

УДК 621.3

© 2013 г. **Н.В. Киншт**, д-р техн. наук,
Н.Н. Петрунько, канд. техн. наук,
П.В. Кац

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПРИ ЛИНЕЙНЫХ СВЯЗЯХ МЕЖДУ ИСКОМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Рассматриваются две модели диагностируемой электрической цепи – модель с неизвестными параметрами в матричной форме и новая модель с линейно связанными характеристиками элементов – с ограничениями и без ограничений на количество действующих источников и измеряемых параметров. Показано, что такая задача имеет аналитическое решение. Приводятся примеры.

Ключевые слова: электрическая цепь, диагностика, математическая модель.

Введение

Теория диагностики электрических цепей (ДЭЦ) явилась симбиозом классической теории электрических цепей и формализации подходов, присущих теории технической диагностики. Прошло значительное время, сформулировано и решено множество теоретических и прикладных задач ДЭЦ. Эксплуатационные свойства электрических цепей (ЭЦ) однозначно задаются ее топологией и совокупностью значений параметров элементов, а именно эти категории определяют техническое состояние ЭЦ. Поскольку изменения топологии ЭЦ в процессе производства или эксплуатации могут интерпретироваться как экстремальные изменения параметров ее элементов, оказывается целесообразным при формулировке задачи ДЭЦ считать топологию известной и допускать возможным лишь изменение параметров ЭЦ. Техническое диагностирование – процесс определения технического состояния объекта диагностирования с заданной точностью. Применительно к ЭЦ для определения их технического состояния достаточно определить параметры всех элементов.

Основываясь на достижениях классической теории электрических цепей, один из самых естественных первоначальных подходов к диагностике электрических цепей – представление диагностируемой ЭЦ в виде пассивного многополюсника. Параметры этого многополюсника подлежат определению. Пионером в постановке и систематическом изучении такой задачи являются Р.С. Берковиц (R. S. Berkowitz) и его коллеги [1, 2]. В его постановке рассматривается возможность диагностики пассивного многополюсника, некоторые из выводов которого счи-

таются доступными как для подачи входных сигналов, так и для измерения реакций, а некоторые – частично доступными, на которых допускаются только измерения реакций, причем все внутренние параметры многополюсника считаются неизвестными. В этих случаях диагностической моделью служат матрицы функций ЭЦ.

Одна из основных проблем решения поставленной задачи – нелинейность зависимостей измеренных параметров от внутренних искомым параметров ЭЦ даже при линейности ЭЦ как таковой.

В этой связи одним из эффективных способов упрощения этих нелинейных связей является разумная замена переменных. Именно в качестве первоначальной цели решения вместо расчета самих внутренних параметров элементов ставится задача отыскания некоторой матрицы параметров ЭЦ, элементы которой линейно связаны с этими параметрами элементов. Такими матрицами могут явиться матрицы узловых проводимостей, контурных сопротивлений и другие матрицы смешанных параметров.

Значительный интерес к диагностике пассивного многополюсника при различных предположениях проявили К.С. Демирчян и П.А. Бутырин [3] и др. [4]. Основное предположение заключается в доступности всех точек электрической цепи. Так, если в качестве тестовых воздействий рассматриваются источники э.д.с., а в качестве измеренных параметров – токи в ветвях, используются матрицы входных и взаимных проводимостей ЭЦ. Либо если в качестве тестовых воздействий рассматриваются источники тока, а в качестве измеренных параметров – узловые потенциалы, то используются матрицы входных и передаточных сопротивлений; наконец, могут применяться различные гибридные матрицы. Важными методическими результатами этих работ можно назвать удачное матричное представление совокупности диагностических экспериментов, а также доведение результатов расчетов до матриц узловых проводимостей или матриц контурных сопротивлений, дающих возможность легко интерпретировать их в матрицы параметров ветвей.

В типичной задаче ДЭЦ в процессе эксплуатации, с точки зрения теории ЭЦ, заданы: топология ЭЦ, входные воздействия и некоторые параметры ЭЦ. Кроме того, известны реакции цепи на входные воздействия. Определению подлежат неизвестные параметры элементов. Как правило, параметры не всех элементов ЭЦ подвержены изменению в процессе производства или эксплуатации; некоторые из них можно считать известными. Эта идея и положена в основу второй концепции – базисной задачи ДЭЦ [4], которая, при наличии ее решения, разрешается линейными процедурами.

