
УДК 621.34011

А.Ф. Жаркин, чл.-кор. НАН Украины,
Ин-т электродинамики НАН Украины
(Украина, 03680, Киев, пр. Победы, 56),
В.А. Попов, канд. техн. наук, **В.В. Ткаченко**,
Саид Банузаде Сахрагард, аспирант
Ин-т энергосбережения и энергоменеджмента НТУУ «КПИ»
(Украина, 03056, Киев, ул. Борщаговская, 115,
тел. (044) 4549691, e-mail: tka-vadim@yandex.ru)

Функциональное эквивалентирование электрических сетей при оценке влияния источников распределенной генерации на их режимы

Предложены и протестированы способы построения эквивалентов электрических сетей напряжением 110...220 кВ для определения величины изменения потерь мощности и электрической энергии при интеграции в них источников распределенной генерации. Для решения данной задачи использован математический аппарат факторного планирования экспериментов. Проанализированы способы проверки применимости полученных моделей для компьютерных экспериментов в случае отсутствия возможности реализации дублирующих опытов. Полученные результаты предназначены для комплексной оценки влияния источников распределенной генерации при их подключении в различных точках электрической сети.

Запропоновано та протестовано способи побудови еквівалентів електричних мереж напругою 110...220 кВ для визначення величини зміни втрат потужності та електричної енергії при інтеграції в них джерел розподіленої генерації. Для розв'язання даної задачі використано математичний апарат факторного планування експериментів. Проаналізовано способи перевірки придатності отриманих моделей для використання в комп'ютерних експериментах, коли неможливо реалізувати дублюючі досліді. Отримані результати призначені для комплексної оцінки впливу джерел розподіленої генерації при їх підключенні в різних точках електричної мережі.

К л ю ч е в ы е с л о в а: факторное планирование экспериментов, электрические сети, распределенная генерация, потери мощности и электрической энергии.

В последние два десятилетия значительно возросло применение распределенной генерации на основе как возобновляемых, так и традиционных источников энергии. В странах ЕС установленная мощность построенных в последние годы объектов распределенной генерации практически соизмерима с мощностью новых источников, введенных генерирующими ком-

© А.Ф. Жаркин, В.А. Попов, В.В. Ткаченко, Саид Банузаде Сахрагард, 2013

паниями. Несомненно, этот факт не может не отразиться в той или иной мере и на развитии электроэнергетики Украины.

Следует заметить, что в настоящее время источники распределенной генерации применяются, в первую очередь, при их интеграции в электрические сети, что, в определенной мере, упрощает проекты (вследствие отсутствия необходимости аккумулирования энергии) и существенно повышает надежность энергообеспечения объектов.

Для успешного развития и внедрения данного направления, кроме наличия соответствующих законодательной и нормативной баз, требуется тщательная координация проектов размещения и выбора параметров объектов распределенной генерации с политикой развития и техническими характеристиками энергосистем, которые осуществляют централизованное энергообеспечение в конкретном регионе. Выполнение этих условий позволяет во многих случаях существенно сократить затраты, связанные с реализацией выставляемых энергосистемой технических условий на присоединение объектов распределенной генерации к электрическим сетям, и ускорить процесс реализации проектов.

Поэтому выбор оптимальных условий использования источников распределенной генерации, анализ и оценка их влияния на комплекс режимных показателей электрических сетей различных номинальных напряжений являются весьма актуальными задачами [1—4].

При решении этих задач одним из важных критериев, характеризующих эффективность принимаемого решения, является оценка изменения потерь мощности и электрической энергии. При этом желательно, чтобы эта оценка носила комплексный характер, т.е. чтобы учитывались различные структурные элементы системы энергообеспечения вне зависимости от их ведомственной принадлежности.

В частности, по мере возрастания мощности генерирующих источников, например при их подключении непосредственно к шинам подстанций, для оценки изменения потерь мощности и энергии недостаточно рассматривать только сети напряжением 6...20 кВ, так как основной эффект снижения потерь мощности в этом случае будет проявляться в сетях энергосистемы. Однако облэнерго, в пределах которых предполагается внедрение источников распределенной генерации, часто не располагают необходимой информацией о параметрах сетей, находящихся на балансе другой организации, и их режимах и не могут адекватно оценить последствия различных вариантов использования генерирующих источников. В этом случае эффективным способом решения поставленной задачи может быть эквивалентирование определенных фрагментов энергосистемы.

