

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются системы диагностики электрических цепей. Предмет исследования – математические модели цепей и процессов их диагностики. Цель работы – формирование общей постановки задачи диагностики электрических цепей и подходов к ее решению на основе результатов моделирования объекта диагностики и процесса диагностирования.

Материалы и методы. Для математического описания объектов диагностики и процессов диагностирования использовались методы анализа, синтеза и идентификации электрических цепей, аппарат линейной алгебры, включая матричное исчисление, методы верификации и валидации математических моделей.

Результаты. Дана постановка задачи диагностики электрической цепи и сформулирован общий подход к ее решению, который заключается в построении алгоритмических моделей процесса диагностирования на основе результатов многоуровневого моделирования объекта диагностики.

Выводы. Предложенный подход может служить методологической основой для совершенствования известных и поиска новых методов и средств диагностики.

Ключевые слова: диагностика, электрическая цепь, моделирование, импеданс, адмитанс.

S. K. Kuroedov, A. V. Svetlov, V. V. Smogunov, P. P. Churakov

DIAGNOSTIC MODELS OF LUMPED ELECTRIC CIRCUITS

Abstract.

Background. The objects of the study are diagnostic systems of electrical circuits. The research subject is mathematical models of circuits and processes of their diagnostics. The aim of the study is to form a general statement of the problem of diagnostics of electric circuits and approaches to its solution based on the results of modeling the object of diagnosis and the process of diagnosis.

Materials and methods. Methods of analysis, synthesis and identification of electric circuits, apparatus of linear algebra, including matrix calculus, methods of verification and validation of mathematical models were used for mathematical description of diagnostic objects and diagnostic processes.

Results. The statement of the problem of diagnostics of an electric circuit is given and the general approach to its decision which consists in construction of algorithmic models of diagnostics on the basis of the results of multilevel modeling of the object of diagnostics is formulated.

Conclusions. The proposed approach can serve as a methodological basis for improving the known and searching for new methods and diagnostic tools.

Keywords: diagnostics, electric circuit, modeling, impedance, admittance.

Введение

Задача диагностики электрических цепей различного назначения, включая цепи радиоэлектронной аппаратуры, вычислительной техники и силовой электроники, имеет большое число практически важных вариантов, которые различаются видом определяемого состояния и типом электрической цепи, степенью априорной неопределенности ее характеристик, глубиной диагностирования, условиями проведения и формой представления результатов диагностического эксперимента [1].

Целью диагностики цепи на макроуровне может быть определение состояний ее входов, выходов и функций, используемых для функционального контроля. Внутрисхемный контроль и локализация неисправностей аппаратуры могут быть осуществлены по результатам диагностики ее цепей на микроуровне в виде состояний входов, выходов и функций компонентов и связей между компонентами [2].

Указанные особенности задачи диагностики электрических цепей обуславливают многообразие подходов к ее решению и затрудняют разработку общей теории и оптимальных методов экспериментального определения состояния цепей с использованием современных достижений в области моделирования, анализа, синтеза и идентификации систем, теории планирования эксперимента и электрических измерений.

1. Многоуровневые диагностические модели электрических цепей

В работе [2] диагностику цепи предложено рассматривать как процесс преобразования ее многоуровневой модели по результатам диагностического эксперимента. Модель наиболее высокого уровня – макромоделю – представляет цепь в виде одного элемента, а элементы модели более низкого уровня связаны с макромоделю отношением принадлежности. Множество фазовых переменных макромоделю является подмножеством множества всех фазовых переменных микромоделю, функции же макромоделю связаны с функциями элементов микромоделю отношением композиции.

Указанный подход к описанию процессов диагностики можно обобщить, выбирая уровни модели объекта диагностики по другим признакам и включая в состав данных уровней соответствующие модели диагностических экспериментов. Одним из таких признаков может служить степень неопределенности модели цепи и диагностического эксперимента. Наибольшей степенью неопределенности характеризуются априорные модели цепи и диагностического эксперимента. Последние строятся на основе априорных моделей цепей соответствующего уровня и используются для планирования и обработки результатов экспериментов. Результаты обработки экспериментальных данных представляются в виде апостериорных моделей эксперимента и цепи.

Другим признаком уровня модели является ее сложность, которую можно оценить, например, по числу фазовых переменных макромоделю, количеству элементов микромоделю и связей между ними, числу членов функ-

циональных рядов, используемых для описания функций моделируемой цепи и ее элементов.

