УДК 621.311

ОРТОГОНАЛЬНОЕ ЦЕНТРАЛЬНОЕ КОМПОЗИЦИОННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ УСКОРЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ РЕЖИМОВ В БОЛЬШИХ ЭЭС

Акад. Академии электротехнических наук РФ и Международной Академии информатизации, засл. деят. науки и техники РФ, докт. техн. наук, проф. ГЕРАСКИН О. Т.

Институт повышения квалификации государственных служащих Российской академии государственной службы при Президенте Российской Федерации

В теории больших электроэнергетических систем установившиеся режимы математически описываются с помощью систем нелинейных уравнений в виде небалансов токов в узлах подсистем и небалансов напряжений в обобщенных контурах схемы БЭЭС [1]. Для решения Y-диакоптической формы уравнений режимов может быть применен итерационный метод Гаусса–Зейделя с введением коэффициентов ускорения в вычислительный процесс [2]. В работах [3–5] показано, что для выбора оптимальных коэффициентов ускорения можно эффективно использовать технику планирования эксперимента.

В данной статье оптимальные коэффициенты ускорения определяются на основе применения ортогонального центрального композиционного планирования эксперимента. При реализации плана ОЦКП общее число опытов меньше, чем при использовании планов общего вида, полного факторного эксперимента на трех уровнях ПФЭ 3^{k_0} и ротатабельного центрального композиционного плана РЦКП. Особенности структуры исходного плана ОЦКП позволяют упростить методику проведения эксперимента и обработку полученных опытных данных на ЭВМ.

1. Общая методика планирования эксперимента для выбора оптимальных коэффициентов ускорения при расчетах режимов БЭЭС. Методика предполагает выполнение следующих основных этапов:

выбор исходного плана и реализацию эксперимента;

выбор математической модели и определение ее коэффициентов;

проверку модели на адекватность;

вычисление оптимальных коэффициентов ускорения по модели методом минимизации целевой функции.

В качестве исходного при решении данной задачи выбирается план типа ОЦКП. Его реализация предполагает, что в заданной области факторного пространства, определяемой граничными значениями изменения факторов $\mathbf{X}_г$, формируется матрица плана эксперимента $\mathbf{X}$, содержащая N_0 строк, и для каждой i-й строки матрицы выполняется опыт, т. е. рассчитывается установившийся режим БЭЭС и определяется экспериментальное значение целевой функции $Y_{эi}$. После окончания эксперимента получается матрица $\mathbf{Y}_э$.

В качестве математической модели для решения данной задачи выбирается полная квадратичная математическая модель, которая устанавливает аналитическую зависимость целевой функции от параметров,

$$Y_т = f(x_1 ,..., x_k^0). \tag{1}$$

Для определения коэффициентов математической модели формируется нормальная система линейных уравнений вида

$$\alpha\mathbf{b} = \mathbf{c}, \tag{2}$$

где α – информационная матрица Фишера;

b – матрица правых частей уравнений;

c – то же, искомых коэффициентов математической модели.

Информационная матрица Фишера и матрица правых частей уравнений определяются по матричным выражениям:

$$\alpha = \mathbf{f}_t\mathbf{f}; \tag{3}$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{f}_t\mathbf{Y}_э, \tag{4}$$

где **f** – матрица независимых регрессионных функций, которая может быть построена на основе нормированной матрицы исходного плана $\boldsymbol{x}$ в соответствии со структурой регрессионных функций, входящих в математическую модель.

Искомые коэффициенты модели **b** находятся из решения СЛУ (2).

Проверка математической модели на адекватность производится путем сопоставления экспериментальных и теоретических значений целевой функции $Y_{эi}$ и $Y_{тi}$.

После того как математическая модель построена и проверена на адекватность, определяются искомые оптимальные параметры – моменты ввода в итерационный вычислительный процесс коэффициентов ускорения по напряжению n_U* и току n_I* и величины коэффициентов ускорения k_U* и k_I*. Оптимальные параметры вычисляются как в нормированном виде $\boldsymbol{x}$*, так и в именованных единицах $\mathbf{x}$*, и в этой точке определяются оптимальные теоретические и экспериментальные значения целевой функции $Y_т$* и $Y_э$*. Величина $Y_т$* рассчитывается с помощью математической модели, а $Y_э$* определяется опытным путем из расчета установившегося режима БЭЭС.