Целью работы является формирование функционального (для решения конкретной задачи) эквивалента электрических сетей напряжением

110...220 кВ для оценки (на основе применения факторного планирования экспериментов) их реакции на интеграцию источников распределенной генерации. Выбор математического аппарата в значительной мере объясняется существенным сокращением необходимого объема вычислений при построении многофакторных регрессионных моделей.

Построение базовой модели замкнутой сети энергосистемы. Метод полного факторного эксперимента (ПФЭ) дает возможность построить математическую модель в форме линейной части уравнения регрессии, включая члены, содержащие произведения факторов в первой степени. Для изучения воздействия какого-либо фактора на функцию отклика необходимо изменять этот фактор и наблюдать, к каким результатам приводят эти изменения. Поэтому при реализации планирования эксперимента прежде всего необходимо задать уровни изменения каждого фактора ($x_i^- \dots x_i^+$), после чего модель может быть построена только для ограниченной области факторного пространства.

Полный факторный эксперимент требует реализации опытов для всех возможных комбинаций принятых уровней варьирования факторов, что, в общем случае, составляет $N = \gamma^k$ опытов, где k — число факторов, γ — число уровней их варьирования. Однако при оценке ошибки эксперимента необходимо повторить опыты для каждой комбинации факторов и, следовательно, суммарное число опытов будет значительно больше.

Для удобства вычислений значения факторов x_i должны быть пересчитаны (закодированы) в соответствии с формулой

$$\tilde{x}_i = (x_i - x_{i0}) / \Delta x_i, \quad i = 1, \dots, k, \quad (1)$$

где x_{i0} — среднее значение диапазона изменения факторов (центр плана эксперимента); $\Delta x_i = x_{i0} - x_i^- = x_i^+ - x_{i0}$. Выполнение указанного условия дает возможность существенно упростить процесс определения коэффициентов регрессионной модели и ее статистический анализ [5—7].

Во многих случаях при реализации ПФЭ взаимодействия факторов высшего порядка оказываются незначимыми, что позволяет использовать соответствующие вектор-столбцы матрицы планирования для задания дополнительных факторов. Такой план эксперимента получил название дробного факторного эксперимента (ДФЭ) и в общем случае обозначается как 2^{k-p} .

Для построения модели, связанной с оценкой изменения потерь мощности в сетях энергосистемы, предложено несколько подходов, которые отличаются не только способами реализации экспериментов, но и структурой формируемых моделей и составом включаемых в них факторов.

