

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В. Е. Бондаренко
Доктор технических наук,
профессор*
E-mail: 228ek@i.ua

Н. М. Черемисин
Кандидат технических наук, профессор
Кафедра электроснабжения
и энергетического менеджмента
Харьковский национальный технический университет
сельского хозяйства им. П. Василенка
ул. Энгельса, 19, г. Харьков, Украина, 61002
E-mail: cheremisin.energy@rambler.ru

В. В. Черкашина
Кандидат технических наук, доцент*
E-mail: cherk34@rambler.ru
*Кафедра передачи электрической энергии
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Представлені дослідження для вдосконалення процесу керування режимами роботи електричних мереж за рахунок оптимізації параметричних рядів перетинів проводів повітряних ліній та додаткової інформації про поточні параметри ліній. Удосконалення процесу дозволить знизити вплив неоднорідності мережі, перейти до уніфікації і розглядати лінії в активно-адаптивному форматі відповідно Smart Grid в умовах балансуєчого ринку

Ключові слова: керування режимами роботи електричних мереж, транспорт електроенергії, Smart Grid, балансуєчий ринок

Представлены исследования для усовершенствования процесса управления режимами работы электрических сетей за счет оптимизации параметрических рядов сечений проводов воздушных линий и дополнительной информации о текущих параметрах линий. Усовершенствование процесса позволит снизить влияние неоднородности сети, перейти к унификации и рассматривать линии в активно-адаптивном формате согласно Smart Grid в условиях балансирующего рынка

Ключевые слова: управление режимами работы электрических сетей, транспорт электроэнергии, Smart Grid, балансирующий рынок

1. Введение

В современных условиях балансирующего рынка электроэнергии одна из основных задач электроэнергетической отрасли Украины – это усовершенствование процесса управления режимами работы электрических сетей (ЭС) для оптимального транспорта электроэнергии от генерирующих источников до потребителей.

Для решения поставленной проблемы необходимо разработать методологию рациональной структуры действующих, реконструируемых и проектируемых воздушных линий (ВЛ). Разработать методологию в современных условиях целесообразно на математических моделях с учетом неполноты исходной информации критериальным методом. Вышеизложенное является необходимым, но не достаточным условием оптимального процесса управления транспортом электроэнергии.

Для усовершенствования процесса управления режимами работы ЭС необходимо разработать методологию повышения уровня «интеллекта» ВЛ, что не противоречит платформе Smart grid, которая является основным ядром современных научных разработок в области электроэнергетики.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Одной из задач усовершенствования процесса управления режимами работы ЭС на платформе Smart Grid в условиях балансирующего рынка является учет и контроль технологических потерь, для снижения которых целесообразно уточнять нагрузочные потери в процессе управления транспортом электроэнергии [1, 2].

Как показывает анализ мирового опыта эксплуатации ЭС, для усовершенствования процесса управления режимами работы сети целесообразно сокращение типоразмеров оборудования, в том числе и элементов ВЛ, что позволит снизить влияние неоднородности сети и уменьшить технологические потери при транспорте электроэнергии.

Основой рациональной структуры ВЛ является уровень стандартизации и унификации параметрического ряда сечений проводов, который отражает возможность использования типовых конструктивных решений при проектировании, типовых технологических процессов, типового оборудования при изготовлении и ремонте ВЛ. Первые работы по унификации ВЛ, а именно оптимизации параметрического ряда,

были проведены еще в 80-х годах прошлого столетия. В [3–5] рассмотрены вопросы оптимизации параметрического ряда сечений проводов и представлены предложения по унификации сечений проводов ВЛ 110–750 кВ, но в связи с изменением условий функционирования электроэнергетики необходимо пересмотреть их в соответствии с современными требованиями. В [6] обоснован выбор приоритетного направления в проектировании ВЛ в условиях рынка, но без учета унификации элементов ЭС.

В стратегию развития электроэнергетики заложен принцип унификации и типизации, в том числе унификации ряда элементов электросетевого оборудования [7].

Таким образом, тенденция к расширению использования оптимизированных элементов ВЛ в вопросах управления режимами работы ЭС является актуальной. Но применение оптимизированных элементов оставляют ВЛ «пассивными» объектами ЭС, а согласно платформе Smart Grid следует, что ВЛ должны быть активно-адаптивными объектом.

Учитывая условия функционирования ЭС, необходимо, чтобы линии были оснащены соответствующими средствами оценки и контроля процесса управления транспортом электроэнергии в реальном времени. В [8, 9] проанализированы средства оценки и контроля процессом управления транспортом электроэнергии в реальном времени и предложено инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid, но акцентируется внимание на узловых элементах ЭС и в не в достаточной мере раскрыты вопросы оснащения ВЛ соответствующими средствами оценки и контроля. В [10, 11] предложено повышение эффективности управления режимами ЭС на базе мониторинга параметров ВЛ, но не учитываются перспективы изменения электрических нагрузок.