Оптимальные параметры $\boldsymbol{x}$* вычисляются из решения системы линейных уравнений, которая формируется на основе полученных коэффициентов математической модели **b** и имеет вид

$$\mathbf{h}\boldsymbol{x}^* = -\,\mathbf{g}, \tag{5}$$

где **h** – матрица Гессе;

g – градиент целевой функции.

Далее по математической модели вычисляется оптимальное теоретическое значение функции $Y_т{}^*$, точка x^* денормируется $x^* \to \mathbf{x}^*$ и из расчета режима определяется $Y_э{}^*$. Адекватность математической модели проверяется в оптимальной точке путем сопоставления величин $Y_э{}^*$ и $Y_т{}^*$.

Таким образом, общая методика определения оптимальных коэффициентов ускорения требует формирования и решения нормальной системы линейных уравнений. Эта методика может быть значительно упрощена, если при планировании эксперимента использовать специальный план второго порядка – ортогональный центральный композиционный план.

2. Планирование эксперимента по схеме ОЦКП. При ортогональном центральном композиционном планировании эксперимента матрица исходного плана **X** включает три части: план полного факторного эксперимента на двух уровнях типа ПФЭ 2^{k_0}, план, составленный из $2k_0$ опытов в звездных точках факторного пространства, расположенных на осях координат на некотором расстоянии от центра плана, и центральную точку плана.

Матрица исходного плана **X** при выполнении эксперимента воспроизводится по строкам, для каждой строки выполняется опыт, т. е. расчет установившегося режима БЭЭС, и определяется экспериментальное значение функции $Y_{эi}$. После окончания эксперимента имеем матрицу $\mathbf{Y}_э$.

Нормированная матрица исходного плана ОЦКП имеет вид

$$x=\begin{array}{|c|}\hline x_{\text{ПФЭ}\ 2^{k_0}}\\\hline x_\alpha\\\hline \mathbf{0}\\\hline\end{array} = \begin{array}{|cccc|l}
\multicolumn{4}{c}{k_0} & \\ \hline
-1 & -1 & \dots & -1 & \\
1 & -1 & \dots & -1 & \\
-1 & 1 & \dots & -1 & \\
1 & 1 & \dots & -1 & \\
\dots & \dots & \dots & \dots & N_1 \\
-1 & 1 & \dots & 1 & \\
1 & 1 & \dots & 1 & \\ \hline
-\alpha & 0 & \dots & 0 & \\
\alpha & 0 & \dots & 0 & \\
0 & -\alpha & \dots & 0 & \\
0 & \alpha & \dots & 0 & \\
\dots & \dots & \dots & \dots & N_\alpha \\
0 & 0 & \dots & -\alpha & \\
0 & 0 & \dots & \alpha & \\ \hline
0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ \hline
\end{array}, \qquad (6)$$

где N_1 – число точек полного факторного эксперимента на двух уровнях,

$$N_1 = 2^{k_0}, \qquad (7)$$

при числе факторов $k_0 = 4$ получим $N_1 = 16$;
N_α – число звездных точек,

$$N_\alpha = 2k_0, \qquad (8)$$

при $k_0 = 4$ получим $N_\alpha = 8$.

Общее число опытов N_0 при планировании эксперимента по схеме ОЦКП равно

$$N_0 = N_1 + N_\alpha + 1, \tag{9}$$

при $k_0 = 4$ имеем $N_0 = 25$.

Величина звездного плеча α определяется из условия ортогонализации матрицы независимых регрессионных функций **f** и может быть вычислена из уравнения

$$\alpha^2 = (\sqrt{N_1 N_0} - N_1)/2, \tag{10}$$

при $k_0 = 4$ имеем $\alpha = \sqrt{2}$.