Увеличение сложности модели для более адекватного описания цепи усложняет модель эксперимента и обработку его результатов. Это может вызвать увеличение погрешности экспериментальных данных и неустойчивость результатов их обработки. Априорную оценку точности экспериментальных данных и устойчивости результатов их обработки можно получить в результате верификации построенной модели. Процедура верификации априорной модели должна предусматривать также проверку ее соответствия постановке задачи диагностики и априорной информации об объекте диагностики. При отрицательном результате верификации необходимо изменить уровень сложности модели таким образом, чтобы априорные оценки точности и устойчивости удовлетворяли выбранным критериям.

Преобразования моделей различного уровня сложности можно рассмотреть на примере макромоделей нелинейной нестационарной автономной цепи и соответствующей модели диагностического эксперимента. Вид математического описания цепи с сосредоточенными параметрами на макроуровне определяется выбором независимых переменных – координат модели, которые вместе с зависимыми переменными характеризуют состояние моделируемой цепи. В соответствующей модели активного эксперимента выбранные координаты представляют воздействие на диагностируемую цепь, а зависимые переменные – ее реакцию на воздействие, при этом все координаты модели должны удовлетворять условию управляемости, а зависимые переменные – условию наблюдаемости.

В координатной системе напряжений u_i узловых пар (i, i') , $i \in \overline{1, N}$, где N – общее число узловых пар, зависимыми переменными являются токи i_j узловых пар (j, j') , $j \in \overline{1, N}$, которые замыкаются через внешние цепи. Нелинейная нестационарная автономная цепь в указанной системе координат в режиме малого сигнала описывается выражением

$$\mathbf{i} = \int_{-\infty}^t \mathbf{h} \mathbf{u} d\tau + \mathbf{i}_a, \quad (1)$$

где $\mathbf{i} = [i_j(t)]^T$, $\mathbf{u} = [u_i(\tau)]^T$ и $\mathbf{i}_a = [i_{aj}(t, \mathbf{U}_0)]^T$ – векторы-столбцы токов,

напряжений и автономных токов узловых пар; $\mathbf{h} = [h_{ji}(t, \tau, \mathbf{U}_0)]$ – квадратная

матрица малосигнальных импульсных характеристик цепи; $\mathbf{U}_0 = [U_{0i}]^T$ –

вектор-столбец напряжений смещения U_{0i} узловых пар; T – символ транспонирования матрицы. При гармоническом воздействии на цепь, изменением параметров которой за время эксперимента можно пренебречь, малосигнальная модель (1) преобразуется к следующему виду:

$$\mathbf{I} = [\mathbf{Y} \mathbf{I}_a] \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\mathbf{I} = [I_j]^T$, $\mathbf{U} = [U_i]^T$ и $\mathbf{I}_a = [I_{aj}]^T$ – векторы-столбцы комплексных ам-

плитуд токов, напряжений и автономных токов узловых пар; $\mathbf{Y} = [Y_{ji}]$ –

квадратная матрица узловых адмитансов.

Для экспериментального определения элементов блочной матрицы $[\mathbf{YI}_a]$ необходимо сформировать многомерные воздействия на цепь в виде гармонических напряжений u_i , комплексные амплитуды U_{im} которых описываются столбцами матрицы $\mathbf{U}_M = [U_{im}]$, и измерить комплексные ампли-

туды I_{jm} токов i_j , представляемых элементами матрицы $\mathbf{I}_M = [I_{jm}]$ [3].

Результат организованных таким образом косвенных измерений может быть получен при условии, что матрица $\mathbf{V}_M = [\mathbf{U}_M^T \mathbf{e}_{1,M}^T]^T$ с блоком $\mathbf{e}_{1,M}$ в виде M -мерного вектора-столбца с единичными элементами является матрицей полного ранга:

$$[\mathbf{YI}_a] = \mathbf{I}_M \mathbf{V}_M^* (\mathbf{V}_M \mathbf{V}_M^*)^{-1}, \quad (3)$$

где * – символ сопряжения матрицы.

При определении адмитансов Y_{ji} элементы I_{aj} блока \mathbf{I}_a матрицы $[\mathbf{YI}_a]$ могут рассматриваться как аддитивные погрешности измерения элементов I_{jm} матрицы \mathbf{I}_M . Для коррекции данной погрешности необходимо предварительно провести эксперимент, модель которого описывается выражением

$$\mathbf{I}_0 = [\mathbf{YI}_a] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_N \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где \mathbf{I}_0 – вектор-столбец комплексных амплитуд токов короткого замыкания узловых пар цепи; $\boldsymbol{\theta}_N$ – нулевой N -мерный вектор-столбец. После введения поправки $\mathbf{I}'_M = \mathbf{I}_M - \mathbf{I}_0 \mathbf{e}_M^T$ результатов измерений I_{jm} модель (4) преобразуется к виду модели экспериментального определения Y_{ji} неавтономной цепи:

$$\mathbf{I}'_M = [\mathbf{YI}_a] \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{U}_M \\ \mathbf{e}_M^T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_N \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{e}_M^T \right\} = \mathbf{YU}_M. \quad (5)$$

Точность результатов эксперимента зависит от точности воспроизведения гармонических напряжений u_i , точности измерения комплексных амплитуд токов i_j и обусловленности системы линейных алгебраических уравне-

ний (5). Для оптимизации плана эксперимента по критерию минимума погрешности косвенных измерений необходимо минимизировать число обусловленности матрицы $U_M U_M^*$.