Поэтому на современном этапе необходимо решать задачи, связанные с совершенствованием процесса управления режимами работы ЭС, которые должны не только определять целесообразные параметры и режимы работы ВЛ на сегодняшний день, но также и учитывать перспективы их развития, характеризующиеся изменением электрических нагрузок и расширением функциональных возможностей линий.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование для усовершенствования процесса управления режимами работы электрических сетей, которое позволит оптимизировать и регулировать процесс транспорта электроэнергии согласно платформе Smart Grid в условиях балансирующего рынка. Для поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать и разработать подход построения параметрических рядов сечений проводов воздушных линий электропередачи в условиях балансирующего рынка, что значительно изменит влияния неоднородности сети и позволит перейти к унификации линий;
- разработать основные аспекты перехода воздушных линий в активно-адаптивный формат согласно платформе Smart grid.

4. Материалы и методы исследований, которые позволят усовершенствовать процесс управления транспортом электроэнергии

4.1. Материалы и методы исследований построения параметрических рядов сечений проводов ВЛ в условиях балансирующего рынка

В условиях балансирующего рынка электроэнергии и в соответствии с платформой Smart Grid центральное место среди энергоэффективных разработок занимают «интеллектуальные» сети – это электросетевой комплекс, основанный на современных технологиях, и будет обладать новыми свойствами: самодиагностика и самовосстановление. Для этого необходимо усовершенствовать модель процесса управления режимами работы ЭС, которая будет обеспечивать комплексное автоматическое управление всеми технологическими процессами, включая транспорт электроэнергии.

Для поиска рациональной структуры и формируют параметрические ряды электросетевого оборудования, в соответствии с требуемыми условиями. Для реализации этой задачи авторами была сформирована модель поиска рациональной структуры ВЛ, которая представлена на рис. 1.

Эффективность унификации представлена, разработанной авторами структурной моделью, которая представлена на рис. 2.

Анализ разработанной структурной модели (рис. 2) показал, что основу унификации составляет оптимизация параметрического ряда элементов ВЛ, что позволяет сформировать базис для оптимального процесса управления транспортом электроэнергии в условиях балансирующего рынка.

В условиях рынка одним из главных критериев оптимальных технико-экономических связей является минимум дисконтных затрат:

$$Z(x) \rightarrow \min, x \in X. \quad (1)$$

Учитывая это, для оптимизации параметрического ряда сечений проводов авторами усовершенствована технико-экономическая модель ВЛ, основное отличие которой заключается в изменении аналитической связи инвестиций в ВЛ с сечением провода:

$$Z_1 = Z_1 + Z_2 = (E + p)(a + vF) + (3I^2 \tau \beta) \cdot F^{-1}, \quad (2)$$

где Z_1 – инвестиционные вложения; Z_2 – эксплуатационные расходы; E – банковская ставка, %; p – коэффициент отчислений на амортизацию, ремонт и обслуживание линии; a – постоянная составляющая стоимости 1 км ВЛ, зависящая от типа опор, конструктивного исполнения ВЛ, класса напряжения, денежные единицы (д.е)/км; v – коэффициент удорожания, учитывающий изменение стоимости 1 км ВЛ в зависимости от сечения провода, нормируемого в соответствующем классе напряжения, д.е/(км·мм²); F – сечение провода, мм²; I – максимальный ток линии, А; ρ – удельное сопротивление проводникового материала, Ом·мм²/км; τ – время максимальных потерь, ч/год; β – удельная стоимость потерь электроэнергии, д.е/(кВт·ч).