При использовании плана ОЦКП и полной квадратичной математической модели матрица независимых регрессионных функций **f** и информационная матрица Фишера α соответственно равны:

$$\mathbf{f} = \begin{array}{cccc|l} 1 & k_0 & k_0(k_0-1)/2 & k_0 & \\ \hline \mathbf{1} & x_{ij} & (x_{i\,2j-1}\, x_{i\,2j}) & \mathbf{1}\,\mathbf{1}_t & N_1 \\ \mathbf{1} & \boldsymbol{x}_\alpha & \mathbf{0} & \mathbf{M} & N_\alpha \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 \end{array}; \tag{11}$$

$$\alpha = \begin{array}{cccc|l} 1 & k_0 & k_0(k_0-1)/2 & k_0 & \\ \hline N_0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & (N_1+2\alpha^2)\,\mathbf{1}_t & 1 \\ \mathbf{0} & (N_1+2\alpha^2)\mathbf{1}_д & \mathbf{0} & \mathbf{0} & k_0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & N_1\,\mathbf{1}_д & \mathbf{0} & k_0(k_0-1)/2 \\ (N_1+2\alpha^2)\,\mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & N_1\,\mathbf{1}\,\mathbf{1}_t + 2\alpha^4\,\mathbf{1}_д & k_0 \end{array}, \tag{12}$$

где **M** – прямоугольная подматрица от матрицы **f**, имеющая порядок $(N_\alpha \times k_0)$,

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_j, \qquad j = 1, \ldots, k_0. \tag{13}$$

Столбцы этой подматрицы, соответствующие независимым регрессионным функциям x_j^2, имеют следующую структуру:

$$\mathbf{M}_j = \begin{array}{c|l} x_j^2 & \\ \hline 0 & N_1 + 1 \\ \ldots & \ldots \\ 0 & \\ \alpha^2 & N_1 + 2j - 1 \\ \alpha^2 & N_1 + 2j \\ 0 & \\ \ldots & \ldots \\ 0 & N_1 + N_\alpha \end{array}. \tag{14}$$

Информационная матрица Фишера α в таком виде не является диагональной, и оценки коэффициентов при квадратичных членах математической модели не могут быть вычислены независимо. Для того чтобы получить независимые оценки всех коэффициентов математической модели, необходимо произвести ортогонализацию матрицы независимых регрессионных функций **f**.

Для этого производится замена переменной b_1 в математической модели, и выбор величины звездного плеча α определяется из уравнения (10). В результате такого преобразования информационная матрица Фишера становится диагональной [6]

$$\alpha = \begin{array}{c} \\ \end{array}\begin{array}{cccc} 1 & k_0 & k_0(k_0-1)/2 & k_0 \\ \end{array}$$

$$\alpha = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline N_0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & (N_1+2\alpha^2)\mathbf{1}_{\text{д}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & N_1\,\mathbf{1}_{\text{д}} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 2\alpha^4\,\mathbf{1}_{\text{д}} \\ \hline \end{array} \begin{array}{c} 1 \\ k_0 \\ k_0(k_0-1)/2 \\ k_0 \end{array} . \quad (15)$$

Отсюда независимые оценки коэффициентов полной квадратичной математической модели при планировании эксперимента по схеме ОЦКП могут быть получены по следующим выражениям:

$$b_j = A_6 - A_2 \sum_{i=1}^{k_0} b_{1+k_0+(k_0-1)/2+i}, \quad j = 1; \quad (16)$$

$$b_{1+j} = A_4 \Big[\sum_{v=1}^{N_1} (x_{vj}\ Y_{\text{э}_v}) + \alpha\,(-Y_{\text{э}_{2j+N_1-1}} + Y_{\text{э}_{2j+N_1}}) \Big], \quad j = 1, \ldots, k_0; \quad (17)$$

$$b_{1+k_0+j} = A_5 \Big[\sum_{v=1}^{N_1} (x_{vn_{2j-1}}\, x_{vn_{2j}}\, Y_{\text{э}_v}), \quad j = 1, \ldots, k_0(k_0-1)/2; \quad (18)$$

$$b_{1+k_0+k_0(k_0-1)/2+j} = A_3\,(Y_{\text{э}_{2j+N_1-1}} + Y_{\text{э}_{2j+N_1}}) - A_7, \quad j = 1, \ldots, k_0, \quad (19)$$

