

ИНТЕРВАЛЬНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ

Представлены результаты исследований, направленных на создание нового метода расчета установившихся режимов сложных электроэнергетических систем. Предлагаемый метод отличается от известных использованием фазных координат и учетом неопределенности исходных данных на основе интервального анализа. Компьютерные эксперименты показали применимость разработанного метода для решения практических задач определения установившихся режимов электроэнергетических систем в условиях неопределенности исходной информации.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, установившиеся режимы, интервальный метод расчета

Введение. Для корректного анализа сложных технических систем требуются математические модели, учитывающие неопределенность исходных данных (ИД). Одним из эффективных средств учета неопределенности являются методы интервального анализа, которые требуют минимального количества информации об исследуемой системе [1...5]. Особенность этих методов состоит во множественном представлении оценок параметров модели, построенной по результатам эксперимента, в котором выходные переменные получены в интервальном виде. Проблема неопределенности ИД в полной мере относится к электроэнергетическим системам (ЭЭС). Параметры элементов ЭЭС в подавляющем большинстве случаев определяются по паспортным, проектным или справочным данным, основываясь на значительном количестве допущений, и считаются неизменными или слабо меняющимися. В то же время известно, что параметры линий электропередачи, трансформаторов, реакторов (особенно управляемых), средств компенсации реактивной мощности и др. зависят от многих факторов и могут претерпевать ощутимые изменения в процессе эксплуатации.

В статье рассматриваются вопросы применения методов интервального анализа для расчетов установившихся режи-

мов ЭЭС. Впервые задача применения интервального анализа к расчету режимов ЭЭС сформулирована и решена применительно к радиальной сети в работе [6]. В отличие от работы [6], в которой предлагается методика интервального расчета режимов в однолинейной постановке, авторами настоящей статьи предлагается более общий подход, основанный на использовании фазных координат и применимый для определения как симметричных, так и несимметричных режимов, а также задач анализа электромагнитной совместимости и безопасности [7].

Интервальный анализ – это математическая дисциплина, предметом которой является решение задач с интервальными неопределенностями в данных, возникающими в постановке задачи или на промежуточных стадиях процесса решения. Интервальный анализ характеризуется рассмотрением множеств неопределенности как самостоятельных целостных объектов посредством определения над ними арифметических и аналитических операций и отношений [1...5].

Интервальная арифметика. Интервалом называется замкнутый отрезок вещественной оси, а интервальная неопределенность – состояние неполного знания об интересующей величине, когда известна лишь ее принадлежность некото-

* - автор, с которым следует вести переписку.

рому интервалу [4]. Под интервальным числом $[a]$ (или интервалом) понимают вещественный отрезок $[\underline{a}, \bar{a}]$, где $\underline{a} \leq \bar{a}$. Множество интервальных чисел можно обозначить через $I(\mathbf{R})$, где \mathbf{R} – множество действительных чисел. При $\bar{a} = \underline{a} = a$ интервальное число $[a]$ можно отождествлять с вещественным числом a .

Ширина $[a]$ – это величина $wid[a] = \bar{a} - \underline{a}$, а середина – полусумма $med[a] = \frac{(\underline{a} + \bar{a})}{2}$. Арифметические операции над интервалами вводятся следующим образом¹ [4]

$$\begin{aligned} [a] + [b] &= [\underline{a}, \bar{a}] + [\underline{b}, \bar{b}] = [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}]; \\ [a] - [b] &= [\underline{a}, \bar{a}] - [\underline{b}, \bar{b}] = [\underline{a} - \bar{b}, \bar{a} - \underline{b}]; \\ [a] \cdot [b] &= [\underline{a}, \bar{a}] \cdot [\underline{b}, \bar{b}] = \\ &= [\min(\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}), \max(\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b})]; \end{aligned}$$

$$[a]/[b] = [\underline{a}, \bar{a}]/[\underline{b}, \bar{b}] = [\underline{a}, \bar{a}] \cdot \left[\frac{1}{\bar{b}}, \frac{1}{\underline{b}} \right];$$