Минимальное число обусловленности матрицы, равное единице, достигается тогда и только тогда, когда данная матрица является масштабной копией унитарной матрицы [5]. По отношению к матрице U_M это означает, что все столбцы данной матрицы должны быть попарно ортогональны и иметь одинаковые нормы. Данное условие при $N = M$ удовлетворяется, в частности, для диагональной матрицы U_M с одинаковыми элементами главной диагонали. Это соответствует плану N -кратного эксперимента, на каждой стадии которого на одной из узловых пар создается режим заданного гармонического напряжения u_i с комплексной амплитудой U_{im} , а на остальных – режим короткого замыкания. По результатам измерений комплексных амплитуд токов узловых пар на каждой стадии формируется соответствующий столбец матрицы I_M .

Для сокращения общего времени эксперимента необходимо сформировать многомерное ортонормированное воздействие одновременно на все узловые пары. Условие ортогональности для гармонических напряжений u_i выполняется, если их частоты $\omega_i = 2\pi n_i T_I$, где n_i – целые положительные числа; T_I – длительность интервала времени, на котором осуществляется определение комплексных амплитуд токов i_j каждой узловой пары на каждой из частот $\omega_i = 2\pi n_i T_I$. Значения T_I и n_i выбираются таким образом, чтобы частоты многомерного воздействия находились в определенной, достаточно узкой полосе и числа n_i не совпадали для различных значений i . Эти условия выполняются, если $n_i = n_0 + i$, где n_0 – целая положительная константа.

2. Алгоритмические модели процессов диагностирования

2.1. Последовательное диагностирование

Процесс преобразования моделей цепи и диагностического эксперимента различных уровней может быть представлен в виде последовательного, параллельного, циклического алгоритмов или их комбинаций. Примером реализации последовательного алгоритма является преобразование априорной модели цепи определенного уровня иерархии в апостериорную модель этого же уровня с последующим переходом на другой, более высокий или низкий уровень.

На рис. 1,а показана схема алгоритма последовательного преобразования априорной макромоделей MC_0^b , сформированной на основе априорной информации IC^b о диагностируемой цепи, в ее апостериорную макромоделю MC_0^a и апостериорные микромоделей $MC_1^a, MC_2^a, \dots, MC_n^a$. Эксперимент E_0 рассматривается в данной схеме как этап процесса диагностирования, который осуществляется на его физическом уровне F , а преобразования апосте-

приорных моделей $MC_1^a, MC_1^b, MC_2^a, \dots, MC_n^a$ – как переходы между подуровнями информационного уровня I .

