

УДК 621.315

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.128431

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТИРОВКОЙ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Черкашина В. В.

*Объектом исследования являются процессы в воздушных линиях, которые влияют на транспортировку и распределение электроэнергии. Одним из самых проблемных мест являются провода воздушных линий. Многообразие проводов, которыми выполнены линии, приводит к неоднородности сети, что отражается на технологических потерях мощности.*

*В ходе исследования использовалась технико-экономическая модель дисконтированных затрат в воздушные линии, которая была усовершенствована за счет изменения аналитической связи инвестиций с сечением провода. Для анализа данной модели использовался критериальный метод. Данный метод позволяет проводить анализ таких моделей и принять решение в относительных единицах при неполной исходной информации.*

*Получено, что усовершенствование структуры воздушных линий за счет оптимизации параметрических рядов сечений проводов позволяет уменьшить влияние неоднородности сети. А также перейти к унификации воздушных линий, увеличить регламент реконструкции объекта, но не расширяет функциональные возможности линий.*

*Оснащение линий волоконно-оптической системой мониторинга позволяет контролировать параметры объекта по всей длине объекта. Благодаря этому уменьшаются потери активной мощности и обеспечивается возможность оптимального управления транспортировкой и распределением электроэнергии в реальном времени.*

*Предложенное направление имеет ряд особенностей, в частности показывает последовательное усовершенствование структуры линий. По сравнению с аналогичными известными подходами преимуществом предложенного подхода является комплексное обоснование развития воздушных линий в условиях рынка электроэнергии.*

**Ключевые слова:** *электрическая сеть, воздушная линия, параметрический ряд, система мониторинга, технико-экономическая модель, критериальный метод.*

### 1. Введение

В условиях рынка электроэнергии центральное место среди энергоэффективных разработок занимают «интеллектуальные» сети. Эти сети представляют электросетевой комплекс, который основан на современных технологиях. Для функционирования «интеллектуальных» сетей необходимо усовершенствовать структуру электрических сетей (ЭС) и обеспечить

комплексное управление всеми технологическими процессами, включая транспортировку электроэнергии.

При этом особое внимание следует уделить структуре воздушных линий электропередачи (ВЛ), потому что они являются ответственными объектами ЭС за транспортировку и распределение электроэнергии. На сегодняшний день ВЛ наиболее уязвимыми объектами ЭС. Это объясняется тем, что линии протяженные, слабо контролируемые и взаимодействуют с окружающей средой, что приводит к неполноте информации об их параметрах и отражается на эффективности работы ЭС. Поэтому актуальным является исследование совершенствования структуры воздушных линий для оптимального управления транспортировкой и распределением электроэнергии в реальном времени.

## **2. Объект исследования и его технологический аудит**

*Объект исследования* – процессы в воздушных линиях, которые влияют на транспортировку и распределение электроэнергии.

В последние 10 лет для уменьшения нехватки информации о параметрах, влияющих на режимы работы ВЛ внедряются государственные программы по созданию различных новых средств регулирования установившихся и переходных режимов ЭС. Целью таких программ является повышения эффективности транспортировки и распределения электроэнергии. Итогом их является концепция Smart Grid [1–3].

Государственные структуры в большинстве стран рассматривают Smart Grid как:

- идеологию национальных программ развития электроэнергетики;
- компании-производители оборудования и технологий;
- перспективную основу оптимизации бизнеса;
- энергетические компании;
- базу для обеспечения устойчивой инновационной модернизации своей деятельности.

И на первом этапе для внедрения концепции Smart Grid необходимо упорядочить структуру электросетевого оборудования, в том числе и структуру ВЛ, в соответствии с требуемыми условиями [4].

В условиях рынка электроэнергии [4] одна из основных задач электроэнергетической отрасли Украины – это повышение эффективности управления режимами работы ЭС для оптимального транспорта и распределения электроэнергии от генерирующих источников до потребителей.

Данное направление возможно реализовать в современных условиях на технико-экономических моделях с учетом неполноты исходной информации, используя критериальное программирование. Для поиска рациональной структуры и формируют параметрические ряды. Основой рациональной структуры ВЛ является уровень стандартизации и унификации параметрического ряда сечений проводов, который отражает возможность использования типовых конструктивных решений, типовых технологических процессов, типовых элементов ВЛ.