$0 \notin [\underline{b}, \bar{b}].$

Если $[a]$ и $[b]$ вырождаются в вещественные числа, то эти равенства совпадают с обычными арифметическими операциями. Если $r(x)$ – непрерывная унарная операция на \mathbf{R} , то [2]

$$r[x] = \left[\min r(x), \max r(x) \right]$$

определяет соответствующую ей операцию на $I(\mathbf{R})$. Примерами таких унарных операций могут служить $\exp[x], \ln[x], \sin[x], \dots$ Интервальная матрица $\langle \mathbf{A} \rangle$ размерностью $n \times n$ представляет собой матрицу с элементами $[a_{ij}] = [\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]$, $i, j = 1 \dots n$. Аналогичным образом обозначаются интервальные векторы, т.е. матрицы размерностью $n \times 1$ и $1 \times n$. Введенные операции распространяются и на случай, когда \bar{a}, \underline{a} являются комплексными числами. При этом мно-

жество интервальных комплексных чисел можно обозначить через $I(\mathbf{C})$,

Интервальное моделирование ЭЭС в фазных координатах. Линии электропередачи разных типов представляют собой статические многопроводные элементы (СМЭ) из нескольких проводов или обмоток, обладающих взаимной электромагнитной связью. Если вынести соединения этих проводов (обмоток) за пределы рассматриваемого СМЭ, то линии будут отличаться друг от друга только характером взаимоиндуктивной связи между проводами. В работе [7] предложена эффективная методика моделирования СМЭ в фазных координатах, основанная на использовании решетчатых схем из RLC-элементов, соединенных по схеме полного графа. На основе этой методики может быть реализована компьютерная технология интервального моделирования СМЭ в фазных координатах, описанная ниже.

На первом этапе моделирования интервальная матрица проводимостей, используемая для получения решетчатой схемы СМЭ с интервальным представлением параметров, формируется без учета фактического соединения отдельных проводов или обмоток на основе следующего матричного преобразования

$$\langle \mathbf{Y}_{PC} \rangle = \mathbf{M}_0 \langle \mathbf{Z} \rangle^{-1} \mathbf{M}_0^T = \begin{bmatrix} \langle \mathbf{D} \rangle & -\langle \mathbf{D} \rangle \\ -\langle \mathbf{D} \rangle & \langle \mathbf{D} \rangle \end{bmatrix},$$

где $\langle \mathbf{Y}_{PC} \rangle$ – матрица размерностью $n = 2r \times 2r$

$$\langle \mathbf{Z} \rangle = \langle \mathbf{Z} \rangle = \begin{bmatrix} [\underline{z}_{11}] & [\underline{z}_{12}] & \dots & [\underline{z}_{1r}] \\ [\underline{z}_{21}] & [\underline{z}_{22}] & \dots & [\underline{z}_{2r}] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ [\underline{z}_{r1}] & [\underline{z}_{r2}] & \dots & [\underline{z}_{rr}] \end{bmatrix} - \text{ин-}$$

тервально заданная матрица сопротивлений элемента размерностью $r \times r$, учитывающая взаимные индуктивные связи между проводами; $[\underline{z}_{ik}] = [\underline{z}_{ki}]$;

$\langle \mathbf{D} \rangle = \langle \mathbf{Z} \rangle^{-1}$; r – число проводов элемента без учета их соединения; \mathbf{M}_0 – топологи-

¹ При делении интервал $b = [\underline{b}, \bar{b}]$ не должен содержать ноль.

ческая матрица, определяемая на основе соотношения $\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_r \\ -\mathbf{E}_r \end{bmatrix}$, \mathbf{E}_r – единичная матрица размерностью $r \times r$.

Элементы матрицы $\langle \mathbf{Z} \rangle$ применительно к многопроводным линиям электропередачи (ЛЭП) определяются по следующей методике [7]. Собственные сопротивления $[z_{kk}]$ проводов определяются на основе замещения земли обратным проводом. При этом сопротивление представляется в виде суммы

$$[z_{kk}] = [z_H] + [z_V],$$

где $[z_H]$, $[z_V]$ – соответственно внешнее и внутреннее сопротивления. Сопротивление $[z_H]$ вычисляется по формуле

$$[z_H] = \frac{\omega \mu_0}{8} + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.85}{[r] \sqrt{[\gamma]} \omega \mu_0},$$

Ом/м,

где ω – круговая частота, 1/с; μ_0 – магнитная постоянная; $[r]$ – эквивалентный радиус провода, определяемый с погрешностью в 1...2 %, м; $[\gamma]$ – удельная проводимость земли, которая может быть подвержена значительным сезонным изменениям, См/м. Кроме того, на практике часто отсутствуют достоверные экспериментальные данные о величине γ .

