

В.П. Метельский, канд. техн. наук, профессор  
А.П. Заболотный, канд. техн. наук, доцент  
В.В. Дьяченко, канд. техн. наук, доцент; Ю.В. Даус  
Запорожский национальный технический университет

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ РАСПРЕДЕЛЕННУЮ ГЕНЕРАЦИЮ

*Предложен подход к формализации процесса формирования структуры сельской электрической сети при ее проектировании и модернизации в условиях присутствия в ней возобновляемых источников электрической энергии, в основе которого лежит метод эквипотенциальных контуров, который позволяет учесть изменение режима работы сельских электрических сетей при подключении новых источников электрической энергии, оптимизировать их структуру с точки зрения снижения годовых приведенных затрат, а также исключить влияние фактора субъективизма проектировщика на оптимальность принятых решений.*

**Ключевые слова:** формализация, сельские электрические сети, возобновляемые источники энергии, структура.

Постоянный рост тарифов на электрическую энергию приводит к значительному увеличению составляющей стоимости потерь электроэнергии при ее передаче и распределении.

Как известно, в зависимости от причин их возникновения потери электрической энергии (ПЭЭ), можно разделить на потери, определяемые условиями работы сетей при номинальных режимах и оптимальном выборе параметров систем электроснабжения (номинальные) и потери, обусловленные отклонениями режимов от номинальных значений, а именно технологические потери, потери от передачи реактивной мощности, а также потери из-за ухудшения качества электрической энергии (дополнительные).

Снижение дополнительных ПЭЭ возможно путем снижения энергоемкости технологических процессов посредством внедрения передового технологического оборудования, компенсации потребляемой из сети реактивной и искажающей мощностей, а так же симметрирования сетевых фазных токов.

Уменьшение номинальной составляющей ПЭЭ возможно только на этапе проектирования путем оптимизации структуры новых электрических сетей либо при реконструкции уже существующих сетей электроснабжения.

Особую актуальность оптимизация структуры системы электроснабжения приобретает в системах электроснабжения сельскохозяйственных районов. Это распределительные сети напряжением 6...35 кВ, которые, как известно, отличаются большой протяженностью, разветвленностью при сравнительно малой передаваемой мощности, а также использованием низких классов напряжения.

Кроме того, в настоящее время в условиях роста тарифов на энергоносители, нехватки генерирующих мощностей, их высокого износа и небольшой эффективности в агропромышленном комплексе наблюдается тенденция внедрения элементов концепции Smart Grid, а именно поиск и внедрение средств распределенной генерации на базе возобновляемых источников энергии - установка ветроэлектростанций, гелиоустановок, малых гидроэлектростанций и т.д. Использование модульных систем позволяет подключить последние непосредственно к сетям централизованного электроснабжения. Однако, из-за несогласованного подключения таких источников генерации к сельским электрическим сетям (СЭС) возникает проблема сложности управления и прогнозирования режимов работы сетей, а также необходимость обеспечить их новое свойство – возможность сочетания централизованного и распределенного управления в нормальных режимах. При этом структура таких сетей становится не оптимальной с точки зрения минимума годовых приведенных затрат, в том числе и стоимости потерь электроэнергии (номинальной составляющей) при ее передаче и распределении [1, 2].

Как известно, оптимальность принятых схемных решений для таких систем в большой степени зависит от субъективной оценки проектировщика. Исключить фактор субъективизма возможно посредством формализации процесса синтеза топологии систем электроснабжения, содержащих источники распределенной генерации (ИРГ), что даст возможность автоматизировать процесс их проектирования. Это, в свою очередь, позволит увеличить пропускную способность электрических

сетей, снизить номинальную составляющую ПЭЭ, обеспечить допустимые отклонения напряжения на зажимах электроприемников [3].

*Цель* – формализовать процесс формирования структуры сельской электрической сети в условиях присутствия в ней источников распределенной генерации.

Ключевой задачей при формировании оптимальной структуры СЭС является задача определения количества источников питания с координатами их установки и распределение по ним приемников электроэнергии, а также оборудование промежуточных узлов нагрузки с учетом ИРГ и специфики используемых технологических процессов. Однако применяемые в настоящее время методы проектирования структуры СЭС не учитывают наличие перетоков мощности в таких сетях, что обуславливает необходимость их развития [3].