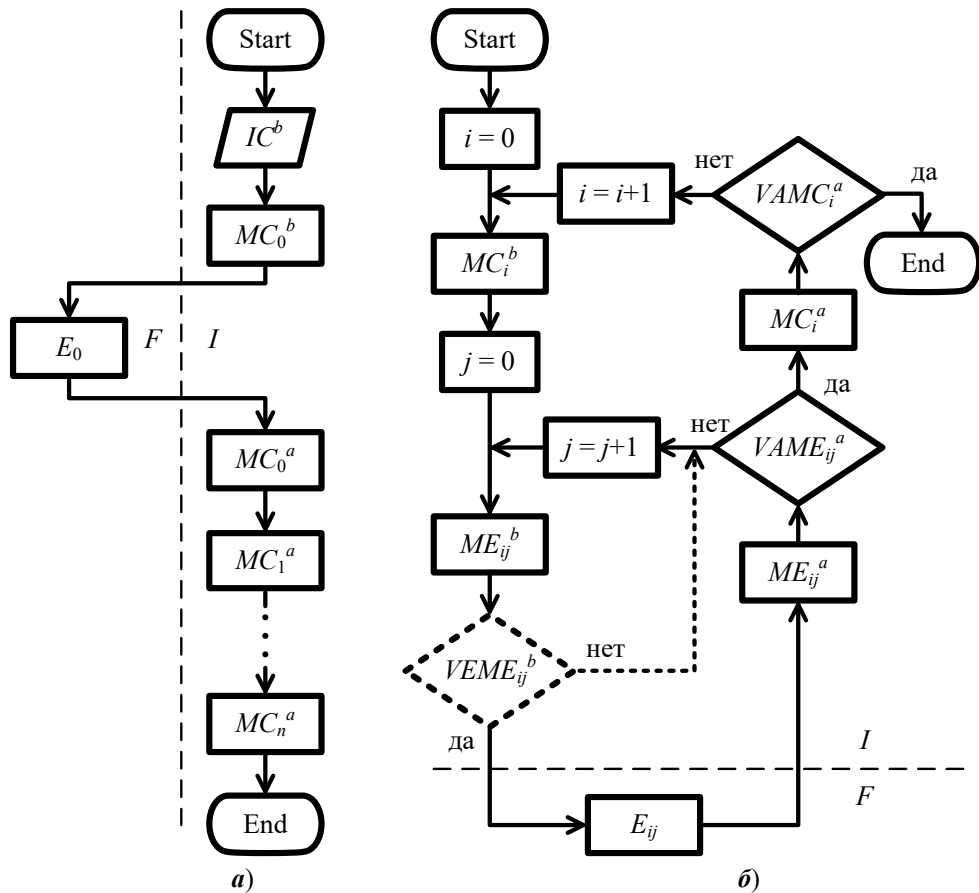


Рис. 1. Схемы последовательного (а) и циклического (б) алгоритмов диагностики

Апостериорная макро модель в координатной системе напряжений узловых пар может быть однозначно преобразована в микро модель цепи с источниками автономных токов I_{aj} , активными четырехполюсниками в виде источников тока, управляемых напряжениями, и пассивными двухполюсниками:

$$Y = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N Y_{ji} e_j e_i^T, \quad (6)$$

где Y_{ji} – передаточные адмитансы активных четырехполюсников ($j \neq i$); Y_{jj} – адмитансы пассивных двухполюсников; e_j – N -мерный вектор-столбец, все элементы которого, кроме j -го, равны нулю, а j -й равен единице.

Если макро модель в канонической системе узловых напряжений, отсчитываемых относительно базисного узла, характеризуется симметричной матрицей Y , то соответствующая микро модель может быть построена в эле-

ментном базисе независимых источников тока и пассивных двухполюсников с помощью следующего разложения \mathbf{Y} :

$$\mathbf{A}^T \mathbf{Y}_b \mathbf{A} = \sum_{k=1}^K Y_k \mathbf{A} \mathbf{e}_k (\mathbf{A} \mathbf{e}_k)^T, \quad (7)$$

где \mathbf{A} – матрица инцидентий; $\mathbf{Y}_b = \text{diag} \left(\begin{matrix} Y_k \\ k=1, K \end{matrix} \right)$ – диагональная матрица адмитансов Y_k ветвей; K – число узлов цепи без учета базисного.

Рассмотренное последовательное преобразование априорной макромоделли, построенной в координатной системе напряжений узловых пар, в апостериорную микромоделли лежит в основе метода диагностики, который в [5] назван методом узловых адмитансов. Данный метод позволяет при оптимальном плане эксперимента на макроуровне определить состояния и функции элементов цепи с точностью, близкой к точности воспроизведения и измерения напряжений и токов узловых пар. Недостаток данного метода заключается в необходимости создания на всех узлах цепи режимов заданных напряжений, что для активных цепей и цепей оборудования в режиме его нормальной эксплуатации недопустимо.

Уменьшить число одновременно подключаемых в процессе диагностического эксперимента внешних узлов (полюсов) цепи без существенного изменения ее состояний и функций позволяет метод узловых сопротивлений (импедансов) [1], который заключается в преобразовании апостериорной макромоделли, построенной в системе контурных токов, в апостериорную макромоделли – в системе напряжений узловых пар.

Априорная макромоделли цепи, используемая для построения модели измерительного эксперимента и его плана, в данном случае дуальна макромоделли (2), построенной в системе узловых напряжений:

$$\mathbf{U} = [\mathbf{Z} \mathbf{U}_a] \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\mathbf{U} = [U_j]^T$, $\mathbf{I} = [I_i]^T$ и $\mathbf{U}_a = [U_{aj}]^T$ – векторы-столбцы комплексных амплитуд напряжений, токов и автономных напряжений узловых пар;

$\mathbf{Z} = [Z_{ji}]$ – квадратная матрица узловых импедансов.

$$\begin{matrix} j \in \overline{1, N} \\ i \in \overline{1, N} \end{matrix}$$

Ток i_i узловой пары (i, i') в модели (8) определяется как ток контура, включающего узлы i и i' , который замыкается через внешние цепи. При косвенных измерениях импедансов Z_{ji} гармонический ток i_i представляет одномерное воздействие на диагностируемую цепь, а напряжения u_j – ее многомерную реакцию, которая для стационарных цепей может быть определена с помощью измерительных преобразователей напряжения, подключаемых к узловым парам (j, j') , где $j \in \overline{1, N}$. Так как при одномерном воздействии i_i

на узловую пару (i, i') на других узловых парах организуется режим холостого хода, то минимальное число одновременно подключаемых узловых пар цепи на каждой стадии эксперимента равно двум, а для эксперимента в канонической системе координат это число соответствует количеству одновременно подключаемых полюсов цепи, не считая базисного.