Базисная задача подразумевает, что топология ЭЦ задана максимально подробно: в каждой ветви имеется не более одного источника и одного полного сопротивления Z_k . Подразумевается, что неизвестными могут оказаться только параметры пассивных элементов. Соответствующие ветви образуют подмножество \mathbf{N} , принадлежащее множеству всех ветвей \mathbf{P} : $\mathbf{N} \subseteq \mathbf{P}$. Значения известных пассивных параметров и источников заданы точно. Все неизвестные параметры друг от друга независимы. Диагностический эксперимент подразумевает однократ-

ным, т. е. входными воздействиями считаются источники, действующие в ЭЦ. Множество измеренных параметров состоит из двух подмножеств: на подмножестве ветвей \mathbf{M}_I , измеряются токи, на подмножестве ветвей \mathbf{M}_U – напряжения. Наконец, критерием решения задачи ДЭЦ считаем нахождение точных значений всех искомым параметров Z_k , $k \in \mathbf{N}$, на основе имеющейся информации. Как видно, рассматриваемые модели значительно различаются. Вместе с тем на фундаментальном уровне они имеют точки соприкосновения, которые позволяют дальнейшее развитие теории ДЭЦ [5].

Пассивный многополюсник с неизвестными параметрами

Рассматривается пассивный многополюсник \mathbf{N} с $(n+1)$ узлами, внутренняя структура которого неизвестна. Первые n узлов считаются независимыми, последний узел – базисным, потенциал которого принят равным нулю [3, 5, 6]. Обратимся к задаче определения его параметров. В качестве диагностической модели примем матрицу узловых проводимостей – \mathbf{Y} . В соответствии с методом узловых потенциалов основное уравнение для анализа электрического режима имеет вид:

$$\mathbf{Y}\mathbf{U} = \mathbf{J}, \quad (1)$$

где $\mathbf{U} = \text{col}[U_1 \dots U_n]$, $\mathbf{J} = \text{col}[J_1 \dots J_n]$ – векторы узловых напряжений и узловых источников токов;

$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$ – квадратная матрица узловых проводимостей.

Матрица \mathbf{Y} содержит прозрачную информацию о топологии ЭЦ, поскольку диагональные члены Y_{ii} являются суммами проводимостей ветвей, инцидентных i -му узлу, а члены $Y_{ik} = Y_{ki}$ являются суммами проводимостей ветвей, одновременно инцидентных i -му и k -му узлам (со знаком минус); ясно, что если в цепи нет параллельных ветвей, то на основе матрицы \mathbf{Y} легко восстановить структуру и численные значения проводимостей всех ветвей.

Проводят n экспериментов, организуя тестовое воздействие на узлы источниками тока (рис. 1а); для k -го эксперимента имеем $\mathbf{J}_k = [J_{1k}, \dots, J_{nk}]$.

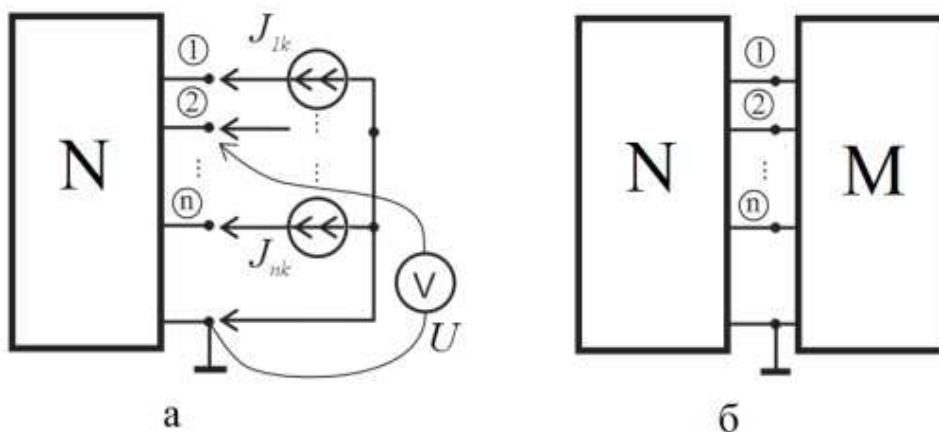


Рис. 1. К определению параметров узловых сопротивлений пассивного многополюсника.