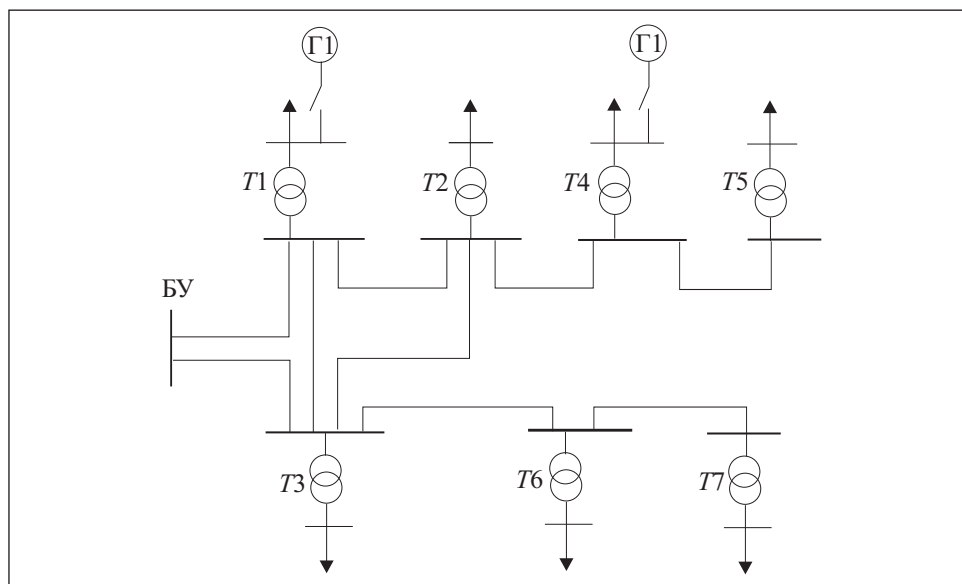


Схема электрической сети: T1—T7 — узлы нагрузки; БУ — балансирующий узел

В простейшем случае допустим, что в качестве основных факторов модели приняты нагрузки всех узлов замкнутой сети, а также величина мощности источника распределенной генерации, подключенного к системе на уровне распределительной сети. Значения функции отклика в каждом опыте (где значения факторов заданы строго в соответствии с определенным планом эксперимента [5]) определяются в результате выполнения двух последовательных расчетов режима. Сначала определяется величина потерь мощности ΔP_k в эквивалентруемой замкнутой сети при соответствующих значениях нагрузок в ее узлах и без учета источника распределенной генерации. Затем выполняется расчет потерь мощности $\Delta P'_k$ с учетом влияния источника распределенной генерации, для чего соответственно корректируется нагрузка узла, в распределительной сети которого предполагается подключение указанного источника. В качестве соответствующего значения функции отклика принимается величина изменения потерь мощности $\delta(\Delta P)_k = \Delta P_k - \Delta P'_k$.

Рассмотрим замкнутую электрическую сеть номинальным напряжением 110 кВ, схема которой представлена на рисунке. При построении модели будем считать, что реактивные нагрузки в узлах сети T1—T7, незначительны и ими можно пренебречь. В связи с этим все нагрузки узлов и мощность источника распределенной генерации при проведении расчетов заданы только активными составляющими. Границы диапазонов

изменения факторов определяются так, чтобы охватить возможные суточные изменения нагрузок в узлах сети и выходных параметрах источника генерации. Поскольку схема электрической сети содержит семь узлов нагрузки, формируемая модель должна включать восемь факторов, семь из которых, $x_1 \dots x_7$, соответствуют нагрузкам узлов $P_1 \dots P_7$, а восьмой фактор, x_8 , характеризует мощность источника распределенной генерации ΔP_r .

В соответствии с ПФЭ и при варьировании факторов на двух уровнях для построения модели потребуется 2^8 опытов. Можно предположить, что в формируемой модели взаимодействия факторов высшего порядка (например, выше второго) будут незначимы, что дает возможность использовать для построения модели ДФЭ, в частности ДФЭ 2^{8-4} , а это, в свою очередь, позволяет в 16 раз сократить число требуемых для построения модели опытов.

Для задания в матрице планирования факторов $x_5 \dots x_8$ используем соответственно вектор-столбцы $x_2 x_3 x_4$, $x_1 x_3 x_4$, $x_1 x_2 x_4$, $x_1 x_2 x_3 x_4$ матрицы ПФЭ 2^4 . Таким образом, матрица планирования ДФЭ 2^{8-4} будет иметь вид, представленный в таблице, где значения факторов указаны в закодированном виде согласно (1).

Номер п.п	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_1 x_4$	$x_2 x_3$	$x_2 x_4$	$x_3 x_4$	$x_1 x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_4$	$x_1 x_3 x_4$	$x_2 x_3 x_4$	$x_1 x_2 x_3 x_4$
													x_7	x_6	x_5	x_8
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1
4	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
5	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1
6	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
7	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
8	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
9	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
10	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
11	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
12	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
13	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
14	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1
15	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Реализация опытов в соответствии с представленной матрицей планирования позволяет, в общем случае, построить уравнение регрессии (модель):

$$y' = a_0 + a_1\tilde{x}_1 + a_2\tilde{x}_2 + a_3\tilde{x}_3 + a_4\tilde{x}_4 + a_5\tilde{x}_5 + a_6\tilde{x}_6 + a_7\tilde{x}_7 + a_8\tilde{x}_8 + \\ + a_{12}\tilde{x}_1\tilde{x}_2 + a_{13}\tilde{x}_1\tilde{x}_3 + a_{14}\tilde{x}_1\tilde{x}_4 + a_{23}\tilde{x}_2\tilde{x}_3 + a_{24}\tilde{x}_2\tilde{x}_4 + a_{34}\tilde{x}_3\tilde{x}_4 + a_{123}\tilde{x}_1\tilde{x}_2\tilde{x}_3.$$

Для определения коэффициентов модели используют формулу [5]

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{ui} \bar{y}_i, \quad i = 0, \dots, m,$$

где $\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n y_{iq}$; n — число дублирующих опытов, в каждом из которых

значение функции отклика имеет значение y_{iq} ; m — число коэффициентов модели. Однако, окончательная структура модели определяется в процессе статистического анализа полученных результатов.