где константы A_i и величины S_i, зависящие от значений функции $Y_{\text{э}i}$, соответственно равны:

$$A_1 = 1/N_0; \quad A_2 = (N_1 + 2\alpha^2)A_1; \quad A_3 = 1/(2\alpha^2);$$

$$A_4 = 1/(N_1 + 2\alpha^2); \quad A_5 = 1/N_1; \quad A_6 = S\,A_1;$$

$$A_7 = (S\,A_2 - S_1)/(2\alpha^4);$$

$$S_1 = \sum_{i=1}^{N_1} Y_{\text{э}_i}; \qquad S = S_1 + \sum_{i=N_1+1}^{N_0} Y_{\text{э}_i}. \quad (20)$$

Учитывая большую разреженность и строгую упорядоченную последовательность ненулевых элементов -1 и $+1$ в нормированной матрице исходного плана ОЦКП, ядром которого является матрица полного факторного эксперимента на двух уровнях типа ПФЭ 2^{k_0}, и соответственно в матрице независимых регрессионных функций, можно так построить вычислительный процесс расчета коэффициентов математической модели, что в выражениях (17) и (18) будут исключены все операции умножения на нулевые элементы, а операции умножения величин $Y_{эv}$ на ненулевые элементы −1 и +1 заменены на операции вычитания и сложения экспериментальных значений целевой функции. Таким образом, при расчете коэффициентов математической модели все вычисления будут сведены к операциям только с элементами столбцовой матрицы $\mathbf{Y}_э$.

Аналитические выражения для расчета коэффициентов математической модели получают следующий вид:

$$b_j = A_6 - A_2 \sum_{i=1}^{k_0} b_{1+k_0+(k_0-1)/2+i}, \quad j = 1; \tag{21}$$

$$b_{1+j} = A_4 \Big[\sum_{v=1}^{2^{(k_0-j)}} \sum_{i=1}^{2^{(j-1)}} (-Y_{э_{(v-1)2^j+i}} + Y_{э_{(v-1)2^j+i+2^{(j-1)}}}) +$$

$$+ \alpha\,(-Y_{э_{2j+N_1-1}} + Y_{э_{2j+N_1}}) \Big], \quad j = 1, \ldots, k_0; \tag{22}$$

$$b_{1+k_0+j} = A_5 \Big[\sum_{m=1}^{2^{(k_0-n_{2j})}} \sum_{v=1}^{2^{(n_{2j}-n_{2j-1}-1)}} \sum_{i=1}^{2^{(n_{2j-1}-1)}} (Y_{э_{(m-1)2^{n_{2j}}+(v-1)2^{n_{2j-1}}+i}} -$$

$$- Y_{э_{(m-1)2^{n_{2j}}+(v-1)2^{n_{2j-1}}+i+2^{(n_{2j-1}-1)}}} - Y_{э_{(m-1)2^{n_{2j}}+(v-1)2^{n_{2j-1}}+i+2^{(n_{2j}-1)}}} +$$

$$+ Y_{э_{(m-1)2^{n_{2j}}+(k-1)2^{n_{2j-1}}+i+2^{(n_{2j}-1)}+2^{(n_{2j-1}-1)}}})\Big], j = 1, \ldots, k_0(k_0-1)/2; \tag{23}$$

$$b_{1+k_0+k_0(k_0-1)/2+j} = A_3\,(Y_{э_{2j+N_1-1}} + Y_{э_{2j+N_1}}) - A_7, \; j = 1, \ldots, k_0. \tag{24}$$

3. Пример расчета. Схема БЭЭС показана на рис. 1.

Схема содержит три радиально связанные подсистемы и две ветви деления (2–5) и (6–9). Подсистема 1 включает четыре ветви (11–1), (11–2), (1–3) и (2–3); подсистема 2 включает также четыре ветви (11–8), (11–9), (8–10) и (9–10) и подсистема 3 – пять ветвей (11–4), (4–5), (4–6), (5–7) и (6–7).

При решении данной задачи рассматриваются следующие параметры оптимизации X_i: номера итераций n_U и n_I, начиная с которых в итерационный вычислительный процесс расчета режима БЭЭС вводятся коэффициенты ускорения, и величины коэффициентов ускорения по напряжению k_U и току k_I.