При этом в каждом эксперименте на n узлах наблюдаются векторы напряжений (относительно базисного узла) $\mathbf{U}_k = (\mathbf{Y})^{-1} \mathbf{J}_k$, ($k = 1, \dots, n$). Объединив векторы входных токов всех экспериментов в квадратную матрицу токов $\mathbf{J}_\square = [\mathbf{J}_1, \dots, \mathbf{J}_n]$, составляем квадратную матрицу напряжений

$$\mathbf{U}_\square = \begin{bmatrix} U_{11} & \dots & U_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ U_{n1} & \dots & U_{nn} \end{bmatrix} = [\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_n],$$

где \mathbf{J}_k – вектор-столбец входного тока в k -м эксперименте, $k = 1, \dots, n$; \mathbf{U}_k – вектор-столбец измеренного в k -м эксперименте напряжения, $k = 1, \dots, n$. Тогда искомая матрица узловых проводимостей найдется как

$$\mathbf{Y}^n = \mathbf{J}_\square \mathbf{U}_\square^{-1} = [\mathbf{J}_1, \dots, \mathbf{J}_n][\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_n]^{-1}. \quad (2)$$

Пассивный многополюсник с частично известными параметрами

Пусть в сложной ЭЦ множество ветвей с неизвестными параметрами может быть выделено в отдельный многополюсник со всеми доступными узлами (рис. 1б). Тогда, если \mathbf{Y}_0 – матрица эквивалентных узловых проводимостей многополюсника с известными параметрами \mathbf{M} , то в результате проведения диагностических экспериментов искомую матрицу узловых параметров многополюсника \mathbf{N} получим в виде:

$$\mathbf{Y}^n = \mathbf{J}_\square \mathbf{U}_\square^{-1} = [\mathbf{J}_1, \dots, \mathbf{J}_n][\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_n]^{-1} - \mathbf{Y}_0. \quad (3)$$

Пример 1. Диагностика многополюсника.

Цепь имеет 4 узловые точки и описывается (априори) следующей матрицей узловых проводимостей:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 + Y_2 + Y_4 & -Y_2 & -Y_4 & 0 \\ -Y_2 & Y_2 + Y_3 + Y_6 + Y_7 & -Y_7 & -Y_6 \\ -Y_4 & -Y_7 & Y_4 + Y_7 + Y_8 & -Y_8 \\ 0 & -Y_6 & -Y_8 & Y_5 + Y_6 + Y_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & -2 & -1 & 0 \\ -2 & 10 & -2 & -5 \\ -1 & -2 & 7 & -4 \\ 0 & -5 & -4 & 11 \end{bmatrix}$$

Серым цветом на рис.2 отмечены элементы с известными параметрами.

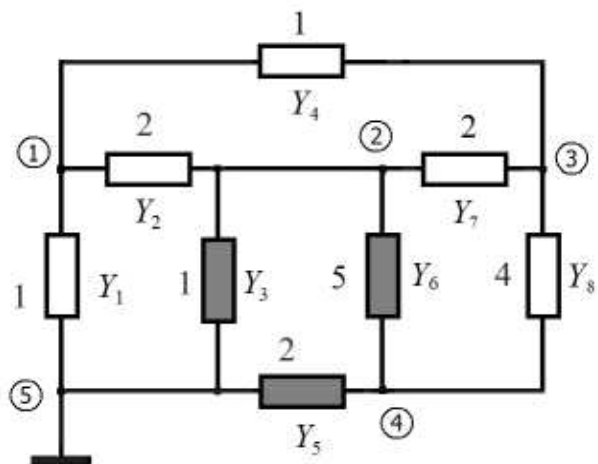


Рис. 2. Схема электрической цепи к примеру 1.

Зададим матрицу входных воздействий

$$\mathbf{J}_R = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 13 \end{bmatrix},$$

затем, для примера, получим матрицу «измеренных» узловых напряжений:

$$\mathbf{U}_R = \begin{bmatrix} 4.13 & 1.35 & 0.23 & 2.81 \\ 2.19 & 1.58 & 0.25 & 3.67 \\ 2.26 & 2.24 & 0.40 & 3.88 \\ 1.82 & 1.53 & 0.26 & 4.26 \end{bmatrix}.$$

В соответствии с выражением (1) получим матрицу проводимостей:

$$\mathbf{Y}^n = \mathbf{J}_\square \mathbf{U}_\square^{-1} - \mathbf{Y}_0 = \begin{bmatrix} 4.01 & -1.99 & -0.99 & 0 \\ -1.96 & 3.77 & -1.95 & 0.12 \\ -0.98 & -2.12 & 7.03 & -3.94 \\ -0.05 & 0.34 & -4.08 & 3.82 \end{bmatrix},$$

что вполне соответствует точности моделирования и постановке задачи.