Особенности статистического анализа моделей, сформированных на основе компьютерных экспериментов. Формально статистический анализ результатов, полученных при планировании эксперимента, начинается с вычисления дисперсий в отдельных строках матрицы планирования, проверки их однородности с использованием индекса Кохрена [5] и определения дисперсии воспроизводимости по формуле

$$s^2\{y\} = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{q=1}^n (y_{uq} - \bar{y}_u)^2}{N(n-1)}, \quad \bar{y}_u = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n y_{uq}, \quad u = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Однако, поскольку в данном случае выполняются не физические, а компьютерные эксперименты (расчеты), реализация дублирующих опытов теряет смысл. Вместе с тем, данный факт делает невозможным определение стандартным способом, по формуле (2), дисперсии воспроизводимости, которая является важнейшей характеристикой для дальнейшего статистического анализа. В связи с этим для данной цели можно воспользоваться следующими подходами.

В работах [8—10] предложено два основных способа вычисления дисперсии воспроизводимости. В первом случае принимается

$$s^2\{y\} = \beta a_0. \quad (3)$$

При этом для технических приложений рекомендуется принимать $\beta = 0,05$ [8]. Во втором случае рассматривается возможность проведения ряда дополнительных опытов в некоторых характерных точках факторного пространства. Тогда дисперсия воспроизводимости вычисляется по формуле

$$s^2\{y\} = \sum (y_i - y'_i)^2 / M, \quad (4)$$

где M — число дополнительных опытов.

Учитывая специфику рассматриваемой задачи, можно предложить еще один подход для оценки дисперсии воспроизводимости, основанный на использовании вероятностно-статистического моделирования.

Результатами многочисленных исследований доказано, что нагрузки в узлах энергосистемы, с учетом их вероятностной природы, в подавляющем большинстве случаев на участках стационарности подчиняются нормальному закону распределения. При этом коэффициент вариации, как правило, не превышает уровня 0,1. Данное обстоятельство позволяет имитировать дублирующие опыты для каждого состава исходных данных (строк матрицы планирования). В этом случае заданные граничные значения изменения электрических нагрузок рассматриваются как их математические ожидания.

В каждом опыте, соответствующем определенной строке матрицы планирования, конкретные значения нагрузок узлов можно определить, используя датчик случайных чисел, распределенных по нормальному закону. Следовательно, нагрузка некоторого k -го узла сети ($k = 1, \dots, 7$) в ℓ -й строке матрицы планирования ($\ell = 1, \dots, 16$) и в m -м дублирующем опыте ($m = 1, \dots, M$) определяется так: $P_{klm} = P_{k\ell} + (\alpha_{k\ell m} - 0,5) 0,6P_{k\ell}$, где $P_{k\ell}$ — значения математического ожидания нагрузки узла сети (в соответствии с заданным диапазоном варьирования и матрицей планирования); $\alpha_{k\ell m}$ — сгенерированное случайное число, подчиняющееся нормальному закону распределения. Таким образом, полученные случайные значения нагрузок P находятся в диапазоне $P_{cp} \pm 3\sigma$ (или $0,7P_{cp} \leq P \leq P_{cp}$ при условии, что $\gamma = \sigma / P_{cp} = 0,1$), где P_{cp} — среднее значение нагрузки.

Была выполнена серия расчетов для формирования модели оценки изменения потерь мощности в замкнутой сети (см. рисунок) при подключении к одному из ее узлов (непосредственно или через его распределительную сеть) источника распределенной генерации. При этом варьировались узлы подключения источников распределенной генерации, изменялись диапазоны варьирования нагрузок, применялись различные подходы к оценке дисперсии воспроизводимости и, соответственно, к последующему статистическому анализу модели.

При построении модели значимость коэффициентов уравнения регрессии проверяли, используя индекс Стьюдента t_{α, f_y} , определенный при уровне значимости α и числе степеней свободы $f_y = N(n-1)$. Статистически значимыми считались коэффициенты a_i , соответствующие условию $|a_i| > s\{a_i\} t_{\alpha, f_y}$, где $s\{a_i\} = \frac{s^2\{y\}}{nN}$, $i = 1, \dots, m$, — дисперсии коэффициентов уравнения регрессии.