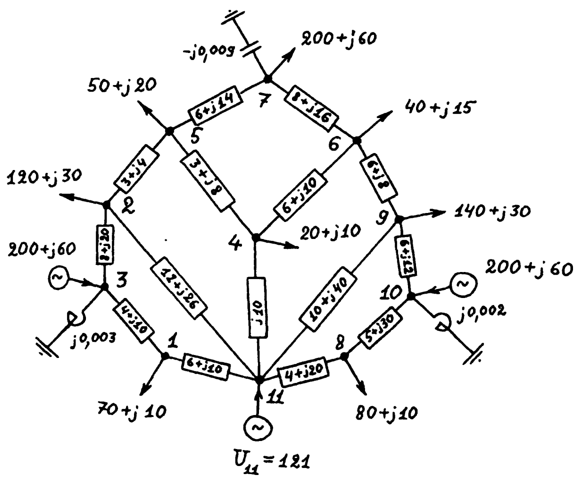

Рис. 1

При реализации эксперимента расчеты режимов проводились с заданной точностью по небалансам мощностей в узлах схемы, равной 0,1 МВт (Мвар).

Напряжение в базисном узле 11 схемы БЭЭС задано:

$$U_{11}' = 121 \text{ кВ}; \quad U_{11}'' = 0.$$

В качестве начального приближения принимались следующие напряжения в узлах и токи в ветвях деления:

$$U_1' = U_2' = U_4' = \ldots = U_9' = 110 \text{ кВ}; \qquad U_3' = U_{10}' = 115 \text{ кВ};$$

$$U_1'' = U_2'' = \ldots = U_{10}'' = 0;$$

$$I_{(2-5)}' = I_{(6-9)}' = 0\ ; \qquad I_{(2-5)}'' = I_{(6-9)}'' = 0.$$

Матрица граничных значений изменения факторов задана

$$\mathbf{X}_\text{г} = \begin{vmatrix} \mathbf{X}_{\text{г}\min} \\ \mathbf{X}_{\text{г}\max} \end{vmatrix} = \begin{array}{cccc} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \\ \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 4 & 4 & 1{,}4 & 1{,}2 \\ \hline 8 & 8 & 1{,}6 & 1{,}6 \\ \hline \end{array} \end{array}.$$

Ниже приведены матрица исходного плана **X** в именованных единицах при планировании эксперимента по схеме ОЦКП, матрица экспериментальных значений целевой функции $\mathbf{Y}_\text{э}$, измеряемых количеством итераций при расчетах режимов БЭЭС, и матрица теоретических значений целевой функции $\mathbf{Y}_\text{т}$, рассчитываемых по математической модели и округленных до целого числа,

$$
\mathbf{X} = \left|\begin{array}{cccc}
4 & 4 & 1,4 & 1,2 \\
8 & 4 & 1,4 & 1,2 \\
4 & 8 & 1,4 & 1,2 \\
8 & 8 & 1,4 & 1,2 \\
4 & 4 & 1,6 & 1,2 \\
8 & 4 & 1,6 & 1,2 \\
4 & 8 & 1,6 & 1,2 \\
8 & 8 & 1,6 & 1,2 \\
4 & 4 & 1,4 & 1,6 \\
8 & 4 & 1,4 & 1,6 \\
4 & 8 & 1,4 & 1,6 \\
8 & 8 & 1,4 & 1,6 \\
4 & 4 & 1,6 & 1,6 \\
8 & 4 & 1,6 & 1,6 \\
4 & 8 & 1,6 & 1,6 \\
8 & 8 & 1,6 & 1,6 \\
\hline
3,172 & 6 & 1,5 & 1,4 \\
8,828 & 6 & 1,5 & 1,4 \\
6 & 3,172 & 1,5 & 1,4 \\
6 & 8,828 & 1,5 & 1,4 \\
6 & 6 & 1,359 & 1,4 \\
6 & 6 & 1,641 & 1,4 \\
6 & 6 & 1,5 & 1,117 \\
6 & 6 & 1,5 & 1,683 \\
\hline
6 & 6 & 1,5 & 1,4
\end{array}\right|; \quad
\mathbf{Y}_э = \left|\begin{array}{c}
21 \\ 23 \\ 21 \\ 23 \\ 23 \\ 24 \\ 23 \\ 24 \\ 22 \\ 23 \\ 21 \\ 23 \\ 23 \\ 25 \\ 23 \\ 25 \\
\hline
18 \\ 21 \\ 19 \\ 19 \\ 23 \\ 28 \\ 19 \\ 21 \\
\hline
19
\end{array}\right|; \quad
\mathbf{Y}_т = \left|\begin{array}{c}
21 \\ 23 \\ 21 \\ 23 \\ 23 \\ 24 \\ 23 \\ 24 \\ 21 \\ 23 \\ 21 \\ 23 \\ 24 \\ 25 \\ 23 \\ 25 \\
\hline
18 \\ 20 \\ 19 \\ 19 \\ 24 \\ 27 \\ 20 \\ 20 \\
\hline
19
\end{array}\right|.
$$