При постановке задач ДЭЦ зачастую целесообразно привлекать дополнительные правдоподобные гипотезы, вводя добавочные соотношения, связывающие между собой искомые параметры. Одной из наиболее интересных гипотез, имеющих широкое практическое приложение и теоретическое значение, является гипотеза о равенстве некоторых неизвестных параметров либо об их пропорциональности. Для краткости в дальнейшем будем говорить, что неизвестные параметры некоторого подмножества $N_s \subset N$, ($s = 1, \dots, r$) отождествляются. Под этим будем понимать, что для каждой пары π_i, π_m ($i, m \in N_s$) неизвестных параметров справедливы соотношения вида

$$\pi_m = \lambda_{km} \pi_k, \quad (4)$$

где λ_{km} – коэффициенты отождествления. Таким образом, значения этих параметров определяются r "представителями" своих подмножеств. Такого рода соотношения являются простейшим видом функциональных зависимостей между неизвестными параметрами, и их оказывается возможным принять, например, в следующих случаях. При диагностировании неизвестных параметров интегральных микросхем (ИМС) иногда можно считать, что все активные элементы одной ИМС, полученные одновременно в ходе единого технологического процесса, тождественны между собой, хотя и отличаются для различных экземпляров ИМС.

Аналогично при постановке задачи диагностирования однородной линии с распределенными параметрами, представленной своей цепной схемой замещения, гипотеза об отождествлении ее параметров оказывается весьма плодотворной. Далее, если ЭЦ, подвергаясь дестабилизирующим факторам (например, таким как теплота, холод, радиация, старение или произвольная их комбинация), изменила свои параметры, то применительно к группам элементов, имеющих одинаковую

природу, конструкцию и технологию изготовления, можно использовать принцип отождествления параметров. При этом соответствующие коэффициенты пропорциональности могут быть приняты на основе соотношения между параметрами в номинальном или начальном режиме работы цепи. Наконец, принцип отождествления параметров может быть применен к задаче анализа тестового диагностирования.

Ясно, что при наличии соотношений (4) непосредственно воспользоваться решениями (2, 3) невозможно. Здесь требуется дополнительный анализ. Так, например, если в качестве основной матрицы ЭЦ используется матрица узловых проводимостей \mathbf{Y} , то ее в данном контексте можно представить в виде суммы:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_0 + \sum_{i=1}^r \pi_i \mathbf{\Lambda}_i,$$

где $\mathbf{\Lambda}_k$ – соответствующая матрица коэффициентов отождествления. Теперь в основном уравнении (1) можно выделить искомые параметры в явном виде. Так, для единственного k -го эксперимента выражение (1) примет вид:

$$\sum_{i=1}^r \pi_i \mathbf{\Lambda}_i \mathbf{U}_k = [\mathbf{\Lambda}_1 \mathbf{U}_k, \dots, \mathbf{\Lambda}_r \mathbf{U}_k] \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \vdots \\ \pi_r \end{bmatrix} = \mathbf{J}_k - \mathbf{Y}_0 \mathbf{U}_k, \quad (5)$$

в результате получим:

$$\begin{bmatrix} \pi_1 \\ \vdots \\ \pi_r \end{bmatrix} = [\mathbf{\Lambda}_1 \mathbf{U}_k, \dots, \mathbf{\Lambda}_r \mathbf{U}_k]^{-1} (\mathbf{J}_k - \mathbf{Y}_0 \mathbf{U}_k). \quad (6)$$

Пример 2. Диагностика многополюсника с отождествлением параметров.

Проиллюстрируем результат на примере схемы на рис. 2. Для известного фрагмента ЭЦ имеем:

$$\mathbf{Y}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_3 + Y_6 & 0 & -Y_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_6 & 0 & Y_5 + Y_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -5 & 0 & 7 \end{bmatrix}.$$

Допустим, что параметры некоторых неизвестных элементов схемы связаны между собой следующими соотношениями: $2Y_1 = Y_2 = Y_7$; $4Y_4 = Y_8$.