Все сформированные таким образом модели оказались адекватными, что было проверено с помощью индекса Фишера F , значение которого определялось по экспериментальным данным:

$$F_3 = \frac{s_{ad}^2}{s^2\{y\}}$$

где

$$s_{ad}^2 = \frac{1}{N-L} \sum_{u=1}^N n(\bar{y}_u - \tilde{y}_u)^2;$$

\tilde{y}_u — значение функции отклика, вычисленное по уравнению регрессии; L — число значимых коэффициентов уравнения регрессии. Модель считали адекватной, если выполнялось условие $F_3 < F^T$, где F^T — табличное значение индекса Фишера, найденное при уровне значимости α и числе степеней свободы $f_1 = N-L$ и $f_2 = N(n-1)$.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы.

Во-первых, во всех рассмотренных случаях построенные модели оценки реакции питающей сети на интеграцию источников распределенной генерации были адекватными.

Во-вторых, вычисленные на основании различных подходов значения дисперсии воспроизводимости оказались одного порядка, что позволило для каждого варианта применения источника распределенной генерации сформировать идентичные модели. В частности, при размещении источника распределенной генерации в узле T1 (см. рисунок) значения дисперсии воспроизводимости составили:

при расчете согласно (3) — $s^2\{y\} = 9,307$;

при расчетах согласно (4) — $s^2\{y\} = 11,067$;

при использовании вероятностного моделирования для генерации дублирующих опытов — $s^2\{y\} = 10,23$.

Полученные результаты позволили сформировать следующую модель (уравнение регрессии):

$$\delta(\Delta P_{\Sigma}) = 61,016 + 8,858\tilde{P}_1 + 3,469\tilde{P}_2 + 2,263\tilde{P}_3 + 4,282\tilde{P}_4 + 5,575\tilde{P}_5 + 3,925\tilde{P}_6 + 1,888\tilde{P}_7 + 19,109\tilde{P}_r, \quad (5)$$

где $\tilde{P}_1, \dots, \tilde{P}_7$ и \tilde{P}_r — кодированные в соответствии с (1) значения нагрузок узлов сети и мощность генерирующего источника.

В-третьих, структура модели электрической сети в определенной мере зависит от того, в каком узле подключен источник распределенной генерации. Например, при подключении генерирующего источника в узле 4 (см. рисунок) модель, отображающая изменение потерь мощности в сети, имеет следующий вид:

$$\delta(\Delta P_{\Sigma}) = 127,849 + 5,136\tilde{P}_1 + 6,856\tilde{P}_2 + 24,567\tilde{P}_4 + 10,907\tilde{P}_5 + 6,089\tilde{P}_6 + 41,031\tilde{P}_r + 8,052\tilde{P}_1\tilde{P}_2\tilde{P}_3. \quad (6)$$

Очевидно, что модель (6) не только отличается от модели (5) по структуре, но и является нелинейной. Последнее затрудняет применение подобных моделей, например, для расчета изменения величины потерь электрической энергии с использованием значений средних нагрузок. Указанные обстоятельства обусловили целесообразность разработки альтернативных моделей для оценки реакции энергосистемы на интеграцию в ее узлах источников распределенной генерации.

Построение альтернативной модели замкнутой сети для оценки ее реакции на интеграцию источников распределенной генерации. Альтернативный подход к построению модели связан с первоначальным получением аналитического выражения для определения приращения потерь мощности в питающей сети в соответствии с характером возмущения в распределительной сети.

Нагрузки узлов замкнутой сети для произвольного момента времени (ступени графика нагрузки) представим в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{J}} = \mathbf{J}_p + j\mathbf{J}_q = \begin{pmatrix} J_{p,1} \\ \dots \\ J_{p,l} \\ \dots \\ J_{p,m} \\ \dots \\ J_{p,n} \end{pmatrix} + j \begin{pmatrix} J_{q,1} \\ \dots \\ J_{q,l} \\ \dots \\ J_{q,m} \\ \dots \\ J_{q,n} \end{pmatrix}.$$

Для данного режима потери активной мощности в сети определяем в соответствии с выражением

$$\Delta P = 3(\mathbf{J}_p^t \mathbf{R} \mathbf{J}_p + \mathbf{J}_q^t \mathbf{R} \mathbf{J}_q) 10^{-3},$$

где $\mathbf{J}_p, \mathbf{J}_q$ — вектор-столбцы токовых нагрузок узлов; t — символ транспонирования; \mathbf{R} — матрица узловых сопротивлений, обычно формируемая посредством обращения матрицы узловых проводимостей или использования коэффициентов распределения и сопротивления влияния [11].