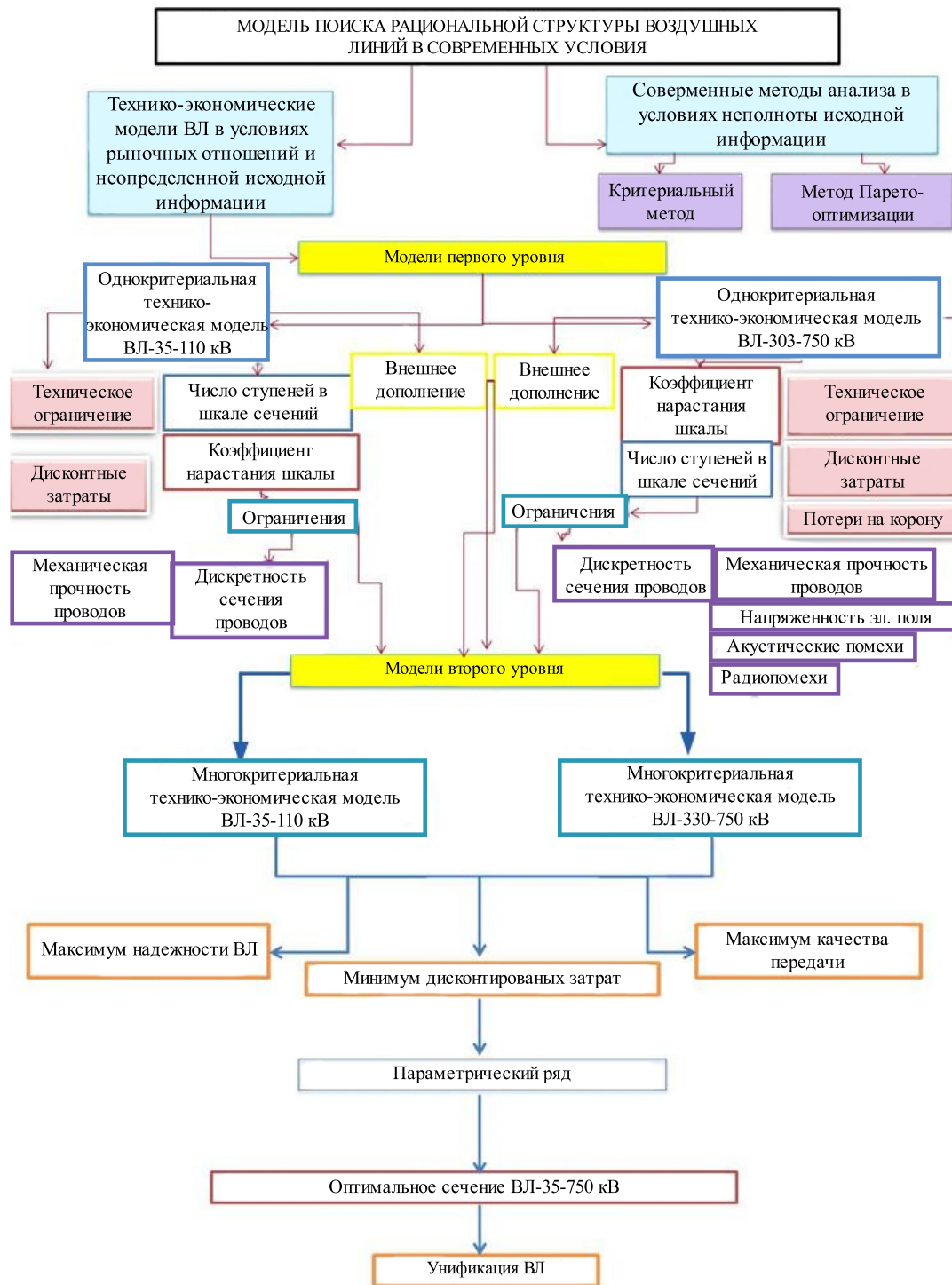


Рис. 1. Модель поиска рациональной структуры ВЛ

Представленная на рис. 1 модель состоит из 2 уровней: на 1 уровне – исследования были сведены к редукции одноцелевой задачи, что позволило сформировать критерий оптимальности параметрического ряда сечений проводов; 2 уровень – позволил определить и обосновать одно из направлений развития ВЛ в современных условиях, а именно унификацию ВЛ.

Критерии построения параметрических рядов сечения проводов отражают техническую сторону и предопределяют необходимые условия существования экономических интервалов мощности:

$$\frac{r_i}{r_{i+1}} > 1, \quad \frac{K_{i+1}}{K_i} > 1, \quad \frac{K_i - K_{i-1}}{K_{i+1} - K_i} < \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}}, \quad (3)$$

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

Экономический интервал последующего сечения к предыдущему должен подчиняться условию экономической различимости (рис. 3).

Но данная модель имеет гладкий непрерывный характер, поэтому для последующей разработки подхода оптимизации параметрического ряда авторами учиты-

валась дискретность шкалы сечений проводов, которая является независимым критерием построения параметрического ряда – относительно подобной величиной.

В соответствии с теорией подобия [12], технико-экономические модели ВЛ являются подобными. Поэтому отношение последовательных (идущих последовательно) дисконтных затрат в рамках одного параметрического ряда будут – тождественны, что является необходимым условием построения параметрического ряда сечений проводов ВЛ в условиях рынка:

$$\frac{Z_{i+1}}{Z_i} = \frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{K_i r_{i-1} - K_{i-1} r_i} \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}} = \text{idem.} \quad (5)$$

Используя выражения (4) и (5), представляем:

$$\frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{K_i r_{i-1} - K_{i-1} r_i} \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}} \geq 1 + \epsilon \quad (6)$$

или

$$\frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{K_i r_{i-1} - K_{i-1} r_i} \geq \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}} (1 + \epsilon). \quad (7)$$

Полученный критерий оптимальности параметрических рядов сечений проводов ВЛ в условиях рынка отражает техническую и экономическую основу построения унифицированных ВЛ.