Основные подходы при решении задач построения оптимальной структуры СЭС базируются на использовании оценочных и оптимизационных моделей. Первые служат для определения технико-экономических показателей для заданного проектировщиком варианта сети. Вторые – для определения оптимального варианта конфигурации сети в пределах принятых проектировщиком допущений в соответствии с принятым критерием оптимальности. При этом в оптимизационных моделях необходимо учитывать дискретность некоторых величин (сечение проводов и кабелей, мощность и количество трансформаторов и т.д.).

Анализ существующих методов решения задачи определения количества источников питания и распределение по ним приемников электроэнергии показал, что объединить оценочные и оптимизационные модели возможно на основе метода эквипотенциальных контуров [4, 5].

Суть метода эквипотенциальных контуров заключается в проведении аналогии между нагрузкой приемников ( $P_i$ ), расположенных в точках  $(x_i; y_i)$ , и потенциалами некоторых источников энергии, расположенных в тех же точках. Потенциалы этих источников равняются нагрузкам приемников. При удалении от точки расположения приемника потенциал от источника, расположенного в той самой точке, будет уменьшаться и в некоторых отдаленных точках потенциал будет близок к нулю. Совокупность всех потенциалов источников энергии образует потенциальную поверхность имеющую максимум, которую можно описать потенциальной функцией

$$П(x, y) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot e^{-1 \cdot \alpha_{\Delta P_i} \cdot \text{Трасса}(i, x, y)}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – мощность  $i$ -ого электроприемника;

$x, y$  – координаты, в которых определяться значение потенциальной поверхности;

$\alpha_{\Delta P_i}$  – коэффициент, учитывающий ожидаемые потери в линиях, определяется по выражению (2);

$\text{Трасса}(i, x, y)$  – функция определения протяженности пути между  $i$ -м электроприемником и точкой с координатами  $x, y$ .

$$\alpha_{\Delta P_i} = \frac{P_i^2 \cdot \rho}{U^2 \cdot F_i}, \quad (2)$$

где  $P_i$  – мощность  $i$ -ого электроприемника;

$F_i$  – сечение проводника для подключение  $i$ -ого электроприемника;

$\rho$  – удельное сопротивление материала проводника;

$U^2$  – напряжение.

Использование предложенного коэффициента  $\alpha_{\Delta P_i}$  (выражение 2) дает возможность сразу оценить степень будущих потерь в проводниковом материале при определении центра электрических нагрузок. Для учёта влияния ИРГ на значения координат установки источника питания (трансформаторная подстанция), строится аналогичная поверхность и для ИРГ, при этом  $P_i$  принимает значение равное величине генерируемой энергии со знаком минус.

Таким образом, процедуру определения значения координат установки источника питания СЭС, содержащей ИРГ, можно представить в виде следующего алгоритма:

- на первом этапе строится потенциальная поверхность для электроприемников района;
- на втором этапе строится поверхность для ИРГ;
- затем производится наложение этих поверхностей;

– на суммарной поверхности выделяется максимум функции, в координатах которого и будет расположен источник питания СЭС.

Важным моментом в определении этих координат является учет зон запрета прокладки линий и установки источников питания. Для этого возможно использовать методы распознавания образов, в соответствии с которыми предусмотрено разбиение пространства объекта на области, которые не пересекаются, каждая из которых соответствует отображению одного и того же класса, к которому допустимо элементарное математическое описание [5].

Предложенный алгоритм был апробирован на примере участка СЭС Запорожской области площадью 12 км<sup>2</sup>. За базисную структуру СЭС (№1) была выбрана система электроснабжения со следующими параметрами. Расчетная нагрузка района 2,2 МВА, его источником питания является двухтрансформаторная подстанция с трансформаторами типа ТМН - 4000/35, которые получают питание по воздушным линиям (ВЛ) напряжением 35 кВ. Электрические сети напряжением 10 кВ конструктивно реализованы воздушными линиями, проложенными на железобетонных опорах.