Матрица узловых проводимостей, в общем случае, имеет вид $\mathbf{Y} = \mathbf{M} \mathbf{R}_b^{-1} \mathbf{M}^t$, где \mathbf{M} — первая матрица инцидентий, характеризующая, в определенной мере, топологию электрической сети; \mathbf{R}_b — диагональная матрица сопротивлений ветвей.

Любые возмущения в распределительной сети приводят к определенному изменению нагрузок отдельных узлов сети, т.е. $\mathbf{J}' = \mathbf{J}'_p + j\mathbf{J}'_q$. В этом случае изменение потерь мощности в замкнутой сети можно определить так:

$$\delta(\Delta P) = 3(\mathbf{J}'_p{}^t \mathbf{R} \mathbf{J}'_p + \mathbf{J}'_q{}^t \mathbf{R} \mathbf{J}'_q - \mathbf{J}_p^t \mathbf{R} \mathbf{J}_p - \mathbf{J}_q^t \mathbf{R} \mathbf{J}_q) 10^{-3}.$$

Рассмотрев частный пример (сеть с ограниченным числом узлов) и обобщив полученные результаты для общего случая, запишем выражение для оценки величины изменения потерь мощности:

$$\delta(\Delta P)_j = 3(\Delta J_{pj} + \Delta J_{qj}) \left[\left(\sum_{k=1}^n 2(J_{pk} + J_{qk}) R_{jk} \right) - (\Delta J_{pj} + J_{qj})^2 R_{jj} \right]. \quad (7)$$

Относительно высокая однородность нагрузок в узлах сети позволяет упростить выражение (7) к виду

$$\delta(\Delta P)_j = 3\Delta J_j \left[\left(\sum_{k=1}^n 2J_k R_{jk} \right) - \Delta J_j^2 R_{jj} \right], \quad (8)$$

где R_{jk} и R_{jj} — взаимные и собственные сопротивления узлов сети. Необходимо заметить, что выражение (8) в большей степени соответствует реальному информационному обеспечению, на которое можно ориентироваться при решении подобных задач. Используя формулу (8) в схеме электрической сети, представленной на рисунке, в качестве факторов можно выделить $J_1 \Delta J, J_2 \Delta J, J_3 \Delta J, J_4 \Delta J, J_5 \Delta J, J_6 \Delta J, J_7 \Delta J, \Delta J$. При этом для построения соответствующей модели целесообразно использовать ДФЭ 2^{8-4} .

Результаты выполненных расчетов для рассматриваемой схемы электрической сети свидетельствуют о том, что идентичные по структуре

линейные модели формируются при любых вариантах подключения источника распределенной генерации и реальных уровнях изменения нагрузок в узлах. В частности, при подключении источника распределенной генерации к узлу Т1 (см. рисунок) модель для оценки величины изменения потерь мощности имеет следующий вид:

$$\delta(\Delta P) = 47,93 + 3,12\tilde{x}_1 + 4,08\tilde{x}_2 + 3,18\tilde{x}_3 + 6,79\tilde{x}_4 + 2,12\tilde{x}_5 + 5,3\tilde{x}_6 + 4,76\tilde{x}_7,$$

где $x_i = J_i \Delta J$, $i = 1, \dots, 7$; \tilde{x}_i — кодированные согласно (1) значения соответствующих параметров режима сети. При этом линейность полученных моделей позволяет легко применять их для расчета изменения суточных потерь электрической энергии, используя в качестве значений факторов соответствующие средние значения нагрузок узлов.

В результате проведения серии экспериментальных расчетов с использованием полученных моделей при различных значениях исходных данных, задаваемых случайным образом, установлено, что максимальная погрешность моделирования не превышает 5,5 %. Данный результат можно считать вполне приемлемым для практического применения разработанных моделей.

Выводы

Мировой опыт свидетельствует о том, что в современном процессе развития электроэнергетики существенное значение имеет так называемая малая энергетика, связанная с активной интеграцией генерирующих источников относительно небольшой мощности в электрические сети на различных номинальных напряжениях. Не ставя под сомнение экономическую привлекательность подобных проектов в целом, конкретные решения следует принимать с учетом характера и степени влияния интегрируемых источников на комплекс технико-экономических показателей работы электрических сетей, в частности величину потерь мощности и электрической энергии. Более того, при проведении подобного анализа во многих случаях необходимо одновременно рассматривать сети нескольких номинальных напряжений. При этом для преодоления возможных ведомственных барьеров, связанных с получением необходимой оперативной режимной информации, в ряде случаев представляется целесообразным использовать предварительно сформированные эквиваленты определенных фрагментов электрических сетей.