Модель эксперимента в координатной системе токов узловых пар также дуальна модели эксперимента в системе напряжений узловых пар. Результат эксперимента на макроуровне в координатной системе токов узловых пар в виде блочной матрицы $[ZU_a]$ преобразуется в блочную матрицу $[YI_a]$:

$$[YI_a] = [Z^{-1} | -Z^{-1}U_a]. \quad (9)$$

Преобразование системы координат апостериорной макромоделю позволяет более просто осуществить переход на микроуровень, используя выражения (6) или (7). Однако при решении практических задач матрица Z , как правило, оказывается плохо обусловленной и ее обращение приводит к увеличению погрешности косвенных измерений элементов данной матрицы.

В работе [5] рассмотрен тестовый пример диагностируемой LC-цепи в виде двойного T-образного моста, для которой число обусловленности $\text{cond} Z$ по спектральной норме равно $2,5 \cdot 10^4$. Используя оценку относительной погрешности совокупных измерений элементов Y в виде

$$\delta Y \leq \delta Z \text{cond} Z (1 - \delta Z \text{cond} Z)^{-1}, \quad (10)$$

где $\delta Y = \|\Delta Y\| \|Y\|^{-1}$, $\delta Z = \|\Delta Z\| \|Z\|^{-1}$, $\|\cdot\|$ – норма матрицы, ΔY и ΔZ – матрицы погрешностей элементов матриц Y и Z , можно сделать вывод о том, что при $\delta Z \geq 4 \cdot 10^{-5}$ задача определения элементов матрицы Y данной цепи является некорректной, а ее решение потенциально неустойчивым. Если $\delta Z < 4 \cdot 10^{-5}$, то решение поставленной задачи становится устойчивым, однако кратность увеличения δY относительно δZ может превышать значение $\text{cond} Z = 2,5 \cdot 10^4$ и при приближении δZ к данному значению степень увеличения кратности возрастает.

2.2. Циклическое диагностирование

Для регуляризации решения задачи диагностики цепи с помощью преобразования системы координат ее апостериорной макромоделю в [5] предложено приведение Y к виду матриц с доминирующей главной диагональю путем подключения к узловым парам диагностируемой цепи опорных двухполюсников с известными адмитансами Y_{0i} , удовлетворяющими условию

$$|Y_{ii} + Y_{0i}| > \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N |Y_{ij}|, i \in \overline{1, N} \quad [4].$$

Так как значения диагональных и недиагональных элементов Y_{ii} и Y_{ij} матрицы Y априорно неизвестны, то для экспериментального определения оптимальных значений Y_{0i} может быть использован критерий

$$\text{cond } \mathbf{Z}' = \text{cond } \mathbf{Y}' = \min_{Y_{0i}} , \quad (11)$$

где $\mathbf{Z}' = (\mathbf{Y}')^{-1}$ и $\mathbf{Y}' = \mathbf{Y} + \text{diag}(Y_{0i})_{i=1,N}$ – матрицы узловых импедансов и адмитансов цепи с подключенными опорными двухполюсниками.

Поиск оптимальных по критерию (11) значений Y_{0i} с учетом ограничений на токи узловых пар и число одновременно подключаемых опорных двухполюсников требует проведения многократных измерений элементов различных вариантов матрицы \mathbf{Z}' с использованием многозначных мер адмитансов и алгоритмов многошаговой оптимизации. Поиск наилучшего варианта \mathbf{Z}' реализуется с помощью циклического алгоритма, схема которого показана на рис. 1,б. В теле цикла на каждой его итерации формируются априорная модель ME_{ij}^b эксперимента E_{ij} и его апостериорная модель ME_{ij}^a .

Для валидации VA модели ME_{ij}^a используется условие (11). В случае его выполнения принимается решение об остановке цикла и формировании апостериорной модели цепи MC_i^a , которая также подвергается процедуре валидации VA с целью проверки ее корректности и адекватности по критериям устойчивости и точности.

