainable economic growth and initiative development, which are essential for the region's future prosperity. The successful implementation of this ambitious project requires significant investment of resources and a concerted effort by many stakeholders. However, the significant benefits it promises in the long term make it not only necessary but also extremely promising for the overall development of the region. This integration has significant potential, offering solutions to urgent energy challenges while also paving the way for more sustainable infrastructure that can support various economic activities and enhance the quality of life for local populations.

Keywords: Power supply, loop network, energy losses, reliability of power supply, power shortage, synchronization of consumption, energy efficiency.

References

1. Al-Hamadani S. Solar energy as a potential contributor to help bridge the gap between electricity supply and growing demand in Iraq: A review. *International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS)*, 2020, vol. 9, pp. 302–312. DOI: 10.11591/ijaas.v9.i4.pp302-312.
2. Barth D., Mautor T., Moissac De A., Watel D. et al. Optimization of electrical network configuration: Complexity

and algorithms for ring topologies. *Theoretical Computer Science*, 2021, vol. 859, pp. 162–173.

3. Beiranvandi H., Samanfar A., Doostizadeh M., Saki R. A resilience-oriented restoration framework for multi-area active distribution network following a disaster. *IET Renewable Power Generation*, 2024, vol. 18, pp. 3810–3824. DOI: org/10.1049/rpg2.13042.

4. Biller M., Jaeger J. Protection algorithms for closed-ring grids with distributed generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, vol. 37, pp. 4042–4052. DOI: 10.1109/TPWRD.2022.3144004.
5. Stumberger M., Roser M., Pintaric M., Polajzer B. Permanent closed-loop operation as a measure for improving power supply reliability in a rural medium voltage distribution network. *19th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'21) — Almeria (Spain)*, 28th to 30th July 2021, vol. 19, pp. 523–527. DOI: 10.24084/repqj19.335.
6. Mosaed I. M., Hasan S. A new analytical approach of cost benefit analysis for automated medium voltage closed ring distribution networks. *2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Cairo, 17–19 December 2020, IEEE, 2019, pp. 1095–1100. DOI: 10.1109/mepcon47431.2019.9007985.
7. De Groot R. J. W., Morren J., Slootweg J. G. Closed-ring operation of medium voltage distribution grids: theory meets practice. *23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2015)*, Lyon 15–18 June 2015, pp. 1–5.
8. Survilo J., Rozenkrons J. Enhancement and comparison of simple types of closed networks. *Latvian journal of physics and technical sciences*, 2009, vol. 46, pp. 36–50. DOI: 10.2478/v10047-009-0016-z.
9. Simpson-Porco J. W., Dörfler F., Bullo F. Voltage collapse in complex power grids. *Nature communications*, 2016, vol. 7, p. 10790. DOI: 10.1038/ncomms10790.
10. Javaid S., Kato T. Real-time power supply and demand mediation algorithm for Energy on Demand system. *2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*, Taipei 12–14 June 2017, IEEE, 2017, pp. 191–192. DOI: 10.1109/ICCE-China.2017.7991060.
11. Shevlyugin M. V. *Energoberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenakh, realizuemye s ispol'zovaniem nakopiteley energii: avtoref. disc. ... d-ra tekhn. nauk* [Energy-saving technologies in railway transport and subways implemented using energy storage devices: author's abstract. diss. ... Doctor of Engineering Sciences]. Moscow, 2013, 48 p. (In Russian)
12. Gao Y., Li Q., Yang Y., Zhang L. Study on the optimal allocation of resources for regional integrated energy stations based on the interconnection of multiple operators. *Second International Conference on Energy, Power, and Electrical Technology (ICEPET 2023)*. — Kuala Lumpur 25 September 2023, SPIE, 2023, vol. 12788, pp. 298–307. DOI: 10.1117/12.3004272.
13. Sehrawat S., Srivastava A., Mishra A., Shukla K. et al. A cost optimal alternative for district power supply through an integrated system. *7th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Patiala 17–19 November 2016, IEEE, 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IICPE.2016.8079343.
14. Salman H. M., Pasupuleti J., Sabry A. H. Review on Causes of Power Outages and Their Occurrence: Mitigation Strategies. *Sustainability*, 2023, vol. 15, p. 15001. DOI: 10.3390/su152015001.
15. Fanti M. P., Mangini A. M., Roccotelli M., Ukovich W. A district energy management based on thermal comfort satisfaction and real-time power balancing. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, vol. 12, pp. 1271–1284. DOI: 10.1109/TASE.2015.2472956.
16. King D. M., King R. D. Power distribution management based on distributed networking protocol analytics. U.S. Patent and Trademark Office, 2024, № 11,989,069.
17. Gaur G., Mehta N., Khanna R., Kaur R. Demand side management in a smart grid environment. *2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*, Singapore 23–26 July 2017, IEEE, 2017, pp. 227–231. DOI: 10.1109/ICSGSC.2017.8038581.
18. Serrano-Arévalo T. I., Díaz-Alvarado F. A., Tovar-Facio J., Ponce-Ortega J. M. The impact of circular economy indicators in the optimal planning of energy systems. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, vol. 44, pp. 234–249. DOI: 10.1016/j.spc.2023.12.018.
19. Jawad I. M., Majeed W. S. Enhancing and improving the performance of the Iraqi super grid 400kV by connection distributed generation based on optimization techniques. *AIP*

Conference Proceedings, AL-Samawa 26–27 May 2021, AIP Publishing, 2021, vol. 2404. DOI: 10.1063/5.0071004.

20. Abass A. Z., Pavlyuchenko D. A., Prokopov A. V., Zozan S. H. Load Flow and Transient Stability Analyses for an Integrated Solar Combined Cycle Station in Iraqi Southern by Using ETAP. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2021, vol. 14, pp. 5–16. DOI: 10.17516/1999-494X-0285.

21. Li Z., Lin S., Tan J. Optimal Operation of Integrated Energy System Considering Power Supply Reliability. 2024 7th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Yangzhou 26–28 April 2024, IEEE, 2024, pp. 1468–1473. DOI: 10.1109/CEEPE62022.2024.10586490

22. Zlobina N., Kondrakov O., Merkulova E., Muratova E. et al. Impact of energy economy development on the region's population life quality. *E3S Web of Conferences, EDP Sciences*, 2019, vol. 110, p. 02106. DOI: 10.1051/e3sconf/201911002106.

Received: March 23, 2025

Accepted: April 22, 2025

Author's information:

Mohammed J. J. ALSULTAN — Postgraduate Student;
1144648@edu.rut-miit.ru

Maxim V. SHEVLYUGIN — Dr. Sci. in Engineering,
Associate Professor, Head of the Department Electric
Power Engineering of Transport; mx_sh@mail.ru