Внутреннее сопротивление различно для разных типов проводов. При сталеалюминиевых проводах используются аппроксимирующие зависимости

$$\text{Re}([z_V]) = [R_0] (0.9 + 0.0063 f^{0.755}), \text{ Ом/км};$$

$$\text{Im}([z_V]) = 0.001 [(0.033 - 0.00107 f^{0.83}) [F] + (1.07 f^{0.83} - 13.5)] \text{ Ом/км},$$

где $[R_0]$ – омическое сопротивление 1 км провода, требующее интервальной оценки, так как зависит от случайной температуры окружающей среды; $f=50$ – частота, Гц; F – площадь поперечного сечения провода, которая может определяться с

погрешностью, так же, как и радиус провода, мм².

Сопротивление взаимоиндуктивной связи $[z_{ij}]$ между парой проводов определяется по следующим соотношениям:

$$[z_{ij}] = \frac{\omega \mu_0}{8} + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.85}{[d] \sqrt{[\gamma]} \omega \mu_0},$$

Ом/м,

где $[d]$ – интервально заданное расстояние между проводами, м. Погрешность в определении можно d принять равной – 2.5 %...+2.5 %.

Для учета емкостных проводимостей необходимо дополнить полученную схему шунтами и ветвями, определяемыми величинами частичных емкостей. Последние можно найти из потенциальных коэффициентов первой группы формул Максвелла:

$$[\alpha_{ii}] = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \ln \frac{2[h]}{[r]};$$

$$[\alpha_{ij}] = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \ln \frac{[D_{ij}]}{[d_{ij}]},$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная; $[h]$ – интервальная оценка высоты провода над землей с учетом стрелы провеса; $[d_{ij}]$ – интервальная оценка расстояния от провода i до провода j ; $[D_{ij}]$ – интервальная оценка расстояния от провода i до зеркального изображения провода j ; $[r]$ – интервальная оценка радиуса провода. Высота подвеса провода (с учетом неровностей подстилающей поверхности: овраги, холмы и т. д.) определяется с погрешностью –12.5 %...+12.5 %. Коэффициенты $[\alpha_{ii}]$ и $[\alpha_{ij}]$ образуют интервальную матрицу потенциальных коэффициентов. На основе матрицы $\langle \mathbf{B} \rangle = \langle \mathbf{A} \rangle^{-1}$ могут быть вычислены собственные и взаимные частичные емкости. В узлы решетчатой схемы добавляются шунты, сопротивления которых определяются половиной соответствующей собственной емкости. Кроме того, с каждой стороны системы проводов формируются

дополнительные ветви с сопротивлениями, рассчитываемыми по половинным значениям соответствующих взаимных емкостей.

В результате матрица $\langle \underline{\mathbf{Y}}_{PC} \rangle$ преобразуется к новому виду, который можно обозначить как $\langle \underline{\mathbf{Y}}_C \rangle$:

$$\langle \underline{\mathbf{Y}}_C \rangle = \frac{\langle \underline{\mathbf{Y}}_{PC} \rangle}{[L]} + j\omega \langle \underline{\mathbf{C}}_Y \rangle [L],$$

где $\langle \underline{\mathbf{C}}_Y \rangle = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle \underline{\mathbf{B}} \rangle & 0 \\ 0 & \langle \underline{\mathbf{B}} \rangle \end{bmatrix}$; $\omega = 314$ рад/с;

$[L]$ – интервально заданная длина ЛЭП.

Технология интервального моделирования кабельных линий, а также трансформаторов и автотрансформаторов, может быть реализована аналогично на базе методики², описанной в работе [7].