Результаты проведенных исследований демонстрируют возможность и эффективность применения для данной цели математического аппарата факторного планирования экспериментов. Предлагаемый подход позво-

ляет наиболее эффективно сформировать модели в виде многофакторных уравнений регрессии, которые обеспечивают достаточно высокую достоверность и точность результатов при оценке приращения потерь мощности и электрической энергии в электрических сетях 110...220 кВ, при интеграции генерирующих источников в распределительные сети отдельных узлов нагрузки.

Methods of constructing equivalents of electric networks of 110 ... 220 kV in order to determine the change of power and energy losses on condition of integration of the sources of distributed generation have been proposed and tested. The mathematical apparatus of the experimental design was used to solve this problem. Evaluation trials were analyzed for the obtained models to determine their usability in computer experiments under the lack of feasibility of duplicate tests. The authors have obtained results destined for complex estimation of the effect of the sources of distributed generation connected to electrical network in different points.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peng J.C., Jiang H.* Contributions of individual generators to complex power losses and flows. Part 1: fundamental theory // IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution. — 2002. — Vol. 149, № 2. — P. 182—185.
2. *Vovos P.N., Kiprakis A.E., Wallace A.R., Harrison G.P.* Centralized and distributed voltage control: impact on distributed generation penetration // IEEE Transactions on Power Systems. — 2007. — Vol. 22, № 1. — P. 476—493.
3. *Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П.* Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // Технічна електродинаміка. — 2006. — № 6. — С. 44—51.
4. *Праховник А.В., Попов В.А., Кулік О.В.* Модель інтеграції децентралізованої генерації в енергетичну систему на найнижчому рівні ієрархії управління // Енергетика: економіка, технології, екологія. — 2006. — № 1. — С. 101—109.
5. *Адлер Ю.П., Маркова Е.А., Грановский Ю.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М. : Наука, 1976. — 278 с.
6. *Налимов В.В., Чернова Н.А.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. — М. : Наука, 1965. — 340 с.
7. *Вознесенский В.А.* Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. — М. : Статистика, 1974. — 192 с.
8. *Веников В.А., Круг Г.К., Анисимова Н.Д. и др.* Применение статистических методов факторного планирования эксперимента и расчета к оценке статистической устойчивости при учете неточности задания параметров схем и режимов электрических систем // Кибернетика и моделирование в энергетике. — М. : Наука, 1972. — С. 9—29.
9. *Киреева Э.А.* О применении теории планирования эксперимента при решении задач в системах промышленного электроснабжения // Ненормальные режимы и борьба с ними в электрических установках. — 1979. — № 3. — С. 94—99. (Саратов).
10. *Гусейнов Ф.Г., Мамедяров О.С.* Планирование эксперимента в задачах электроэнергетики. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 151 с.
11. *Холмский В.Г.* Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. — М. : Высшая школа, 1975. — 280 с.

Поступила 14.03.13

ЖАРКИН Андрей Федорович, чл.-кор. НАН Украины, зам. директора Ин-та электродинамики НАН Украины. В 1977 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — вопросы повышения качества электрической энергии и эффективности ее использования в системах электроснабжения, разработка методов анализа электрических сетей с нелинейными и нестационарными нагрузками, разработка теоретических основ построения информационно-измерительных систем мониторинга качества электрической энергии и новых подходов к обеспечению электромагнитной совместимости.

ПОПОВ Владимир Андреевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения Ин-та энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «КПИ». В 1974 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — моделирование и оптимизация систем электроснабжения; учет неопределенности исходной информации при управлении режимами электрических сетей интегрированных систем электроснабжения.

ТКАЧЕНКО Вадим Владиславович, ст. преподаватель кафедры электроснабжения Ин-та энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «КПИ». В 1987 г. окончил Киевский политехнический ин-т, а в 2002 г. — Национальный технический университет Украины «КПИ». Область научных исследований — моделирование и оптимизация надежности распределительных электрических сетей; информационное обеспечение задач моделирования и управления режимами систем электроснабжения.

САИД БАНУЗАДЕ САХРАГАРД, аспирант кафедры электроснабжения Ин-та энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «КПИ», который окончил в 2010 г. Область научных исследований — моделирование режимов электрических сетей с источниками распределенной генерации.