Вышеизложенное является необходимым, но не достаточным условием повышения эффективности транспорта и распределения электроэнергии.

Для реализации полной эффективности транспортировки и распределения электроэнергии необходимо предусмотреть оснащение линий соответствующими средствами оценки и контроля параметров объекта в реальном времени. Это не противоречит платформе Smart Grid, которая является основным ядром современных научных разработок в области электроэнергетики.

В рамках инновационной модернизации ЭС уже существуют соответствующие технических решения среди которых волоконно-оптическая система мониторинга температурного режима и габаритов (ВОСМ) ВЛ [5].

Одним из наиболее проблемных мест являются провода воздушных линий, так как многообразие проводов, которыми выполнены линии, приводит к неоднородности сети. Это отражается на технологических потерях мощности и осложняет оснащение ВЛ ВОСМ.

### **3. Цель и задачи исследования**

*Цель исследования* – совершенствование структуры воздушных линий для оптимального управления транспортировкой и распределением электроэнергии в реальном времени.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

1. Сформировать критерий технико-экономической различимости вариантов ВЛ для формирования коэффициента нарастания шкалы сечений проводов.
2. Проанализировать влияние унификации на регламент реконструкции ВЛ.
3. Представить в соответствии с концепцией Smart Grid волоконно-оптическую систему для непрерывного температурного мониторинга и контроля габаритов ВЛ.

### **4. Исследование существующих решений проблемы**

Первые работы по совершенствованию структуры ВЛ за счет оптимизации параметрического ряда сечений проводов были проведены учеными еще в 80-х годах прошлого века [6]. В своих работах они рассматривали вопрос оптимизации параметрического ряда сечений проводов и предоставили предложения по линиям 35–750 кВ. Согласно теории подобия, для поиска оптимального параметрического ряда сечений проводов линий учеными был использован критериальный метод, который позволил избежать нехватку информации. Для этого технико-экономическая модель ВЛ была записана в критериальной форме и проанализирована критериальным методом. Такой подход позволил сформировать целесообразный параметр оптимизации в условиях функционирования электроэнергетики в тот период. А так как изменились условия функционирования электроэнергетики, необходимо пересмотреть их рекомендации в соответствии с современными требованиями [4, 7].

В [8] предложена стратегия развития электроэнергетики на принципе унификации и типизации ряда элементов электросетевого оборудования, но не достаточно рассмотрены вопросы оптимизации параметрического ряда сечений проводов.

В [9, 10] рассмотрены вопросы оптимизации параметрического ряда сечений проводов и представлены предложения по унификации ВЛ 110–750 кВ, но не учитывались перспективы изменения электрических нагрузок.

В [11] рассмотрены режимы работы оптимизации энергосистем, но не акцентировано внимание на структуре линий.

Совершенствование структуры ВЛ согласно интеллектуализации сетей должно предусматривать оснащение объекта соответствующими средствами оценки и контроля параметров в реальном времени [1, 3, 12]. Оснащение ВЛ соответствующими средствами расширяет их функциональные возможности и взаимосвязано с конструкцией линий. Именно для этого на первом этапе нужно оптимизировать параметрический ряд сечений проводов ВЛ.

Данную проблему целесообразно решать на технико-экономических моделях с учетом неполноты исходной информации, используя критериальное программирование [13, 14].

Таким образом, результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что необходимо решать задачи, которые определяют целесообразные параметры и режимы работы ВЛ:

- оптимизация параметрического ряда сечений проводов;
- расширение функциональных возможностей ВЛ.