На основе схемы соединений проводов конкретного элемента выполняется преобразование матрицы $\langle \underline{\mathbf{Y}}_C \rangle$ путем объединения соответствующих узлов и сложения проводимостей образующихся при этом параллельных ветвей решетчатой схемы. Указанное преобразование можно проиллюстрировать следующим образом. Предположив без потери общности, что объединяемые узлы имеют последние номера, можно разделить матрицу $\langle \underline{\mathbf{Y}}_C \rangle$ на блоки:

$$\langle \underline{\mathbf{Y}}_C \rangle = \begin{bmatrix} \langle \underline{\mathbf{Y}}_1 \rangle & \langle \underline{\mathbf{Y}}_{12} \rangle \\ \langle \underline{\mathbf{Y}}_{12}^T \rangle & \langle \underline{\mathbf{Y}}_2 \rangle \end{bmatrix}.$$

где $\langle \underline{\mathbf{Y}}_2 \rangle$ – блок размерностью $k \times k$, отвечающий объединяемым узлам.

Тогда преобразованную матрицу $\langle \underline{\mathbf{Y}}_S \rangle$ можно представить в виде

$$\langle \underline{\mathbf{Y}}_S \rangle = \begin{bmatrix} \langle \underline{\mathbf{Y}}_1 \rangle & \langle \underline{\mathbf{Y}}_{12} \rangle \mathbf{e}_k \\ \mathbf{e}_k^T \langle \underline{\mathbf{Y}}_{12}^T \rangle & \mathbf{e}_k^T \langle \underline{\mathbf{Y}}_2 \rangle \mathbf{e}_k \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{e}_k = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$ – k -мерный вектор, состоящий из единиц.

² Ввиду ограниченного объема статьи методика интервального моделирования кабельных линий, а также трансформаторов и автотрансформаторов, опущена.

На основе моделей отдельных элементов ЭЭС в виде матриц $\langle \underline{\mathbf{Y}}_S \rangle$ и схемы их соединений формируется модель сети

$$\langle \underline{\mathbf{Y}} \rangle = \mathbf{M} \langle \underline{\mathbf{Y}}_B \rangle \mathbf{M}^T,$$

где \mathbf{M} – обобщенная матрица инцидентий; ее столбцы соответствуют обобщенным ветвям ($\langle \underline{\mathbf{Y}}_{Sk} \rangle$), а строки – обобщенным узлам; $\langle \underline{\mathbf{Y}}_B \rangle = \text{diag} \langle \underline{\mathbf{Y}}_{Sk} \rangle$.

Матрицу $\langle \underline{\mathbf{Y}} \rangle$ можно представить в виде

$$\langle \underline{\mathbf{Y}} \rangle = \begin{bmatrix} \langle \underline{\mathbf{Y}}_1 \rangle & \langle \underline{\mathbf{Y}}_{1B} \rangle \\ \langle \underline{\mathbf{Y}}_{B1} \rangle & \langle \underline{\mathbf{Y}}_B \rangle \end{bmatrix}.$$

При этом система уравнений, описывающих установившийся режим, может быть записана так:

$$\begin{bmatrix} \langle \underline{\mathbf{Y}}_1 \rangle & \langle \underline{\mathbf{Y}}_{1B} \rangle \\ \langle \underline{\mathbf{Y}}_{B1} \rangle & \langle \underline{\mathbf{Y}}_B \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle \dot{\underline{\mathbf{U}}} \rangle \\ \langle \dot{\underline{\mathbf{U}}}_B \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle \dot{\underline{\mathbf{I}}} \rangle \\ \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

где $\langle \dot{\underline{\mathbf{U}}}_B \rangle = \begin{bmatrix} \dot{U}_A^{(B)} \\ \dot{U}_B^{(B)} \\ \dot{U}_C^{(B)} \end{bmatrix}^T$ – напряжения балансирующих узлов, в общем случае – заданные в интервальной постановке.

После исключения уравнений, относящихся к балансирующим узлам, можно записать

$$\langle \underline{\mathbf{Y}}_1 \rangle \langle \dot{\underline{\mathbf{U}}} \rangle = \langle \dot{\underline{\mathbf{I}}} \rangle - \langle \underline{\mathbf{Y}}_B \rangle \langle \dot{\underline{\mathbf{U}}}_B \rangle.$$