Для обоснования оптимального параметрического ряда авторами был использован критериальный метод [12], который позволил уйти от неопределенности исходной информации.



Рис. 2. Структурная модель эффективности унификации в условиях балансирующего рынка электроэнергии

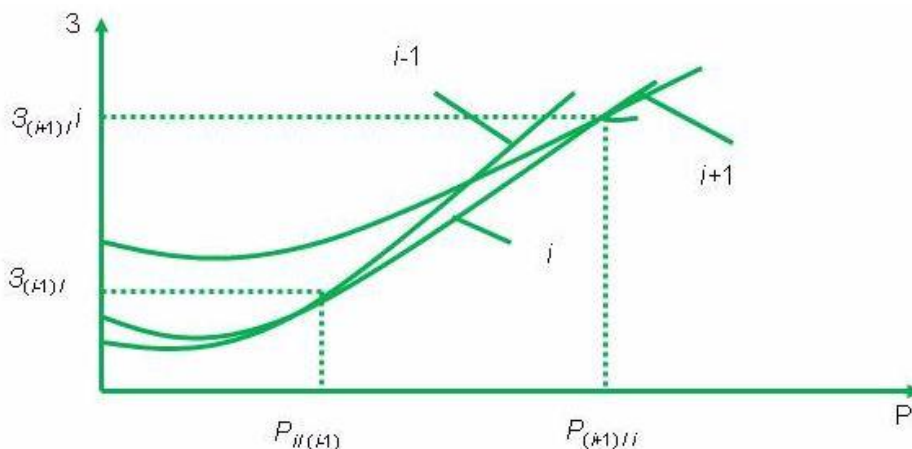


Рис. 3. Экономические интервалы мощности для проводов сечением F_i, F_{i+1}, F_{i-1}

Для этого технико-экономическая модель ВЛ (2) была записана в критериальной форме:

$$Z = \pi_1 F_*^{0.25} + \pi_2 F_*^{-1} \quad (8)$$

и проанализирована для обоснования изменения аналитической связи инвестиций с сечением провода в условиях рынка.

$$F_* = \left(\frac{\pi_1 F_2}{\pi_2 F_1} \right)^{0.8}, \quad (9)$$

где $\pi_1=4/5$, $\pi_2=1/5$ – критерии подобия, которые определены из систематических процедур критериального метода.

Для последующего анализа ввели обобщенную постоянную

$$A_2 = A_2 / P^2. \quad (10)$$

С учетом введенной обобщенной постоянной (10) дисконтные затраты (8) и сечение провода (9) имеют вид:

$$Z = (A_1)_*^{\pi_1} (A_2 P^2)_*^{\pi_2}, \quad F_* = \left(\frac{A \cdot P^2}{A_*} \right)^{0.8} \quad (11)$$

или

$$Z = P_*^{0.4}, \quad F_* = P_*^{1.6}. \quad (12)$$

Из (11) и (12):

$$F_* = Z_*^4. \quad (13)$$

Используя теорию подобия и полученный коэффициент шкалы при заданном характере нагрузки, оказалось, что срок необходимой реконструкции является относительно подобной величиной [13].

Воспользовавшись законом изменения мощности в относительной форме и выражениями (11) и (12), запишем

$$P(1+q)^t = F_*^{0.625}, \quad (14)$$

где q – среднее значение увеличения нагрузки.

Полученное выражение показывает, как при заданном характере нагрузки происходит изменение относительного значения сечения провода. При этом в качестве базисного сечения F_6 принято значение сечения провода, приходящееся на год строительства и ввода в эксплуатацию ВЛ, а в качестве последующего сечения взято сечение провода на период реконструкции ВЛ $\frac{F_2}{F_6} = F_*$ и представляет собой не что иное, как коэффициент нарастания шкалы сечений.

Тогда:

$$P(1+q)^{t_1} = F_*^{0.625}, \quad (15)$$

$$P(1+q)^{t_2} = F_*^{0.625}. \quad (16)$$

Используя теорию подобия, отношение изменения мощности в относительной форме (15) и (16) для определения регламента реконструкции имеет вид:

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{\ln F_2}{n F_1} = \text{idem}. \quad (17)$$

В данном выражении время t определяет интервал от начала эксплуатации до первой реконструкции. Время реконструкции, которое обусловлено пропускной способностью ВЛ и заданным темпом нагрузки q , будет

$$t_0 = 0,625 \frac{\ln F_*}{\ln(1+q)}. \quad (18)$$

Это подтверждает, что вопросы унификации ВЛ в значительной степени влияют на регламент реконструкции, под которой понимают время замены проводов с целью оптимизации процесса управления транспортом электроэнергии.