## 5. Методы исследований

Для оптимизации параметрического ряда сечений проводов совершенствована технико-экономическая модель дисконтных затрат ( $Z_i$ ) ВЛ, основное отличие которой заключается в изменении аналитической связи инвестиций в ВЛ с сечением провода ( $F$ ):

$$Z = K_0 p_l l + K_u p_l l U_i^\alpha + K_F p_l l F + \frac{\mu l P^2 K_k}{U^2 \cos^{-2} \varphi F}, \quad (1)$$

где  $K_0$  – коэффициент постоянной составляющей стоимости, которая не зависит от сечения провода и класса напряжения линии;

$K_u$  – коэффициент, который учитывает класс напряжения линии;

$K_F$  – коэффициент, который учитывает изменение стоимости линии в зависимости от сечения провода;

$p_l$  – коэффициент отчислений, который состоит из:

$$p_l = p_a + p_{\text{рем и обл}}, \quad (2)$$

где  $p_a$  – коэффициент отчислений на амортизацию;

$p_{\text{рем и обл}}$  – коэффициент на ремонт и обслуживание линий;

$F$  – сечение провода линии, мм<sup>2</sup>;

$\tau$  – время максимальных потерь определяется как:

$$\tau = (0,124 + T_{\max}/10^4)^2 \cdot 8760, \quad (3)$$

где  $T_{\max}$  – максимальный час использования, год;

$\mu$  – удельная стоимость потерь электроэнергии, у. е./ (кВт·год);

$\rho$  – удельное сопротивление провода, Ом·мм<sup>2</sup>/км;

$P$  – максимальная мощность линии, МВт;

$U$  – напряжение линии, кВ;

$l$  – длина линии, км;

$\cos\varphi$  – коэффициент мощности линии;

$K_k$  – коэффициент потерь на корону, который состоит из:

$$K_k = (\tau + K_r), \quad (4)$$

где  $K_r$  – показатель потерь на корону, для  $\tau = 1000 \div 7000$  (час/год)  $K_r = 0,05 \div 0,15$  и учитывается только для ВЛ 330–750 кВ.

С точки зрения теории подобия технико-экономические модели ВЛ являются подобными. Также отношение предыдущих дисконтированных затрат к последующим в рамках одного параметрического ряда тождественны. Это является необходимым условием построения параметрического ряда сечений проводов ВЛ:

$$\frac{z_{i+1}}{z_i} = \frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{K_i r_{i+1} - K_{i-1} r_i} \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}} \equiv \text{idem}, \quad (5)$$

где  $r_i$  – активное сопротивление  $i$ -го провода;  $K_i$  – инвестиционные вложения в  $i$ -ю линию.

Согласно теории подобия, в первом приближении для поиска оптимального параметрического ряда в работах [6, 10, 11] был использован критериальный метод, который позволил уйти от неполноты и неопределенности исходной информации. Для этого технико-экономическая модель ВЛ (1) была записана в критериальной форме:

$$Z = \pi'_1 F^{\alpha_1} + \pi'_2 U^{\alpha_2} + \pi'_3 U^{-2} F^{-1}, \quad (6)$$

где  $\pi'_1, \pi'_2, \pi'_3$  – критерии подобия, которые не зависят от исходной информации и определяются из системы уравнений, формирование которой базируется на условиях ортогональности и нормирования в точке оптимуму [14].

Разработанная технико-экономическая модель ВЛ (6) используется для расчета коэффициента формирования оптимального параметрического ряда

сечений проводов ВЛ при условии, что два смежных провода отличаются один от другого на значение, которое не превышает зону равноэкономичности. В данных исследованиях за зону равноэкономичности принят интервал от 0,01 до 0,02.

Учитывая, что сечение провода является одним из основным элементом ВЛ и оптимизация его важна, так как влияет на пропускную способность линий, что отражается на регламенте реконструкции объекта, то периодичность влияет на эксплуатационные расходы. Поэтому в дальнейших исследованиях, используя теорию подобия и полученный коэффициент при заданном характере нагрузки, было выявлено, что срок до необходимой реконструкции является относительно подобной величиной [13].

Для этого в качестве базисного сечения  $F_0$  принято значение сечение провода, приходящееся на год строительства и ввода в эксплуатацию ВЛ, а в качестве последующего сечения взять сечение на период реконструкции ВЛ, то отношение:

$$\frac{F_2}{F_0} = F, \quad (7)$$

представляет собой не что иное как коэффициент нарастания шкалы сечений проводов.