Токи могут быть выражены через мощности $[S_j]$, и в итоге может быть получена нелинейная система уравнений установившегося режима (УУР) в интервальной постановке:

$$\langle \underline{\mathbf{Y}}_1 \rangle \langle \dot{\underline{\mathbf{U}}} \rangle = \text{diag} \left[\frac{1}{\tilde{U}_k} \right] \langle \tilde{\underline{\mathbf{S}}} \rangle - \langle \underline{\mathbf{Y}}_B \rangle \langle \dot{\underline{\mathbf{U}}}_B \rangle,$$

или

$$\langle \underline{\mathbf{Y}}_1 \rangle \langle \dot{\underline{\mathbf{U}}} \rangle = \langle \dot{\underline{\mathbf{I}}} \rangle [\tilde{U}_j] - \langle \underline{\mathbf{Y}}_B \rangle \langle \dot{\underline{\mathbf{U}}}_B \rangle, \quad (1)$$

где знаком «~» обозначены комплексно-сопряженные величины.

Решение уравнений (1) может быть организовано следующим образом:

$$\langle \dot{\underline{\mathbf{U}}}^{(k+1)} \rangle = \langle \underline{\mathbf{Y}}^{-1} \rangle \langle \tilde{\underline{\mathbf{I}}} \rangle [\tilde{U}^{(k)}],$$

где k – номер итерации.

На практике обращение матрицы $\langle \underline{\mathbf{Y}} \rangle$ не производится, а на каждой итерации

решается система линейных уравнений (СЛУ)

$$\langle \mathbf{Y} \rangle \langle \dot{\mathbf{U}}^{(k+1)} \rangle = \langle \dot{\mathbf{I}} \rangle [\tilde{\mathbf{U}}^{(k)}].$$

В соответствии с рекомендациями работы [3] решение системы (1) можно выполнить методом простой итерации. При этом система преобразуется к виду

$$\langle \dot{\mathbf{U}} \rangle^{k+1} = \langle \mathbf{D} \rangle \langle \dot{\mathbf{U}} \rangle^k + \langle \mathbf{B} \rangle.$$

При этом для сходимости итерационного процесса необходимо выполнение условия $\|\langle \mathbf{D} \rangle\| \leq 1$, где $\|\langle \mathbf{D} \rangle\|$ – индуцированная норма матрицы $\langle \mathbf{D} \rangle$ [3].

Пример моделирования ЭЭС в фазных координатах. Моделирование осуществлялось применительно к схеме ЭЭС, представленной на рис. 1. Интервально были заданы следующие параметры:

- расстояния между проводами разных фаз $[d_{ij}] = [0.975d_{ij} \quad 1.025d_{ij}]$, м;
- расстояния от проводов до их зеркальных изображений $[D_{ij}] = [0.975D_{ij} \quad 1.025D_{ij}]$, м;
- длина ЛЭП $[L] = [0.9L \quad 1.1L]$, км;
- удельная проводимость земли $[\gamma] = [0.003 \quad 0.05]$, См/м;
- температура окружающей среды, от которой зависит величина активного сопротивления провода,

$[t] = [\bar{t} \quad \underline{t}] = [-40 \quad 40]^\circ \text{C}$; при этом $[R_0] = [R_0(\underline{t}) \quad R_0(\bar{t})]$.

- высота подвеса провода над землей $[h] = [0.875h \quad 1.125h]$.

Расчет производился по следующему алгоритму:

- 1) расчет матриц проводимостей $\langle \mathbf{Y}_{Sk} \rangle$, $k=1\dots 3$;
- 2) формирование матрицы $\langle \mathbf{Y}_B \rangle = \text{diag} \langle \mathbf{Y}_{Sk} \rangle$ размерностью 18x18;
- 3) формирование матрицы

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -\mathbf{P} & -\mathbf{P} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P} & -\mathbf{P} \\ \mathbf{P} & \mathbf{0} & \mathbf{P} \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [\mathbf{E} \quad \mathbf{0}]$;

- 4) получение матрицы $\langle \mathbf{Y} \rangle = \mathbf{M} \langle \mathbf{Y}_B \rangle \mathbf{M}^T$ размерностью 9x9;
- 5) разделение матрицы $\langle \mathbf{Y} \rangle$ на блоки размерностью 6x6

$$\langle \mathbf{Y} \rangle = \begin{bmatrix} \langle \mathbf{Y}_{11} \rangle & \langle \mathbf{Y}_{1B} \rangle \\ \langle \mathbf{Y}_{B1} \rangle & \langle \mathbf{Y}_B \rangle \end{bmatrix};$$

- 6) Формирование и решение УУР (1).