При этом матрицы коэффициентов отождествления для первой и второй групп элементов имеют вид:

$$\mathbf{\Lambda}_1 = \begin{bmatrix} 3 & -2 & 0 & 0 \\ -2 & 4 & -2 & 0 \\ 0 & -2 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{\Lambda}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 5 & -4 \\ 0 & 0 & -4 & 4 \end{bmatrix}.$$

Зададим вектор \mathbf{J}_R входных воздействий: $\mathbf{J}_R = [10 \ 0 \ 0 \ 0]^T$.

При этом получим вектор \mathbf{U} реакций узловых напряжений (с точностью до

двух знаков после запятой): $U = [4.16 \quad 2.20 \quad 2.26 \quad 1.82]^T$.

Поскольку в измеренном векторе напряжений 4 элемента, то соответствующие матрицы являются переопределенными, так как теоретически нужно определить лишь два параметра. Здесь можно разрешить соотношение (6), воспользовавшись методом наименьших квадратов. Теперь вычислим значения Y_1 и Y_4 , воспользовавшись соотношением:

$$Y_R = ([\Lambda_1 U \quad \Lambda_2 U]^T [\Lambda_1 U \quad \Lambda_2 U])^{-1} [\Lambda_1 U \quad \Lambda_2 U]^T (J_R - Y_0 U),$$

откуда $Y_1 = 1.01$, $Y_4 = 0.99$. Соответственно: $Y_2 = Y_7 = 2.02$, $Y_8 = 3.96$.

Пример 3. Диагностика интегральной микросхемы.

Для примера диагностирования выберем ИМС (рис. 3), построенную на принципе транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ).

Испытания данной схемы представляют собой измерение ее доступных параметров режима в определенных стандартных включениях, а именно: измерение входных токов и выходных напряжений при подаче на вход 1 или 0. Для дальнейших расчетов вводится схема замещения транзистора, приведенная на рис. 4.

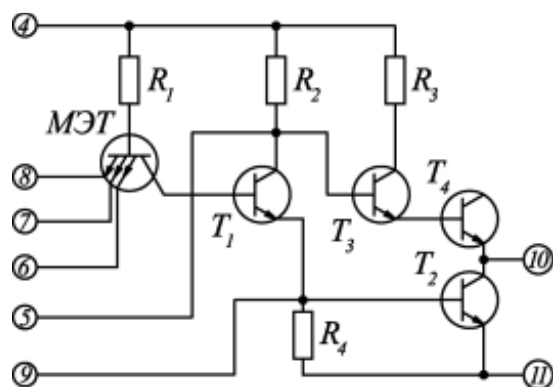


Рис. 3. Схема ТТЛ.

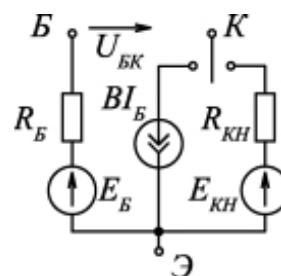


Рис. 4. Схема замещения транзистора.

На схеме замещения введены обозначения: E_{KH} , R_{KH} – эквивалентные ЭДС и динамическое сопротивление в схеме замещения цепи коллектор-эмиттер в режиме насыщения; B – статический коэффициент усиления; E_B , R_B – ЭДС и динамическое сопротивление в цепи база-эмиттер в режиме малых либо больших токов. Режимы работы данной схемы описываются следующими уравнениями:

$$U_{KЭ} = E_{KH} + R_{KH} I_K, \quad I_K \leq B I_B - \text{режим насыщения};$$

$U_{KЭ} \geq E_{KH} + R_{KH} I_K, \quad I_K = B I_B - \text{активный режим (включает в себя режим отсечки)}.$

Для примера выберем состояние ИМС, когда на все три логических входа подается высокий уровень сигнала. После некоторых преобразований схема замещения получит вид, представленный на рис. 5. Известными считаем следующие параметры элементов ЭЦ:

$$R_1 = 4 \text{ кОм}; R_2 = 1.6 \text{ кОм}; R_3 = 130 \text{ Ом}; R_4 = 1 \text{ кОм}; E_1 = 5 \text{ В}; E_{\text{вх}} = 4 \text{ В};$$

$$R_H = 1 \text{ кОм}; B = 100; B_{\text{инв}} = 0.05, E_{BM} = E_{B1} = E_{B2} = E_{B3} = E_{B4} = E_B = 0,7 \text{ В};$$