В рамках эксперимента были исследованы 6 вариантов структуры системы электроснабжения сельскохозяйственного района (рисунок 1):

№2, №4, №6 - существующая система электроснабжения при подключении к ней ВЭУ (0,9 МВт), МГЭС (1,3 МВт) и их совместное подключение соответственно;

№3, №5, №7 –структуры электрической сети, полученные на основе оптимизации координат месторасположения источника питания при подключении ВЭУ (0,9 МВт), МГЭС (1,3 МВт) и их совместном подключении соответственно [6].

В табл.1 приведены результаты численного эксперимента для каждого из рассматриваемых вариантов структуры СЭС.

Таблица 1

Суммарная длина ВЛ 10 кВ и ВЛ 35 кВ для каждого из вариантов структуры электрической сети сельскохозяйственного района

№ варианта	Длина ВЛ 10кВ, км	В том числе длина ВЛ 10кВ, км		Длина ВЛ 35 кВ, км
		от ВЭУ	от МГЭС	
1	10,83	-	-	15,9
2	12,3	1,47	-	15,9
3	11,33	1,47	-	15,7
4	17,09	-	6,26	15,9
5	10,89	-	6,26	15,5
6	18,56	1,47	6,26	15,9
7	12,19	1,47	6,26	15

При подключении к существующей сети ВЭУ и МГЭС требует сооружения дополнительных ВЛ 10кВ, которые присоединяют их к сети, однако, оптимизация структуры СЭС (вариант №3, №5, №7) посредством предложенного алгоритма позволяет сократить не только суммарную длину ВЛ 10 кВ, а и ВЛ 35 кВ за счет изменения координат установки источника питания.

В результате изменения длины ВЛ, а также уменьшения потребляемой из энергосистемы мощности на 1,6 тыс и 4,4 тыс МВт час/год при подключении ВЭУ и МГЭС соответственно изменилась и величина ПЭЭ в элементах сети (рисунок 2).

Как видно из приведенных диаграмм наиболее оптимальным является вариант структуры СЭС №7, позволяющий снизить номинальную составляющую ПЭЭ почти на 60 %, что обусловлено существенным снижением потребления электрической энергии из сети за счет подключения ИРГ и оптимизации структуры сети района.

Кроме того, ПЭЭ в трансформаторах ПС 35/10кВ уменьшились на 17,1% при подключении ВЭУ и на 22,2% при подключении МГЭС в результате снижения величины потребляемой электрической энергии от энергосистемы.

Для вариантов структуры СЭС №3, №5 снижение ПЭЭ в ВЛ 10 кВ составило с 55,2 до 52,4 МВт·час/год, 54,9-47,4 МВт·час/ год соответственно.