Расчеты выполнены с помощью экспериментальной программы IntCalc, разработанной в ИрГУПСе. Структурная схема программы приведена на рис. 2, главное окно показано на рис. 3.

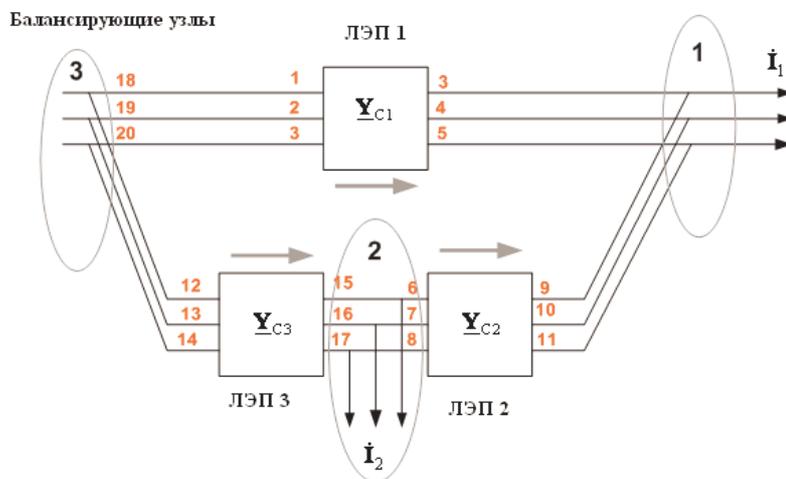


Рис. 1. Схема ЭЭС:

II. Моделирование и управление в технических системах

напряжение сети 110 кВ; провод АС-240/56; длины ЛЭП 1, 2, 3 - 70, 30 и 50 км соответственно; модули напряжений в балансирующих узлах приняты равными 121 кВ.



Рис. 2. Структурная схема программы.

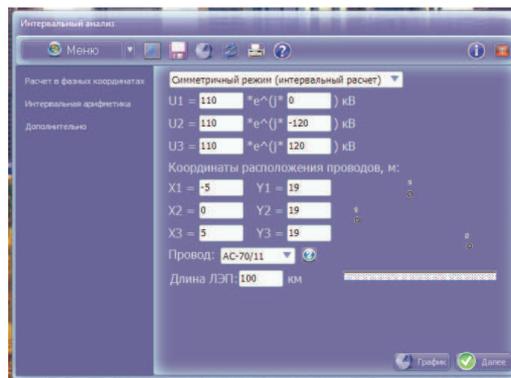
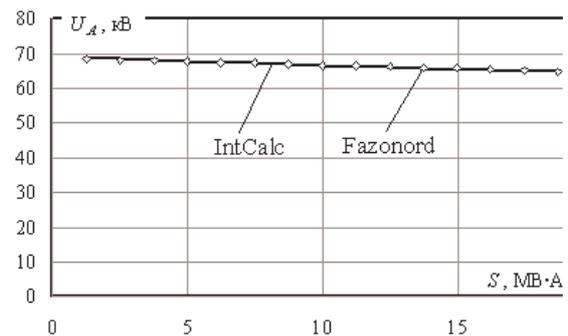
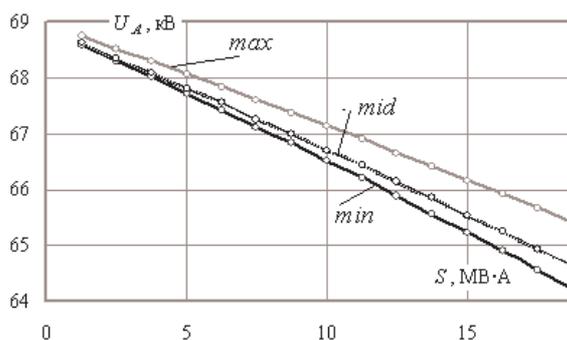


Рис. 3. Главное окно программы.