$$E_{KH1} = E_{KH2} = E_{KH} = 0.1 \text{ В}.$$

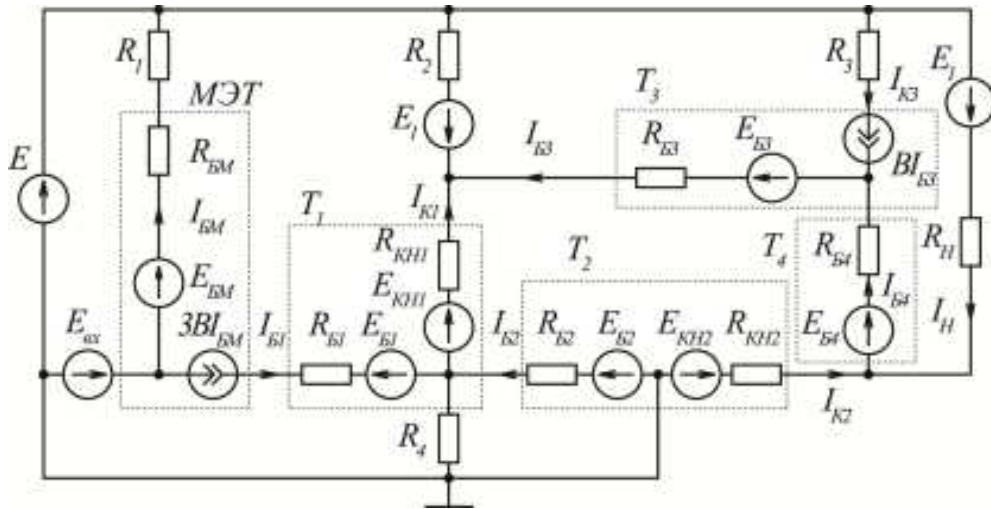


Рис. 5. Схема ТТЛ с эквивалентным замещением транзисторов.

Составим матрицу контурных сопротивлений системы с учетом управляемых источников тока:

$$\mathbf{Z}_K = \begin{bmatrix} R_1 + R_{БМ} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3B_{инв}R_4 & R_2 + R_{КН1} + R_4 & R_2 & -R_4 & 0 \\ 0 & R_2 & R_2 + R_{Б3} + R_{Б4} + R_H + BR_{Б4} + BR_H & 0 & -R_H \\ -3B_{инв}R_4 & -R_4 & 0 & R_{Б2} + R_4 & 0 \\ 0 & 0 & -R_H - BR_H & 0 & R_{КН2} + R_H \end{bmatrix},$$

где R_n – сопротивление соответствующих элементов.

Основываясь на принципе отождествления параметров активных элементов в рамках одной схемы, допустим, что параметры транзисторов одинаковы. Это дает возможность получить следующие соотношения:

$$R_{КН1} = R_{КН2} = R_{КН}; \quad 3R_{БМ} = R_{Б1} = R_{Б2} = R_{Б3} = R_{Б4} = R_B.$$

Представим матрицу \mathbf{Z}_K в виде суммы ее элементов, для того чтобы сгруппировать (выделить) известные и неизвестные величины:

$$\mathbf{Z}_K = \mathbf{Z}_0 + R_B \Lambda_1 + B \Lambda_2 + B_{инв} \Lambda_3 + R_{КН} \Lambda_4 + BR_B \Lambda_5,$$

$$\mathbf{Z}_K = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 + R_4 & R_2 & -R_4 & 0 \\ 0 & R_2 & R_2 & 0 & -R_H \\ 0 & -R_4 & 0 & R_4 & 0 \\ 0 & 0 & -R_H & 0 & R_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} R_B +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1000 & 0 & 0 \end{bmatrix} B + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} B_{инв} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_{KH} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} BR_B,$$

где \mathbf{Z}_0 – матрица известных сопротивлений; Λ_k – соответствующая матрица коэффициентов отождествления.

Таким образом, получаем возможность вынести неизвестные величины из матриц в виде отдельного сомножителя.