4. 2. Материалы и методы исследований для формирования основных научных положений перехода ВЛ в активно-адаптивный формат на платформе Smart grid

Известно, что одним из показателей, характеризующих процесс управления транспортом электроэнергии, является пропускная способность ВЛ, которая определяется величиной передаваемой мощности. Одними из основных параметров ВЛ, влияющих на передаваемую мощность, является активное сопротивление провода, которое обуславливает нагрев проводов и зависит от материала проводов и их сечения. Активное сопротивление принимается, как правило, «постоянной» величиной, что не корректно платформе Smart Grid. Как показывает практика эксплуатации ВЛ, активное сопротивление зависит от температуры провода. Трудность определения активного сопротивления ВЛ заключается в том, что температура проводов, зависящая от токовой нагрузки и интенсивности охлаждения, может заметно превышать температуру окружающей среды, поэтому мониторинг температуры проводов в реальном времени является одной из задач оптимального процесса управления транспортом электроэнергии.

Для определения параметров режимов работы ЭС авторами была использована математическая модель на основе метода узловых напряжений:

$$\sqrt{3} \dot{U}_d \dot{J} = \dot{S}; \quad (19)$$

$$F(\dot{U}) = \dot{Y} \dot{U} - \sqrt{3} \dot{J} + \dot{Y}_6 \dot{U}_6 = 0, \quad (20)$$

где \dot{S} – вектор мощностей источников или потребителей, присоединенных к узлам ЭС; \dot{U}_d – диагональная матрица напряжений в узлах; \dot{J} – вектор задающих токов в узлах; \dot{Y} – матрица узловых проводимостей ЭС без базисного узла; \dot{Y}_6 – вектор взаимных проводимостей базисного узла; \dot{U} – вектор напряжений в узлах; \dot{U}_6 – напряжение в базисном узле; n – количество узлов ЭС без базисного.

Для анализа параметров режима работы ЭС с учетом ограничений был использован метод Ньютона:

$$\frac{\partial F}{\partial U}(U^{(k)}, U^{(k)}) \cdot \begin{vmatrix} \Delta U^{(k)} \\ \Delta U^{(k)} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} F'(U^{(k)}, U^{(k)}) \\ F''(U^{(k)}, U^{(k)}) \end{vmatrix}, \quad (21)$$

где $\frac{\partial F}{\partial U}(U^{(k)}, U''^{(k)})$ – матрица чувствительности (Якоби); $\Delta U^{(k)}, \Delta U''^{(k)}$ – вектор изменений действительных и мнимых составляющих напряжения; $F'(U^{(k)}, U''^{(k)})$, $F''(U^{(k)}, U''^{(k)})$ – небалансы действительных и мнимых составляющих токов.

Поскольку ЭС имеют разветвленную структуру с динамично изменяющимися параметрами, поэтому существует необходимость корректирования матрицы чувствительности (Якоби).

Формирование матрицы Якоби было выполнено с учетом разницы активных и реактивных параметров:

$$F(U', U'') = \begin{bmatrix} B & G \\ G & -B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U'' \\ U' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} J' \\ J'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_6 U_6 \\ -B_6 U_6 \end{bmatrix} = 0, \\ J' + jJ'' = \hat{U}_d^{-1} \hat{S}, \\ U' + jU'' = \dot{U}; \tag{22}$$

$$\frac{\partial F_i'}{\partial U_i''} = B_{ii} + \Delta B_{ii} - D_i; \quad \frac{\partial F_i'}{\partial U_i'} = G_{ii} + \Delta G_{ii} + A_i;$$

$$\frac{\partial F_i'}{\partial U_j''} = -B_{ij} - \Delta B_{ij}; \quad \frac{\partial F_i'}{\partial U_j'} = G_{ij} + \Delta G_{ij};$$

$$\frac{\partial F_i''}{\partial U_i''} = G_{ii} + \Delta G_{ii} - A_i; \quad \frac{\partial F_i''}{\partial U_i'} = -B_{ii} - \Delta B_{ii} - D_i;$$

$$\frac{\partial F_i''}{\partial U_j''} = G_{ij} + \Delta G_{ij}; \quad \frac{\partial F_i''}{\partial U_j'} = B_{ij} + \Delta B_{ij};$$

$$A_i = \frac{P_i(U_i'^2 - U_i''^2) + 2 \cdot Q_i \cdot U_i' \cdot U_i''}{U_i^4};$$

$$D_i = \frac{Q_i(U_i'^2 - U_i''^2) - 2 \cdot P_i \cdot U_i' \cdot U_i''}{U_i^4}. \tag{23}$$