На рис. 4 представлены результаты расчета режимов интервальным методом. На этом рисунке приведены зависимости модулей напряжений обобщенного узла 1 от его нагрузки. Нагрузка узла 2 оставалась неизменной и равной $10+j7.5$ МВА. Средние значения (*mid*) получены путем расчета режимов с помощью программы IntCalc при совмещении нижних и верх-

них границ интервалов т. е. $\bar{a} = \underline{a} = a_{mid}$. Для подтверждения адекватности интервального моделирования выполнены расчеты режимов при средних значениях параметров с помощью промышленного программного комплекса Fazonord [8], показанные на рис. 4 справа и свидетельствующие о совпадении результатов с высокой точностью.



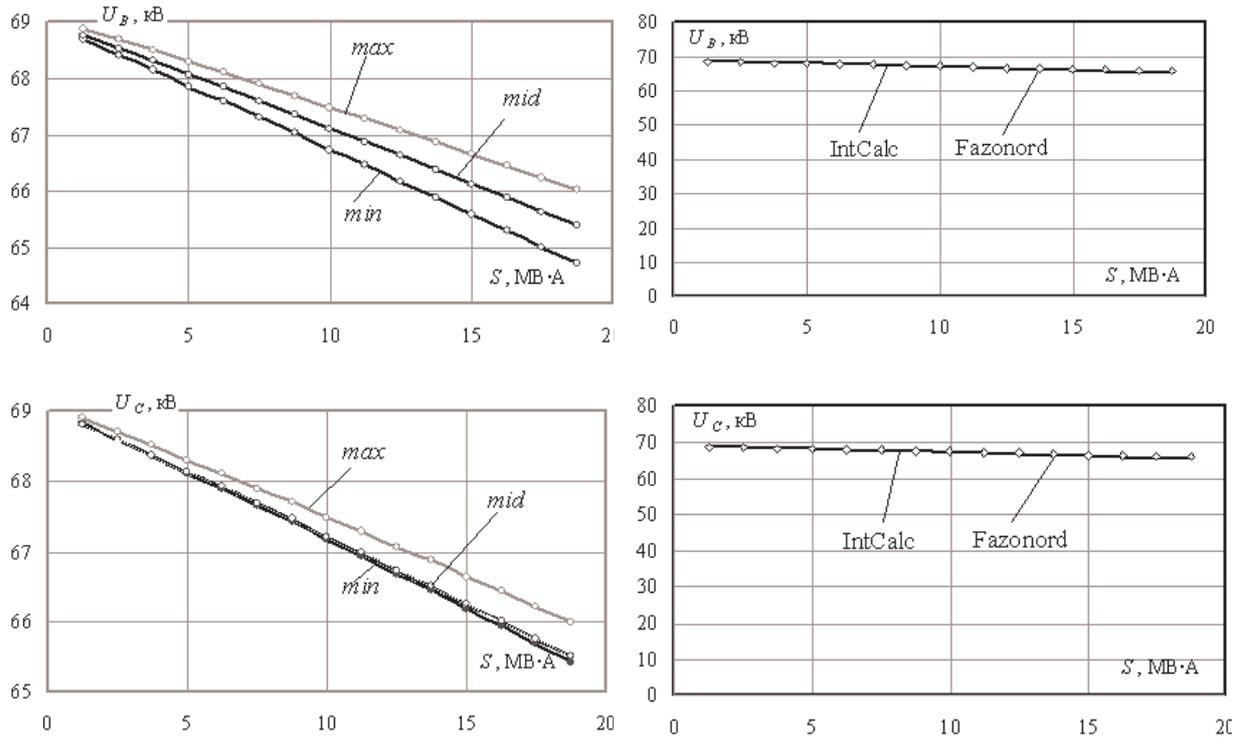


Рис. 4. Результаты интервального моделирования.