Результаты оптимизации Y_{0i} могут быть получены также с помощью имитационной модели k -й стадии многократного эксперимента [6, 7], которая заключается в определении элементов матрицы \mathbf{Z}'_k узловых импедансов при подключении опорного двухполюсника с импедансом Y_{0k} к k -й узловой паре:

$$\mathbf{Z}'_k = \mathbf{Z}'_{k-1} - \frac{Y_k}{1 + Y_k \mathbf{e}_k^T \mathbf{Z}'_{k-1} \mathbf{e}_k} \mathbf{Z}'_{k-1} \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T \mathbf{Z}'_{k-1} , \quad (12)$$

где \mathbf{Z}'_{k-1} – матрица узловых импедансов, элементы которой измеряются на предыдущей стадии эксперимента.

Для реализации описанного способа регуляризации необходимо измерить элементы \mathbf{Z} , выбрать узловые пары цепи, подключение к которым опорных двухполюсников дает наибольшее уменьшение $\text{cond } \mathbf{Z}'$ и оптимизировать адмитансы опорных двухполюсников по критерию (11) с помощью имитационного моделирования многократного эксперимента. Далее следует определить элементы матрицы $\mathbf{Y} = (\mathbf{Z}')^{-1} - \text{diag}(Y_{0i})_{i=1,N}$ по результатам измерений элементов \mathbf{Z}' .

Рассмотренный алгоритм реализуется с помощью цикла, организованного на информационном уровне I процесса диагностирования и обозначенного на рис. 1,б прерывистой штриховой линией. Остановка цикла происходит при положительном результате верификации VE имитационной модели ME_{ij}^b эксперимента.

После остановки цикла оптимизированный вариант модели ME_{ij}^b используется для планирования эксперимента, по результатам которого формируется его апостериорная модель ME_{ij}^a . По результату валидации ВА модели ME_{ij}^a принимается решение о формировании апостериорной модели MC_i^a цепи или коррекции модели ME_{ij}^b эксперимента.

Исследование эффективности данного способа на описанном выше тестовом примере показало, что при подключении опорных двухполюсников к трем полюсам цепи число обусловленности $\text{cond} \mathbf{Z}'$ уменьшается приблизительно в 500 раз, а при подключении ко всем шести полюсам – приблизительно на три порядка. Подобные исследования других тестовых примеров показали, что при увеличении числа полюсов диагностируемой цепи увеличивается и число опорных двухполюсников, подключение которых к узловым парам диагностируемой цепи обеспечивает аналогичное уменьшение $\text{cond} \mathbf{Z}'$.

2.3. Параллельное диагностирование

Подключение опорных двухполюсников к узловым парам видоизменяет макромодель цепи, если рассматривать ее как элемент модели диагностического эксперимента. При этом размерность макромодели, определяемая числом N ее координат, не изменяется. Один из путей уменьшения размерности данной модели заключается в выделении определенной группы координат на каждой стадии диагностического эксперимента [8].

Выделение двух координат I_i и I_j можно описать с помощью разбиения векторов \mathbf{I} и \mathbf{U} на блоки

$$\mathbf{I}_{A(i,j)} = [I_i \ I_j]^T, \quad \mathbf{I}_{B(i,j)} = \begin{bmatrix} I_k \\ \vdots \\ I_j \end{bmatrix}^T \begin{matrix} k \in 1, N \\ k \neq i, j \end{matrix} \quad \text{и} \quad \mathbf{U}_{A(i,j)} = [U_i \ U_j]^T, \quad \mathbf{U}_{B(i,j)} = \begin{bmatrix} U_k \\ \vdots \\ U_j \end{bmatrix}^T \begin{matrix} k \in 1, N \\ k \neq i, j \end{matrix}. \quad (13)$$

Соответствующие данному разбиению блоки $\mathbf{Y}_{AA(i,j)}$, $\mathbf{Y}_{AB(i,j)}$, $\mathbf{Y}_{BA(i,j)}$, $\mathbf{Y}_{BB(i,j)}$ и $\mathbf{Z}_{AA(i,j)}$, $\mathbf{Z}_{AB(i,j)}$, $\mathbf{Z}_{BA(i,j)}$, $\mathbf{Z}_{BB(i,j)}$ матриц \mathbf{Y} и \mathbf{Z} связаны формулами Фробениуса [4].