Пусть имеется две разные шкалы сечений, характеризующиеся коэффициентами  $F_1$  и  $F_2$ . Как в первом, так и во втором случае, темпы изменения нагрузок будут одинаковыми. Тогда согласно (7):

$$P(1+q)^{t_1} = F^{0,625}, \quad (8)$$

и

$$P(1+q)^{t_2} = F^{0,625}. \quad (9)$$

Отношения (8) и (9) можно записать в виде:

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{\ln F_2}{n F_1} = \text{idem}, \quad (10)$$

$$t = 0,625 \frac{\ln F}{\ln(1+q)}. \quad (11)$$

В данном выражении время  $t$  определяет интервал от начала эксплуатации до первой реконструкции, которая обусловлена изменением пропускной способности ВЛ, зависящей от сечения провода ( $F$ ) и заданного темпа изменения нагрузки ( $q$ ).

## 6. Результаты исследований

Анализ модели (6) критериальным методом [14] показал, что в зависимости от погрешности исходной информации можно получить в первом приближении коэффициент формирования оптимальной шкалы сечений проводов.

Результаты обоснования коэффициента оптимальности параметрического ряда сечений проводов ВЛ:

$\delta, \%$	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 4$	$\pm 5$	$\pm 6$	$\pm 7$	$\pm 8$	$\pm 9$	$\pm 10$
$F_0$	2.0	2.0	2.02	2.02	2.03	2.04	2.06	2.08	2.10	2.12

\*

Как показали исследования, при обосновании оптимального параметрического ряда сечений проводов ВЛ значительную роль играет погрешность эксплуатационных характеристик и наиболее приемлемый коэффициент 2.

Используя (8) и (9), определено, что время реконструкции, которое обусловлено пропускной способностью ВЛ и изменением нагрузки  $q$  при  $P_0 = 1$ , так как относится к началу эксплуатации ВЛ, будет:

$$t_0 = 0,625 \frac{\ln F}{\ln(1+q)}. \quad (12)$$

Аналогичное получено соотношение:

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{\ln 2}{\ln 1,4} = 2. \quad (13)$$

Результаты расчета показали, что срок до необходимой реконструкции увеличивается в 2 раза, если использовать шкалу сечений проводов с коэффициентом 2, что, соответственно, уменьшает периодичность реконструкций ВЛ.

Одним из вариантов, позволяющим расширить функциональные возможности ВЛ, является волоконно-оптическая система мониторинга (ВОСМ). Контрольно-измерительным элементом ВОСМ является вмонтированный в фазный провод оптоволоконный кабель (ОК). Расположение ОК внутри одной из алюминиевых проволок позволяет проводить непрерывный температурный мониторинг и контроль габаритов ВЛ. Оптическое волокно распределенного датчика ОК присоединяется к измерительному блоку. Графический интерфейс системы позволяет разбивать трассу линии на секции, каждая из которых соответствует определенным характеристикам ВЛ. Встроенная функция контроля характеристик позволяет непрерывно

отслеживать точность измерений и сохранять эти показатели для последующего анализа [5].

## 7. SWOT-анализ результатов исследований

*Strengths.* В сравнении с аналогичными результатами исследований других ученых полученные результаты комплексно обосновывают совершенствование структуры воздушных линий для оптимального управления транспортировкой и распределением электроэнергии в реальном времени.

Эффективность представленного направления обеспечивает:

- сокращение сроков разработки и сооружения ВЛ за счет использования ограниченного числа опор, фундаментов, марок проводов, изоляции и арматуры;
- проведение качественного контроля надежности при их изготовлении;
- уменьшение ошибок персонала при строительстве и эксплуатации ВЛ;
- сокращение эксплуатационного запаса отдельных элементов ВЛ;
- снижение стоимости сооружения ВЛ за счет конкуренции между отдельными изготовителями элементов ВЛ;
- возможность контролировать текущее техническое состояние объекта;
- выполнять оценку предельных значений длительных и кратковременных токов нагрузки;
- управлять режимами токовой нагрузки ВЛ;
- регулировать перетоки мощности по ВЛ в соответствии с реальными данными о термической стойкости проводов ВЛ.