Основное уравнение теперь можно записать следующим образом:

$$(\mathbf{Z}_0 + R_B \Lambda_1 + B \Lambda_2 + B_{инв} \Lambda_3 + R_{KH} \Lambda_4 + BR_B \Lambda_5) \Delta \mathbf{I} = \Delta \mathbf{E}.$$

Для нахождения пяти неизвестных из этого уравнения в общем случае требуется проведение пяти численных экспериментов, однако в данном случае достаточно и одного. Это обусловлено тем, что в каждом эксперименте ЭЦ описывается пятью уравнениями, по числу выбранных контуров, что дает возможность сократить количество проводимых измерений. Для примера расчета реакции контурных токов проведем эксперимент, изменив входное напряжение и получив соответствующие реакции контурных токов:

$$\Delta \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Delta \mathbf{I}_K = \mathbf{Z}_K^{-1} \Delta \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 4.84 \cdot 10^{-5} \\ -1.09 \cdot 10^{-6} \\ 3.56 \cdot 10^{-8} \\ 4.41 \cdot 10^{-6} \\ 3.36 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}.$$

Преобразуем основное уравнение таким образом, чтобы неизвестные остались в левой части равенства:

$$\Lambda_1 \Delta \mathbf{I} R_B + \Lambda_2 \Delta \mathbf{I} B + \Lambda_3 \Delta \mathbf{I} B_{инв} + \Lambda_4 \Delta \mathbf{I} R_{KH} + \Lambda_5 \Delta \mathbf{I} BR_B = \Delta \mathbf{E} - \mathbf{Z}_0 \Delta \mathbf{I}.$$

Тогда, подставляя имеющиеся числовые значения, получим:

$$\begin{bmatrix} 1.61 \cdot 10^{-5} \\ 0 \\ 7.11 \cdot 10^{-8} \\ 4.41 \cdot 10^{-6} \\ 0 \end{bmatrix} R_B + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.56 \cdot 10^{-5} \\ 0 \\ -3.56 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix} B + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.15 \\ 0 \\ -0.15 \\ 0 \end{bmatrix} B_{инв} + \\ + \begin{bmatrix} 0 \\ -1.09 \cdot 10^{-6} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} R_{KH} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.56 \cdot 10^{-8} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} BR_B = \begin{bmatrix} 6.45 \cdot 10^{-3} \\ 7.19 \cdot 10^{-3} \\ 5.01 \cdot 10^{-3} \\ -5.50 \cdot 10^{-3} \\ -3.32 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}.$$

Из полученных данных видно, что проведения единственного эксперимента было достаточно. Решив систему алгебраических уравнений, получим следующие значения неизвестных:

$$R_B = 400 \text{ Ом}; R_{KH} = 70.08 \text{ Ом}; B = 93.39; B_{инв} = 0.05; BR_B = 37356 \text{ Ом}.$$

Заключение

Рассмотрены модели диагностируемой электрической цепи – в виде пассивного многополюсника, подвергающегося тестовому диагностированию со стороны доступных зажимов, и (базисная) модель однократного диагностического эксперимента, не накладывающая ограничений на количество одновременно действующих источников и измеряемых параметров. Во второй модели сделан акцент на использовании линейных соотношений для связи характеристик искомых параметров. До последнего времени эти модели не имели общих теоретических точек соприкосновения. Впервые показано, что существуют постановки задач, для которых возможно применение как модели пассивного многополюсника, так и модели базисной задачи. Существует перспектива построения некоторой обобщенной модели, в общем виде учитывающей существенные факторы обеих моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Berkowitz R. S.* Conditions for Network-Element-Value Solvability. – IRE Transactions on Circuit Theory, 1962.
2. *Bedrosian S.D., Berkowitz R. S.* Solution Procedure for Single-Element-Kind Networks. - IRE Int. Conv. Rec. Part 2 – Automatic Control, Circuit Theory, 1962.
3. *Демирчян К.С., Бутырин П.А.* Моделирование и машинный расчет электрических цепей. Учеб. пособие для электр. и электроэнерг. спец. вузов. – М.: Высш. школа, 1988.
4. *Киншт Н.В., Герасимова Г.Н., Кац М.А.* Диагностика электрических цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. *Киншт Н.В., Петрунько Н.Н.* Диагностика электрических цепей и систем. – Владивосток: Дальнаука, 2013.
6. *Киншт Н.В., Петрунько Н.Н.* О двух концепциях в теории диагностики электрических цепей // Электричество. – 2012. – №9. – С.59-64.

E-mail:

Киншт Николай Владимирович – kin@iacp.dvo.ru;

Петрунько Наталья Николаевна – pnn@iacp.dvo.ru;

Кац Петр Владимирович – Pkatz@iacp.dvo.ru.