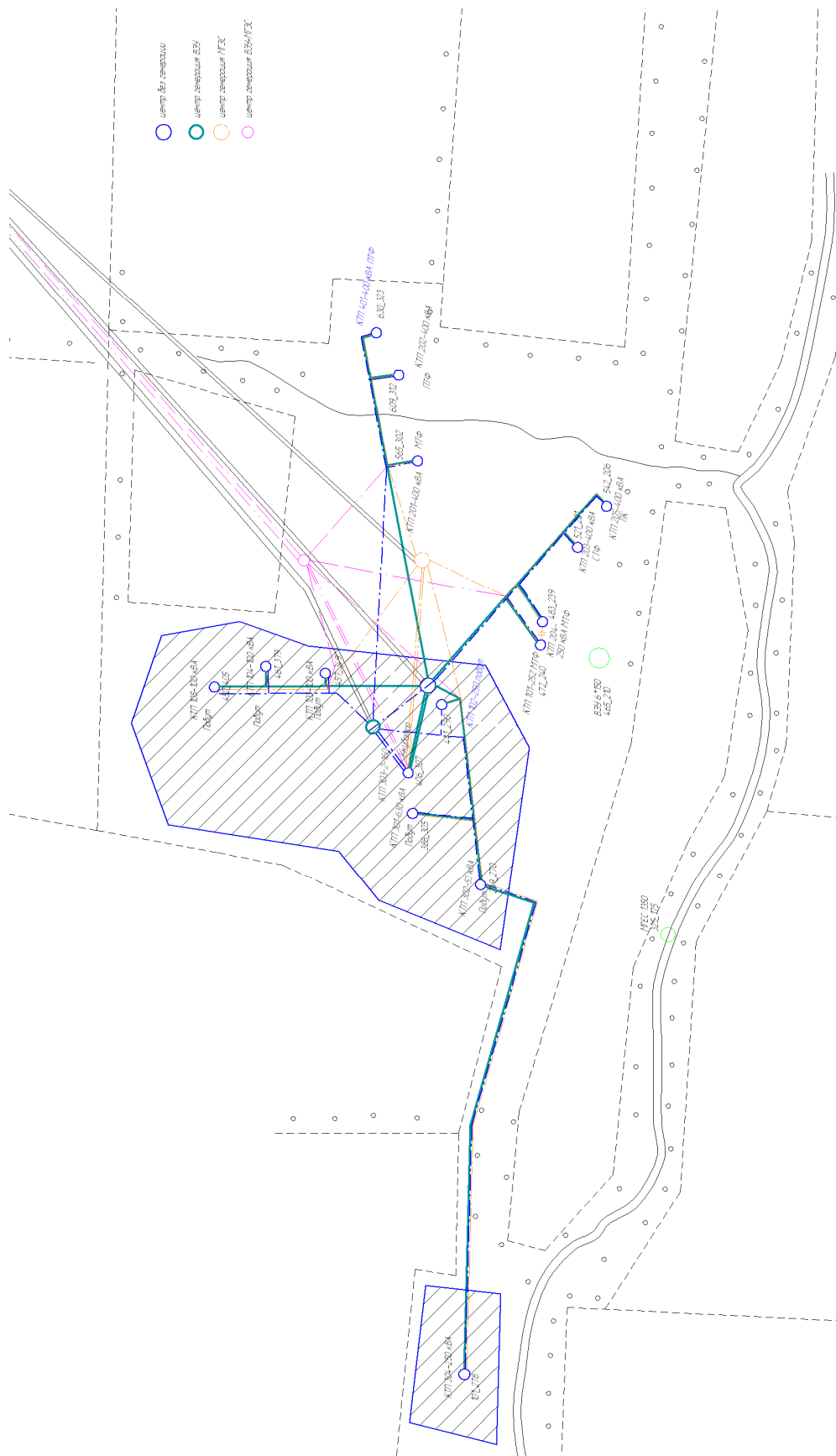


Рис. 1. Варіанти структур системи електропостачання сільськогосподарського району