*Weaknesses.* Унификация ВЛ позволяет в определенной степени решать и вопросы регламента реконструкции, которая связана с изменением пропускной способности сети. Это важно при интеллектуализации электропередачи, но не расширяет функциональные возможности ВЛ.

Использование ВОСМ на базе унификации для расширения функциональных возможностей ВЛ увеличивает инвестиционные вложения.

*Opportunities.* Предлагаемый комплексный подход позволит снизить эксплуатационные расходы на обслуживание объекта за счет оптимального управления транспортировкой и распределением электроэнергии в реальном времени.

*Threats.* Внедрение в электроэнергетическую отрасль предлагаемого пути совершенствования линий требует уточнения проектных нормативных документов. Это обусловлено изменением соотношений составляющих в технико-экономической модели линий – увеличиваются инвестиционные вложения и уменьшаются эксплуатационные расходы.

## 8. Выводы

1. Сформирован критерий технико-экономической различимости вариантов воздушных линий и получен критериальным методом коэффициент нарастания шкалы сечений проводов, который равняется 2. Это позволяет снизить влияние неоднородности сети и не противоречит унификации.

2. Проанализировано влияние унификации на регламент реконструкции воздушных линий. Выявлено, что срок до необходимой реконструкции увеличивается в 2 раза, если использовать шкалу сечений проводов с коэффициентом 2.

3. Представлена волоконно-оптическая система для непрерывного температурного мониторинга и контроля габаритов воздушных линий. Это позволяет расширить функциональные возможности объекта в соответствии с концепцией Smart Grid.

## References

1. Buchholz B. M., Styczynski Z. Vision and Strategy for the Electricity Networks of the Future // Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Berlin: Springer, 2014. P. 1–17. doi:[10.1007/978-3-642-45120-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-45120-1_1)
2. Intelektualni elektrychni merezhi: elementy ta rezhymy / Baziuk T. M. et al.; ed. by Kyrylenko O. V. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. 400 p.
3. Kobets B. B., Volkova I. O. Smart Grid v elektroenergetike // Energeticheskaya politika. 2009. Vol. 6. P. 54–56.
4. Pro rynek elektrychnoi enerhii Ukrainy: Law of Ukraine from No. 2019-VIII April 13, 2017 / Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy». URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>
5. DITEST STA-R series fiber optic distributed strain and temperature analyzer. URL: <http://www.omnisens.com/ditest/>
6. Standardization of Overhead Power Supply Lines // Nature. 1943. Vol. 151, No. 3833. P. 445–446. doi:[10.1038/151445f0](https://doi.org/10.1038/151445f0)
7. Lucheroni C. Resonating models for the electric power market // Physical Review E. 2007. Vol. 76, No. 5. doi:[10.1103/physreve.76.056116](https://doi.org/10.1103/physreve.76.056116)
8. Rao G. S. Unification of DG units to the electrical network. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 112 p.
9. Faybisovich D. L. Predlozheniya po unifikatsii secheniy provodov vozdushnykh liniy napryazheniem 110–750 kV // Energetik. 2003. Vol. 3. P. 21–22.
10. Lezhniuk P. D., Cheremisin M. M., Cherkashyna V. V. Unifikatsiia povitrianykh liniy v umovakh rynku dvostoronnikh dohovoriv ta balansovalnoho rynku elektroenerhii // Naukovi pratsi VNTU. 2013. Vol. 4. P. 1–8.
11. Zhu J. Optimization of Power System Operation. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 2015. 623 p.
12. Dimtriev S. A., Slepov N. N. Volokonno-opticheskaya tekhnika: sovremennoe sostoyanie i perspektivy. Moscow: Volokonno-opticheskaya tekhnika, 2005. 576 p.
13. Cherkashyna V. V. Faktor vremeni v strategii usovershenstvovaniya elektricheskikh setey // Elektrotekhnika i Elektromekhanika. 2014. Vol. 3. P. 65–68.
14. Cheremisin N. M., Cherkashyna V. V. Kriterial'nyy metod analiza tekhniko-ekonomicheskikh zadach v elektricheskikh setyakh i sistemakh: handbook. Kharkiv: Fakt, 2014. 96 p.