Также были введены поправки к элементам i-j матриц, соответственно, активных и реактивных узловых проводимостей, обусловленные изменением активного сопротивления ΔR_{ij} ветви i-j схемы замещения ЭС с учетом температурного мониторинга:

$$\Delta G_{ij} = \frac{K1_{ij} \Delta R_{ij}^2 + K2_{ij} \Delta R_{ij}}{K5_{ij} \Delta R_{ij}^2 + K6_{ij} \Delta R_{ij} + K7_{ij}};$$

$$\Delta B_{ij} = \frac{K3_{ij} \Delta R_{ij}^2 + K4_{ij} \Delta R_{ij}}{K5_{ij} \Delta R_{ij}^2 + K6_{ij} \Delta R_{ij} + K7_{ij}};$$

$$K1_{ij} = -R_{ij}; K2_{ij} = -R_{ij}^2 + X_{ij}^2;$$

$$K3_{ij} = -X_{ij}; K4_{ij} = -2R_{ij}X_{ij};$$

$$K5_{ij} = R_{ij}^2 + X_{ij}^2; K6_{ij} = 2R_{ij}(R_{ij}^2 + X_{ij}^2); K7_{ij} = (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)^2. \tag{24}$$

С учетом введенных обозначений матрица Якоби имеет 3 составляющих:

$$\frac{\partial F}{\partial U} = \begin{bmatrix} B+B_\Delta - D & G+G_\Delta + A \\ G+G_\Delta - A & -B-B_\Delta - D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B & G \\ G & -B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_\Delta & G_\Delta \\ G_\Delta & -B_\Delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -D & A \\ -A & -D \end{bmatrix}. \tag{25}$$

Первая – матрица узловых проводимостей, постоянная. Она не зависит от параметров режима ЭС и определяется только справочными параметрами системы.

Вторая – переменная. Она зависит от изменения температурных условий работы ВЛ и, соответственно, активного сопротивления. Такое представление элементов данной составляющей позволяет уменьшить количество вычислительных операций и ее формирование.

Третья – также переменная и зависит от мощностей нагрузки и генерации в узлах и узловых напряжений, которые изменяются во времени.

Такое разделение матрицы Якоби дает возможность упростить алгоритм ее формирования и корректировки в процессе автоматизированного расчета и анализа установившихся режимов ЭС.

Поскольку использовались данные модели и методы для анализа установившихся режимов ЭС с учетом температурного мониторинга, то необходимо исследовать влияние изменения пассивных параметров схемы замещения на процесс получения решения.

Для этого авторами определена комплексная матрица токораспределения:

$$\dot{C}_k = z_b^{-1} \dot{M}_{kt} (\hat{M}_k z_b^{-1} \dot{M}_{kt})^{-1}, \tag{26}$$

где $z_b = r_b + jx_b$ – диагональная матрица сопротивлений ветвей ЭС, M_k – матрица соединений ветвей в узлах.

Активные и реактивные сопротивления ветвей, а также коэффициенты матрицы токораспределения \dot{C}_k рассчитываются изначально для номинальных значений параметров ЭС и уточняются в процессе управления режимом ЭС в соответствие с изменением параметров объекта.

Потери мощности в ветвях ЭС при изменении их параметров с учетом температурного мониторинга определялись с использованием методики [14]:

$$\Delta \dot{S} = \dot{T} \dot{S}, \tag{27}$$

где $\dot{S} = P + jQ$ – вектор мощностей в узлах ЭС; \dot{T} – матрица коэффициентов распределения потерь мощности в ветвях схемы ЭС, каждая строка которой определяется как $\dot{T}_d = (\dot{U}_i \dot{M}_{ki}) \dot{C}_{ki} \dot{U}^{-1}$.

5. Результаты исследований влияния унификации и температуры проводов ВЛ на процесс управления транспортом электроэнергии

Изложенные в 4. 1. методологические основы унификации ВЛ в условиях балансирующего рынка были апробированы на примере ВЛ 110 кВ с учетом их протяженности.

Анализ усовершенствованной авторами технико-экономической модели ВЛ критериальным методом показал, что в зависимости от погрешности исходной информации можно получить в первом приближении

коэффициент различимости, задаваясь тем либо иным значением.

Результаты исследований технико-экономической модели ВЛ критериальным методом при получении коэффициента оптимальности параметрического ряда сечений проводов ВЛ составляют:

$$\delta, \% \pm 1 \pm 2 \pm 3 \pm 4 \pm 5 \pm 6 \pm 7 \pm 8 \pm 9 \pm 10$$

$$F \ 1.14 \ 1.28 \ 1.45 \ 1.56 \ 1.66 \ 1.77 \ 1.89 \ 2.05 \ 2.20 \ 2.60.$$

Таким образом, как видно из проведенных исследований, при обосновании коэффициента нарастания шкалы параметрического ряда сечений проводов ВЛ значительную роль играет погрешность эксплуатационных характеристик. Как показали исследования, которые описываются в данной статье, наиболее приемлемый коэффициент нарастания шкалы сечений проводов не менее 2–2,5. Получить такой коэффициент возможно путем исключения промежуточных стандартных значений шкалы сечений проводов.