При подключении опорных двухполюсников с адмитансами Y_{0i} и Y_{0j} к выделенным узловым парам изменяется только один блок $\mathbf{Y}_{AA(i,j)}$ матрицы \mathbf{Y} согласно формуле $\mathbf{Y}'_{AA(i,j)} = \mathbf{Y}_{AA(i,j)} + \text{diag}(Y_i, Y_j)$ и все блоки матрицы \mathbf{Z} :

$$\mathbf{Z}'_{(i,j)} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}'_{AA(i,j)} & \mathbf{Z}'_{AB(i,j)} \\ \mathbf{Z}'_{BA(i,j)} & \mathbf{Z}'_{BB(i,j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}'_{AA(i,j)} & \mathbf{Y}_{AB(i,j)} \\ \mathbf{Y}_{BA(i,j)} & \mathbf{Y}_{BB(i,j)} \end{bmatrix}^{-1}. \quad (14)$$

Результаты экспериментов в различных выделенных группах координат в виде элементов матриц $\mathbf{Z}'_{(i,j)}$ формируют систему линейных алгебраических уравнений

$$Y_{AA(i,j)} - (Z'_{AA(i,j)})^{-1} Z'_{AB(i,j)} Y_{BA(i,j)} = (Z'_{AA(i,j)})^{-1} - \text{diag}(Y_i, Y_j), \quad (15)$$

$i=1, \dots, (N-1)$
 $j=(i+1), \dots, N$

решение которой в виде элементов матрицы Y возможно, если блоки $Z'_{AA(i,j)}$ для всех вариантов выделения групп координат являются невырожденными.

Схема алгоритма диагностирования в выделенных группах координат показана на рис. 2. На схеме не показаны блоки формирования модели MC^b цепи в полной системе координат по результатам предварительного эксперимента, а также блоки верификации и валидации априорных и апостериорных моделей.

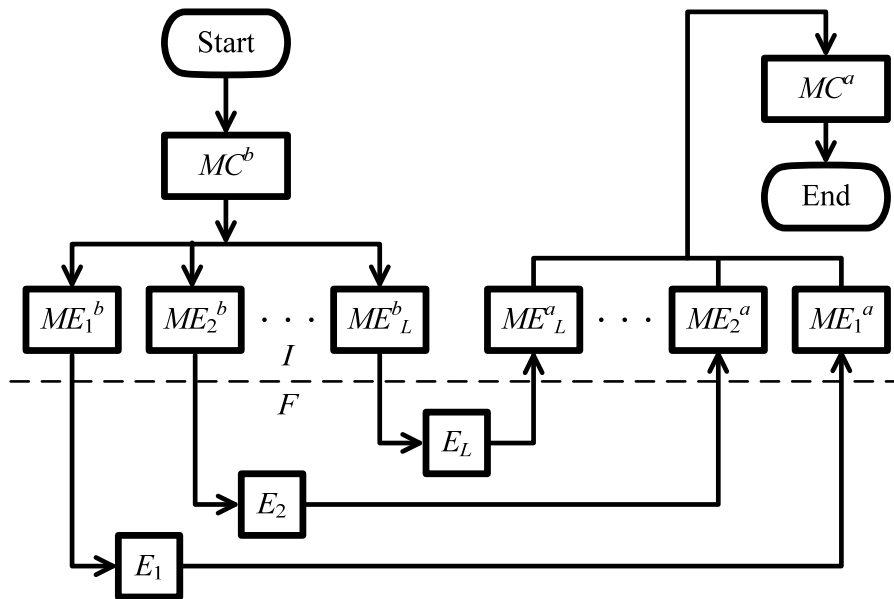


Рис. 2. Схемы параллельного алгоритма диагностики

Формирование априорных и апостериорных моделей ME_l^b и ME_l^a экспериментов E_l , где $l \in \overline{1, L}$, осуществляются в данных алгоритмах параллельно, так как результаты эксперимента в определенной группе координат не зависят от результатов экспериментов в других группах.

Использование параллельного алгоритма диагностики по результатам экспериментов в пятнадцати парах координат тестового примера цепи LC-фильтра позволило получить число обусловленности матрицы коэффициентов системы (15), равное 1,7. Если относительная погрешность косвенных измерений узловых импедансов не превышает 10^{-3} , то относительная погрешность совокупных измерений узловых адмитансов при достигнутой степени обусловленности решаемой системы (15) не превышает $2 \cdot 10^{-3}$.

Параллельные алгоритмы могут быть использованы также для построения апостериорной модели выбранного уровня по результатам экспериментов на нескольких уровнях, в число которых может входить и уровень формируемой модели. Совокупная обработка результатов, полученных преобразова-

нием апостериорных моделей различных уровней, обеспечивает более полное и достоверное диагностирование, а степень согласованности получаемых результатов может служить критерием адекватности формируемой апостериорной модели цепи.

Заключение

Рассмотренные примеры построения алгоритмических моделей процессов диагностики электрических цепей показывают, что предложенный подход к решению задач экспериментального определения состояний объектов диагностики на основе результатов их многоуровневого моделирования может служить эффективным инструментом для совершенствования существующих и разработки новых методов и средств диагностики.