С помощью полученных экспериментальных данных по аналитическим выражениям были рассчитаны коэффициенты модели.

Математическая модель имеет следующий вид:

$$
Y_т = 19{,}04 + 0{,}862\,x_1 - 0{,}05\,x_2 + 1{,}004\,x_3 + 0{,}291\,x_4 + 0{,}0625\,x_1 x_2 -
$$

$$
- 0{,}0625\,x_1 x_3 + 0{,}0625\,x_1 x_4 + 0{,}0625\,x_2 x_3 - 0{,}0625\,x_2 x_4 +
$$

$$
+ 0{,}0625\,x_3 x_4 + 0{,}225\,x_1^2 - 0{,}025\,x_2^2 + 3{,}225\,x_3^2 + 0{,}475\,x_4^2.
$$

Математическая модель является адекватной, так как экспериментальные значения целевой функции $Y_{эi}$ мало отличаются от расчетных значений функции $Y_{тi}$.

На основе модели были найдены оптимальные параметры $\boldsymbol{x}^*$, вектор денормирован $\boldsymbol{x}^* \to \mathbf{x}^*$, и первые два компонента вектора округлены до целого числа. В полученной точке $\mathbf{x}^*$ произведен расчет установившегося режима БЭЭС и найдено оптимальное экспериментальное значение целевой функции $Y_э^*$. В этой же точке по математической модели рассчитано оптимальное теоретическое значение функции $Y_т^*$ и оно округлено до целого числа.

Система линейных уравнений, составленная на основе математической модели для определения оптимальной точки $\boldsymbol{x}^*$, имеет вид

$$
\begin{array}{|c|c|c|c|}
\hline
0{,}450 & 0{,}0625 & -0{,}0625 & 0{,}0625 \\
\hline
0{,}0625 & -0{,}050 & 0{,}0625 & -0{,}0625 \\
\hline
-0{,}0625 & 0{,}0625 & 6{,}450 & 0{,}0625 \\
\hline
0{,}0625 & -0{,}0625 & 0{,}0625 & 0{,}950 \\
\hline
\end{array}
\;
\begin{array}{|c|}
\hline
x_1^* \\ \hline x_2^* \\ \hline x_3^* \\ \hline x_4^* \\ \hline
\end{array}
=
\begin{array}{|c|}
\hline
0{,}862 \\ \hline -0{,}05 \\ \hline 1{,}004 \\ \hline 0{,}291 \\ \hline
\end{array}\,.
$$

Откуда имеем

$$\mathbf{x}^* = \begin{array}{|c|}\hline -1{,}521 \\ \hline -2{,}616 \\ \hline -0{,}141 \\ \hline -0{,}370 \\ \hline \end{array}\,; \qquad \mathbf{x}^* = \begin{array}{|c|}\hline 3 \\ \hline 1 \\ \hline 1{,}486 \\ \hline 1{,}326 \\ \hline \end{array}\,;$$

$$Y_э^* = 18\,; \qquad Y_т^* = 18.$$

Математическая модель адекватна в оптимальной точке, так как экспериментальное значение целевой функции не отличается от расчетного.