Известно, что массовая электрификация страны выполнялась в 70-х годах прошлого столетия и критерии выбора оптимального варианта были несколько иными. Данный фактор бы принят во внимание при формировании базового варианта для исследования. Шкала сечений построена из расчета, что $K_n \geq 2$ и используется одно сечение для заданного класса напряжения. Возможные оптимальные решения при такой постановке задачи приведены в табл. 1 с учетом перераспределения длин ВЛ.

Таблица 1

Варианты распределения длин ВЛ сечением 70мм², 120мм², 240мм² и дисконтные затраты по вариантам

№ варианта исследования	Распределение длин ВЛ по сечениям, %			З, %
	70 мм ²	120 мм ²	240 мм ²	
1 (базовый)	38	35	27	100
2	38	21	41	99,5
3	38	0	62	99,9
4	24	0	76	99,6
5	9	0	91	99,9
6	0	0	100	100
7	24	49	27	98,1
8	9	64	27	97,0
9	0	73	27	96,6
10	24	35	41	97,6

Из табл. 1 видно, все варианты являются равнозначными, но с точки зрения оптимизации процесса управления транспортом электроэнергии, вариант 6 является приоритетным, поскольку снижается влияние неоднородности сети, что приводит к уменьшению технологических потерь и не противоречит мировой практике унификации ВЛ.

Результаты расчета сроков реконструкции ВЛ 110 кВ с оптимальным сечением проводов (вариант 6 в табл. 1) по формулам (14)–(18) позволили выявить, что срок до необходимой реконструкции увеличивается в 2 раза.

Проведенные авторами исследования составляют основу унификации ВЛ в условиях балансирующего рынка.

Используя изложенные в 4. 2 научные положения для анализа комплексной матрицы токораспределения

и потерь мощности в ветвях ЭС при изменении их параметров, авторами было исследовано на примере ВЛ 110 кВ с оптимальным сечением проводов (вариант 6 в табл. 1) изменение величины передаваемой мощности и технологических потерь при неизменной токовой нагрузке с учетом температурного мониторинга. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Изменение величины передаваемой мощности и технологических потерь при неизменной токовой нагрузке с учетом температурного мониторинга

t _{о.с.} °С	–40	–30	–20	–10	0	10	20	30	40
R, Ом/км	0,105	0,111	0,117	0,123	0,129	0,136	0,142	0,149	0,155
t _{тр.} °С	–12,51	–0,27	12,12	24,68	37,42	50,37	63,54	76,97	90,69
P, МВт	106,28	103,67	101,12	98,62	96,18	93,80	91,46	89,16	86,91
ΔW, МВт	0,039	0,041	0,043	0,045	0,047	0,050	0,052	0,054	0,057

Как видно из табл. 2, при неизменной токовой нагрузке в зависимости от параметров окружающей среды изменяется температура проводов, что отражается на процессе управления транспортом электроэнергии. Так, при увеличении температуры проводов снижается передаваемая по ВЛ мощность, но увеличиваются потери, что снижает эффективность процесса управления транспортом электроэнергии из-за отсутствия информации о текущих параметрах линии.

Результаты анализа комплексной матрицы токораспределения и потерь мощности в ветвях ЭС при изменении их параметров (табл. 2) показали, что если рассматривать ВЛ как активно-адаптивные объекты ЭС, необходимо учитывать то, что линии должны быть оснащены соответствующими средствами оценки и контроля параметров режима работы в реальном времени для эффективного процесса управления транспортом электроэнергии согласно платформе Smart Grid.

6. Обсуждение результатов исследований для совершенствования процесса управления режимами работы ЭС в современных условиях

Представлены исследования в результате которых усовершенствована технико-экономическая модель ВЛ с учетом неполноты исходной информации. Данная модель является приемлемой в современных условиях и отличается от существующей изменением аналитической связи инвестиций с сечением провода для оптимизации параметрических рядов сечений проводов в условиях балансирующего рынка электроэнергии.

Авторами сформирован критерий технико-экономической различимости вариантов ВЛ с учетом дискретности шкалы сечений проводов. Показатель дискретности шкалы проводов является относительно подобной величиной и независимым критерием при формировании параметрических рядов. Учет данного показателя позволил проанализировать технико-экономическую модель ВЛ критериальным методом и является необходимым условием унификации ВЛ для снижения влияние неоднородности сети.

Для оптимизации процесса управления транспортом электроэнергии разработан принцип экономического подбора в задачах совершенствования структуры ВЛ на базе унификации. Унификация ВЛ была рассмотрена за счет оптимизации шкалы сечений проводов. В результате получен коэффициент нарастания шкалы сечений проводов, который составляет не менее 2–2,5, что обеспечивает продление срока службы объекта до первой реконструкции вдвое при условии минимума технологических потерь.