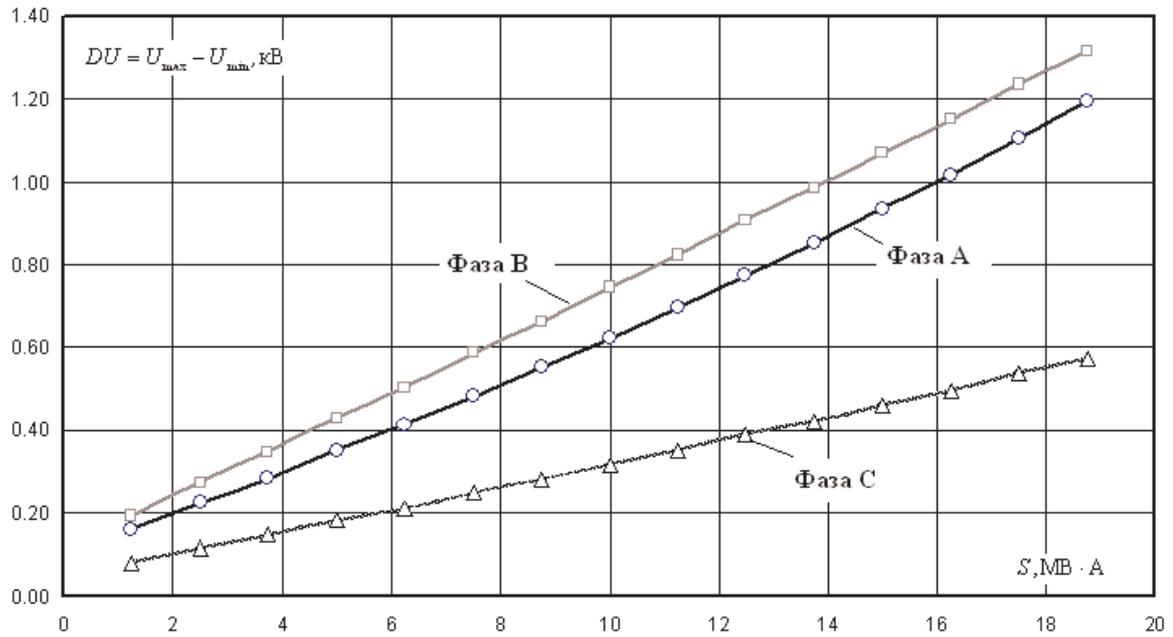


Рис. 5. Ширина интервалов по уровням напряжений.

Результаты моделирования показывают, что вследствие неопределенности исходных данных модули напряжений могут отличаться на 1.2 кВ для фазы А, на 1.32 кВ для фазы В и на 0.6 кВ для фазы С (рис. 5). Полученные результаты подтверждают необходимость учета неопре-

деленности исходной информации при расчетах режимов ЭЭС. Полученные интервалы неопределенности для модулей напряжения могут показаться на первый взгляд недостаточно широкими, однако они рассчитаны при очень оптимистичной оценке величин погрешностей ис-

ходных данных. В ряде случаев эти погрешности могут быть значительно больше [9]. Кроме того, на основе предложенной методики возможен расчет режимов при интервальном задании нагрузок, которые изменяются в широких пределах, что приводит к значительным вариациям напряжений.

Заключение

1. Показано, что учет неопределенности исходных данных при расчете режимов электроэнергетических систем может быть выполнен на основе методов интервального анализа.

2. Предложена методика интервального определения режимов ЭЭС, основанная на использовании фазных координат и применимая для определения как симметричных, так и несимметричных режимов, а также задач анализа электромагнитной совместимости и безопасности.

3. На основе интервального моделирования подтверждена необходимость учета неопределенности исходной информации при расчетах режимов ЭЭС.

Литература

1. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. М.: Мир, 1987. 360 с.

2. Добронев Б. С. Интервальная математика. Красноярск, 2004. 216 с.

3. Шарый С. П. Конечномерный интервальный анализ. XYZ, 2010. 588 с.

4. Шокин Ю. И. Интервальный анализ. Новосибирск : Наука, 1981. 112 с.

5. Шарый С. П. Интервальные алгебраические задачи и их численное решение. Новосибирск : И-т вычислительных технологий, 2000. 327 с.

6. Воропай Н. И., Бат-Ундрал Б. Расчеты режимов радиальной электрической сети интервальным методом // Электричество. 2008. № 10.

7. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.

8. Fazonord-Качество – Расчеты показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов : программа для ЭВМ / Закарюкин В.П., Крюков А.В. СВ. ГР № 2007612771 (РФ) ; зарег. в реестре Федер. службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам 28.06.2007.

9. Шелюг С. Н. Методы адаптивной идентификации параметров схемы замещения элементов электрической сети : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2000. 23 с.