Таким образом, оптимальные коэффициенты ускорения и моменты ввода их в итерационный вычислительный процесс соответственно равны:

$$n_U^* = 3; \qquad n_I^* = 1; \qquad k_U^* = 1{,}486; \qquad k_I^* = 1{,}326.$$

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика построения математической модели полиномиального типа на основе ортогонального центрального композиционного планирования эксперимента для выбора оптимальных коэффициентов ускорения и моментов ввода их в вычислительный процесс при решении задачи расчета установившихся режимов в БЭЭС итерационным методом Гаусса–Зейделя.

2. В качестве уравнения регрессии выбрана полная квадратичная математическая модель, и эксперимент реализован по плану ОЦКП в точках полного факторного эксперимента на двух уровнях ПФЭ 2^{k_0}, в звездных точках факторного пространства и центральной точке плана. Выведены аналитические выражения для расчета коэффициентов математической модели без формирования и решения нормальной системы линейных уравнений, что в значительной степени упрощает обработку опытных данных эксперимента на ЭВМ.

3. Полученные результаты повышают эффективность расчета установившихся режимов больших электроэнергетических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гераскин О. Т. Основы теории и методов расчета режимов больших электроэнергетических систем. — М.: ИПКгосслужбы, 1996. — 166 с.

2. Гераскин О. Т., Селеннова Т. Г., Масин Е. М. Решение уравнений установившихся режимов больших ЭЭС в Y-диакоптической форме итерационным методом Гаусса—Зейделя на многопроцессорных ЭВМ // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1996. — № 7—8. — С. 3—8.

3. Гераскин О. Т., Селеннова Т. Г. К вопросу об ускорении решения уравнений установившихся режимов больших ЭЭС в Y-диакоптической форме итерационным методом Гаусса—Зейделя // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1996. — № 9—10. — С. 3—11.

4. Гераскин О. Т., Селеннова Т. Г. Планирование эксперимента по схеме 3^{k_0} для выбора оптимальных коэффициентов ускорения при расчетах режимов больших ЭЭС итерационным методом Гаусса—Зейделя // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1997. — № 1—2. — С. 3—8.

5. Г е р а с к и н О. Т. Ротатабельное центральное композиционное планирование для выбора коэффициентов ускорения при расчетах режимов в больших ЭЭС // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1999. — № 1. — С. 3—11.
6. Г е р а с к и н О. Т. Математические модели для задач управления режимами электроэнергетических систем. — М.: ВИПКэнерго, 1983. — 74 с.

Представлена кафедрой
эксплуатации электрических станций,
сетей и систем

Поступила 5.10.1999

УДК 621.3.066.6

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПЛОСКИХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Докт. техн. наук, проф. ГЕРАСИМОВИЧ А. Н.,
инж. ГЕРАСИМОВИЧ Д. А.

Белорусская государственная политехническая академия

Инж. ЯКОВЛЕВ Г. В.

ПО «Витебскэнерго»

Канд. техн. наук МИШКИНА М. А., инж. ЕЖЕНКОВ Г. Г.

НИЛ упрочняющих технологий при БГПА

Плоские контакты являются составной частью полосовых шин, ошиновки распределительных устройств и электрических аппаратов. Существует значительное число работ, связанных с исследованиями выполнения контактных соединений, изменением их состояния, контролем качества и испытаниями [1—6]. Анализ электрических процессов в них базируется на решении уравнения электрического потенциала для торцевых контактов при протекании постоянного тока и введения понятия переходного сопротивления [3—5]. Однако, как отмечается в [2], не все физические явления между контактирующими проводниками до конца исследованы и объяснены.

Создание высоконадежных соединений требует знания характеристик протекающих в них электромагнитных процессов, что обусловливает необходимость разработки более совершенной теории электрических контактов. Некоторые результаты расчета токов в проводниках плоского контактного соединения и характера их распределения по площади касания получены в [6—8]. В качестве математической модели при этом использованы потенциальное поле и аппарат конформных отображений, как в [6], или дифференциальные уравнения для электрической цепи с распределенными параметрами, как в [7, 8]. При таком подходе игнорируется ряд важных факторов: частота тока, магнитные