Библиографический список

1. **Демирчан, К. С.** Теоретические основы электротехники / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – Санкт-Петербург : Питер, 2003. – Т. 2. – 576 с.
2. **Куроедов, С. К.** Использование технологии виртуальных приборов для решения задач диагностики электрических цепей методом узловых импедансов / С. К. Куроедов, А. В. Светлов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments NIDays-2014 : сб. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 19–20 ноября 2014 г.). – Москва : ДМК Пресс, 2014. – С. 12–14.
3. **Байдаров, С. Ю.** Использование технологии виртуальных приборов для определения частотных характеристик элементов и систем управления / С. Ю. Байдаров, М. М. Бутаев, С. К. Куроедов, А. В. Светлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 105–115.
4. **Воеводин, В. В.** Матрицы и вычисления / В. В. Воеводин, Ю. А. Кузнецов. – Москва : Наука, 1984. – 320 с.
5. **Куроедов, С. К.** Алгоритмы диагностики электрических цепей методами узловых адмитансов и импедансов / С. К. Куроедов, А. В. Светлов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 52–57.
6. **Куроедов, С. К.** Инструментальная регуляризация решения задачи диагностики электрических цепей методом узловых импедансов / С. К. Куроедов, А. В. Светлов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 50–54.
7. **Князьков, А. В.** Виртуальная диагностика электрических цепей с коррекцией погрешностей совокупных измерений узловых адмитансов / А. В. Князьков, С. К. Куроедов, А. В. Светлов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments NIDays-2016 : сб. тр. XV Междунар. конф. (Москва, 25 ноября 2016 г.). – Москва : ДМК Пресс, 2016. – С. 151–153.
8. **Куроедов, С. К.** Регуляризация решения задачи диагностики электрических цепей по результатам измерений узловых импедансов в выделенных группах координат / С. К. Куроедов, А. В. Светлов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 144–147.

References

1. Demirchan K. S., Neyman L. R., Korovkin N. V., Chechurin V. L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical essentials of electrical engineering]. Saint-Petersburg: Piter, 2003, vol. 2, 576 p. [In Russian]
2. Kuroedov S. K., Svetlov A. V. *Inzhenernye i nauchnye prilozheniya na baze tekhnologiiy National Instruments NIDays-2014: sb. tr. XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*

- (Moskva, 19–20 noyabrya 2014 g.) [Engineering and scientific applications on the basis of National Instruments NIDays-2014: proceedings of XIII International scientific and practical conference (Moscow, November 19th–20th, 2014)]. Moscow: DMK Press, 2014, pp. 12–14. [In Russian]
3. Baydarov S. Yu., Butaev M. M., Kuroedov S. K., Svetlov A. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 1 (21), pp. 105–115. [In Russian]
 4. Voevodin V. V., Kuznetsov Yu. A. *Matritsy i vychisleniya* [Matrixes and computations]. Moscow: Nauka, 1984, 320 p. [In Russian]
 5. Kuroedov S. K., Svetlov A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of an International symposium Reliability and Quality]. 2014, vol. 2, pp. 52–57. [In Russian]
 6. Kuroedov S. K., Svetlov A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of an International symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 2, pp. 50–54. [In Russian]
 7. Knyaz'kov A. V., Kuroedov S. K., Svetlov A. V. *Inzhenernye i nauchnye prilozheniya na baze tekhnologii National Instruments NIDays-2016: sb. tr. XV Mezhdunar. konf. (Moskva, 25 noyabrya 2016 g.)* [Engineering and scientific applications on the basis of National Instruments NIDays-2016: proceedings of XV International scientific and practical conference (Moscow, November 25th, 2014)]. Moscow: DMK Press, 2016, pp. 151–153. [In Russian]
 8. Kuroedov S. K., Svetlov A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of an International symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 2, pp. 144–147. [In Russian]

Куроедов Сергей Константинович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Kuroedov Sergey Konstantinovich

Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department of radio
engineering and radio electronic systems,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Светлов Анатолий Вильевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Svetlov Anatoliy Vil'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of radio
engineering and radio electronic systems,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Смогунов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра теоретической и прикладной
механики и графики, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Vladimir.smogunov@mail.ru

Smogunov Vladimir Vasil'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of theoretical and applied
mechanics and graphics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Чураков Петр Павлович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

Churakov Petr Pavlovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of information-measuring
technology and metrology,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Куроедов, С. К. Диагностические модели электрических цепей с сосредоточенными параметрами / С. К. Куроедов, А. В. Светлов, В. В. Смогунов, П. П. Чураков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 63–76. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-5.