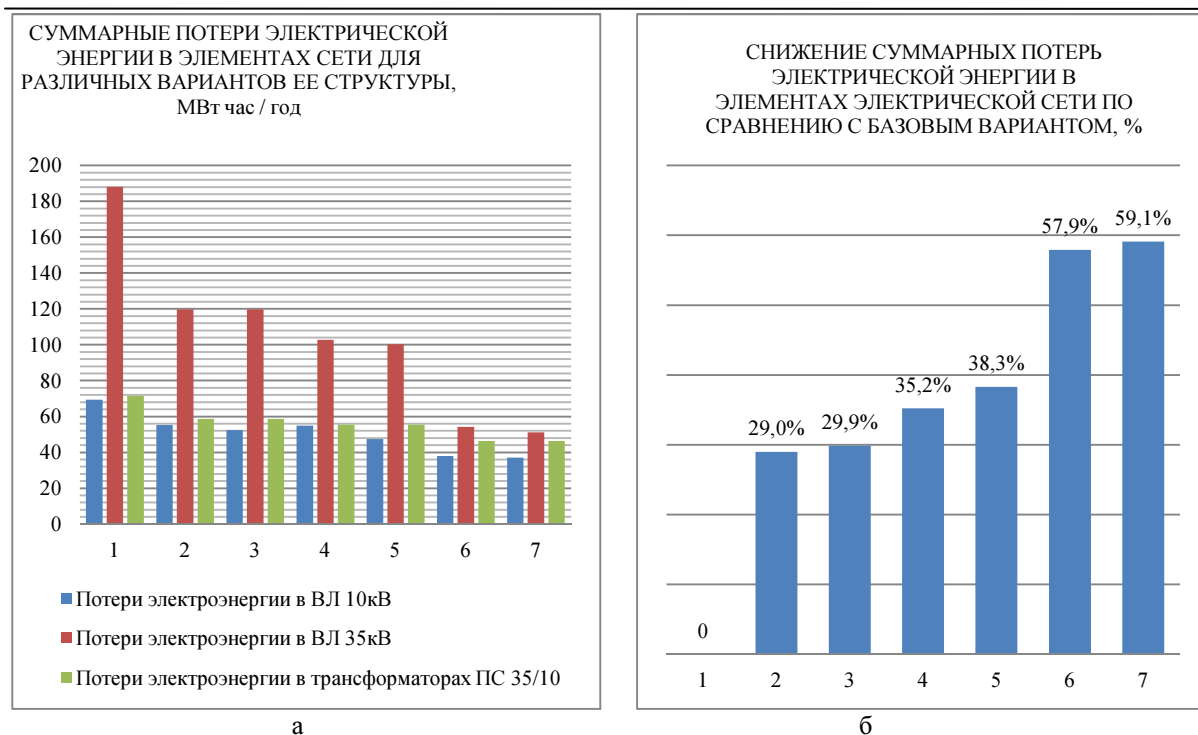


Рис. 2. Величина потерь электрической энергии для различных вариантов структуры электрической сети: а - потери электрической энергии в элементах сети для различных вариантов ее структуры; б – снижение суммарных потерь электрической энергии в элементах электрической сети по сравнению с базовым вариантом.

**Выводы.** Предложенный подход к формализации процесса формирования структуры сельской электрической сети при ее проектировании и модернизации в условиях присутствия в ней возобновляемых источников электрической энергии, в основе которого лежит метод эквипотенциальных контуров позволяет учесть изменение режима работы таких сетей и позволяет оптимизировать их структуру с точки зрения снижения номинальной составляющей потерь электроэнергии.

#### Список литературы

1. Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах электроснабжения [Текст] / А.В. Праховник – К.: Освіта України, 2007. – 464 с., ил.
2. Праховник А.В. Перспективы и пути развития распределенной генерации в Украине / А.В. Праховник, В.А. Попов, Е.С. Ярмолюк, М.Т. Кокорина // *Енергетика: економіка, технології, екологія* / Научн. Журнал. – К.: НТУУ «КПИ», 2012. - №2. с.7-14.
3. Заболотний А.П. Побудова структури мереж електропостачання споживачів АПК, що містять джерела «малої генерації» / А.П. Заболотний, Д.В. Федоша, Ю.В. Даус // *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. Технічні науки «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. – 2011. – Вип. 116. – с.20-21.
4. Розвиток методу еквипотенційних контурів для проектування розподільчої мережі / І.В. Авдєєв, А.П. Заболотний, Д.В. Федоша, С.А. Теліпайло, В.С. Мамбаєва // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Тематичний випуск "Електроенергетичні та електромеханічні системи"* – 2009. – № 637 – с. 3-7.
5. Качан Ю.Г. О возможности распознавания топологии оптимальной системы электроснабжения / Ю.Г. Качан, В.В. Дьяченко. // *Гірничя електромеханіка та автоматика* – 2007. - № 78. – с.3-5.
6. Побудова структури мереж електропостачання підприємств АПК, які містять вітроенергетичні установки / А.П. Заболотний, Д.В. Федоша, Ю.В. Даус, Д.О. Данильченко // *Вісник ТДАТУ «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. – 2012. – Вип. 7. – с.37-41.

V. Metelskii, A. Zabolotnyi, V. Dyachenko, Y. Daus  
Zaporizhzhya national technical university

#### DESIGNING PROCESS FORMALIZATION OF RURAL ELECTRIC NETWORKS CONTAINING DISTRIBUTED GENERATION

*There is presented an approach to formalize the structure formation process of rural power network on the stage of its designing and modernization in terms of renewable electrical energy presence in it, which is based*

*on the equipotential contours method, which allows to consider the rural electric networks mode changing when new electrical energy sources are attached to them, optimize their structure in terms of the annual cost reduction, as well as to eliminate the subjectivity designer influence factor for decisions optimality.*