Для регулирования процессом управления транспортом электроэнергии в реальном времени разработаны некоторые аспекты развития ВЛ как активно-адаптивных объектов ЭС. Для этого были проанализированы изменения величины передаваемой мощности и технологических потерь при неизменной токовой нагрузке с учетом температурного мониторинга, которые показали что если рассматривать ВЛ как активно-адаптивные объекты ЭС, необходимо учитывать то, что линии должны быть оснащены соответствующими средствами оценки и контроля параметров режима работы в реальном времени, что соответствует платформе Smart Grid.

Представленные в статье научные исследования отражены в программном документе [15].

7. Выводы

Для усовершенствования процесса управления режимами работы электрических сетей в современных условиях решены следующие задачи:

1. Разработан подход к построению параметрических рядов сечений проводов воздушных линий электропередачи, который является основой унификации линий. Представленный подход не противоречит мировой практике унификации ВЛ и за счет оптимального коэффициента нарастания шкалы сечений проводов позволяет снизить влияние неоднородности сети, что приводит к уменьшению технологических потерь, увеличению регламента реконструкции объекта в два раза для оптимизации процесса управления транспортом электроэнергией в условиях балансировочного.

2. Разработаны некоторые аспекты перехода воздушных линий с оптимальным сечением проводов в активно-адаптивный формат согласно платформе Smart grid для регулирования процесса управления транспортом электроэнергией в реальном времени с учетом дополнительной информации о текущих параметрах объекта за счет температурного мониторинга.

Литература

1. Про засади функціонування ринку електричної енергії України : Закон України від 24.10.2013 № 663-VII [Текст]. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/663-18>
2. Кириленко, О. В. Балансуючий ринок електроенергії і його математична модель [Текст] / О. В. Кириленко, І. В. Блінов, Є. В. Парус – Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 36–43.
3. Будзко, И. А. Унификация воздушных линий электропередачи [Текст] / И. А. Будзко, Ю. Н. Астахов, Н. М. Черемисин // Электричество. – 1982. – № 2. – С. 1–11.
4. Файбисович, Д. Л. Предложения по унификации сечений проводов воздушных линий напряжением 110 – 750 кВ [Текст] / Д. Л. Файбисович // Энергетик. – 2003. – № 3. – С. 21–22.
5. Лежнюк, П. Д. Уніфікація повітряних ліній в умовах ринку двосторонніх договорів та балансувального ринку електроенергії [Текст] / П. Д. Лежнюк, М. М. Черемісін, В. В. Черкашина // Наукові праці ВНТУ. – 2013. – № 4. – С. 1–8. – Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/378>
6. Черемисин, Н. М. Выбор приоритетного направления в проектировании воздушных линий электропередачи в условиях рыночных отношений [Текст]: сб. тр. VI Всерос. науч.-техн. конф. / Н. М. Черемисин, В. В. Черкашина // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. – Благовещенск: АГУ. – 2011. – Т. 1. – С. 105–110.
7. Manjure, D. P. Optimal load curtailment as a bi-criteria program [Text] / D. P. Manjure, E. V. Makram // Electrical Power Systems Research. – 2003. – Vol. 66, Issue 2. – P. 155–161. doi: 10.1016/s0378-7796(03)00079-8
8. European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future [Текст]. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006. – 44 p.
9. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid [Текст] / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. – М.: Энергия, 2010. – 208 с.
10. DITEST STA-R series fiber optic distributed strain and temperature analyzer [Electronic resource]. – Available at : <http://www.omnisens.com/ditest/>
11. Лежнюк, П. Д. Повышение эффективности управления режимами электрических сетей на базе мониторинга параметров воздушных линий и окружающей среды [Текст] / П. Д. Лежнюк, Н. М. Черемисин, В. В. Черкашина и др. // Электрические сети и системы. – 2012. – № 5. – С. 39–46.
12. Черемисин, Н. М. Критериальный метод анализа технико-экономических задач в электрических сетях и системах [Текст]: учеб. пос. / Н. М. Черемисин, В. В. Черкашина. – Харьков : Факт, 2014. – 88 с.
13. Черкашина, В. В. Фактор времени в стратегии совершенствования электрических сетей [Текст] / В. В. Черкашина // Электротехника і Електромеханіка. – 2014. – № 3. – С. 65–68.
14. Лежнюк, П. Д. Определение потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем от транзитных перетоков [Текст] / П. Д. Лежнюк, А. Б. Бурькин, В. В. Кулик // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2009. – Спец. вип.: Енергетичні ринки – перехід до нової моделі ринку двосторонніх контрактів і балансувального ринку. – С. 31–36.
15. Рекомендації Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» за напрямком «Стратегія розвитку технологій Smart Grid в електроенергетичній галузі України»: програмний документ [Текст]. – Харків, 2014. – 12 с.