**Keywords:** formalization, rural electric network, renewable energy, structure.

1. Prahovnik A.V. Malaya energetika: raspredelennaya generatsiya v sistemah elektrosnabzheniya [Text] / A.V. Prahovnik – K.: Osvita Ukraini, 2007. – 464 p., il.
2. Prahovnik A.V. Perspektivy i puti razvitiya raspredelennoy generatsii v Ukraine / A.V. Prahovnik, V.A. Popov, E.S. Yarmolyuk, M.T. Kokorina // Energetika: ekonomika, tehnologiyi, ekologiya / Nauchn. zhurnal. – K.: NTUU «KPI», 2012. - №2. pp.7-14.
- 3 A. Zabolotnyi Pobudova strukturi merezh elektropostachannya spozhivachiv APK, scho mistyat dzherela «maloyi generatsiyi»/ A. Zabolotnyi, D. Fedosha, Y. Daus // visnik HNTUSG Im. Petra Vasilenka. Tehnichni nauki «Problemi energozabezpechennya ta energozberezhennya v APK Ukraini – 2011. – Issue. 116. – p.20-21.
4. Rozvitok metodu ekvipotentsialnykh konturiv dlya proektuvannya rozpodilchoyi merezhi / I. Avdeev, A. Zabolotnyi, D. Fedosha, S. Telipaylo, V. Mambayeva // Visnik natsionalnogo universitetu "Ivivska politehnika". Tematichniy vipusk "Elektroenergetichni ta elektromehanični sistemi" – 2009. – № 637 – p. 3-7.
5. Kachan Yu.G. O vozmozhnosti raspoznavaniya topologi optimalnoy sistemyi elektrosnabzheniya / Yu.G. Kachan, V.V. Dyachenko. // Girnicha elektromehanika ta avtomatika – 2007. - № 78. – p.3-5.
6. Pobudova strukturi merezh elektropostachannya pidpriemstv APK, yaki mistyat vitroenergetichni ustanovki / A. Zabolotnyi, D. Fedosha, Y. Daus, D. Danilchenko // Visnik TDATU «Problemi energozabezpechennya ta energozberezhennya v APK Ukraini». – 2012. – Issue 7. – p.37-41.

**В.П. Метельский**, канд. техн. наук, професор

**А.П. Заболотный**, канд. техн. наук, доцент

**В.В. Дьяченко**, канд. техн. наук, доцент, **Ю.В. Даус**

**Запорізький національний технічний університет**

#### **ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ СІЛЬСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ, ЯКІ МІСТЯТЬ РОЗПОДІЛЕНУ ГЕНЕРАЦІЮ**

*Запропоновано підхід до формалізації процесу формування структури сільської електричної мережі при її проектуванні та модернізації в умовах присутності в ній поновлюваних джерел електричної енергії, в основі якого лежить метод еквіпотенціальних контурів, що дозволяє врахувати зміну режиму роботи сільських електричних мереж при підключенні нових джерел електричної енергії, оптимізувати їх структуру з точки зору зниження річних приведених витрат, а також виключити вплив фактора суб'єктивізму проектувальника на оптимальність прийнятих рішень.*

**Ключові слова:** формалізація, сільські електричні мережі, поновлювані джерела енергії, структура.

УДК 621.311

**В.В. Кирик**, д-р техн. наук, професор, **Р.В. Нагорний**

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»**

#### **ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ГЕОМАГНІТНИХ ІНДУКЦІЙНИХ СТРУМІВ В МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 750 КВ**

*В роботі виконано розрахунок розподілу геомагнітних індукційних струмів в магістральних електричних мережах 750 кВ. В середовищі Matlab/Simulink створено програмний комплекс, який дозволяє оперативно проводити комутацію обладнання електричної мережі з відображенням значень розподілу геомагнітних індукційних струмів в GoogleEarth по підстанціях. Показано, що розподіл геомагнітних індукційних струмів в мережі залежить від напрямку геоелектричного поля. За результатами моделювання представлено картину розподілу максимальних значень струмів по мережі та встановлено підстанції, які під час геомагнітних бур можна вважати потенційно вразливими.*

**Ключові слова:** геомагнітні індукційні струми (ГІС), графічний інтерфейс користувача, Matlab/Simulink, GoogleEarth.