

Диагностика линейных электрических цепей по узлам с наименьшим числом неизвестных параметров

КУРГАНОВ С.А., ФИЛАРЕТОВ В.В.

УГТУ, Ульяновск, Россия

Совершенствуются метод звезд и метод связи–дерево при диагностике линейных электрических цепей. Для уменьшения числа экспериментов и измерений предлагается выполнять диагностику по узлам с наименьшей степенью. Подход иллюстрируется примерами диагностики схем с доступными и недоступными для измерений узлами. В схемах с доступными для измерений узлами предлагается проводить измерения на ветвях дерева, инцидентных узлам с наименьшей степенью. Первоочередными для диагностики выбираются именно такие ветви. Диагностика их параметров снижает необходимое число экспериментов и, следовательно, измерений. Для диагностики последующих ветвей, инцидентных узлам с большей степенью, дополнительные эксперименты могут не потребоваться, так как параметры некоторых ветвей уже известны. В схемах с частично недоступной для измерений схемой диагностика параметров ветвей дополнительно основана на составлении схемных определителей компенсированных схем недоступной части схемы. Практическая направленность статьи заключается в снижении числа экспериментов и измерений при диагностике линейных электрических цепей.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрическая цепь, диагностика по узлам, степень узла, многократный эксперимент, компенсация подсхем, нулор

О диагностике доступных и недоступных схем и подсхем. Диагностика электрических цепей состоит в определении неизвестных параметров элементов по результатам эксперимента. Если все узлы исследуемой схемы доступны для измерений и подключения тестовых источников, то используется метод узловых сопротивлений (МУС). Путем многократного эксперимента получается матрица узловых проводимостей для нахождения проводимостей элементов [1].

Базисная задача определения параметров недоступных элементов решается однократным экспериментом при наличии доступных узлов (ветвей) в количестве, не меньшем числа неизвестных элементов. При этом используются блочно-матричные системы уравнений по законам Кирхгофа или методам контурных токов и узловых напряжений [2]. В компенсированной схеме (КС) неизвестные элементы замещены нораторами, управляемыми фиксаторами в виде нуллатора и независимого источника (НИ) измеренной переменной [3, 4].

Если элементы с недоступными полюсами образуют подсхему, то требуется меньше доступных узлов, чем неизвестных параметров, но не менее числа n независимых полюсов неавтономной и автономной (с НИ) подсхемы. Параметры подсхемы получаются из блочно-матричных узловых уравнений при многократном эксперименте [5]. В символической форме применяются схемно-алгебраиче-

ские формулы (САФ) для искомым параметров в виде отношения схемных определителей КС [6] или САФ компенсированной подсхемы [7].

Диагностика электрических цепей по частям предложена для схем с доступными узлами [8]. Уравнения с искомыми проводимостями ветвей и источников тока, управляемых напряжением (ИТУН), составляются и решаются последовательно по звездам (узлам). В отличие от МУС [1] матричное уравнение не формируется для всей схемы. Для разреженных цепей число уравнений, формируемых по узлам, меньше n , также уменьшается число экспериментов и измерений. Однако оптимальная последовательность диагностируемых узлов в [8] не обсуждается, в примере использованы узлы с максимальной степенью, что не приводит к минимальному числу экспериментов и измерений.

В настоящей работе решается задача уменьшения числа экспериментов и измерений при диагностике схем и подсхем как с доступными, так и недоступными полюсами.

Схемный подход к диагностике по методу звезд. Математической моделью метода звезд для u -схемы (рис. 1) является система k узловых уравнений для узла v , которые составляются для k экспериментов относительно k неизвестных значений проводимости ветвей [8]. Коэффициентами при неизвестных являются напряжения на ветвях. Следовательно, переход от узлового анализа к диагностике выпол-

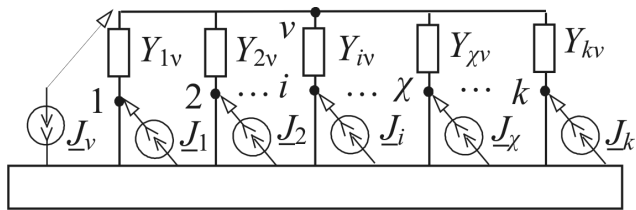


Рис. 1. Электрическая цепь с доступными узлами: $J_1, J_2, \dots, J_k, \dots, J_v$ – тестовые источники

няется по аналогии: узловая проводимость \Rightarrow напряжение на ветви, узловое напряжение \Rightarrow неизвестная проводимость, узловый ток \Rightarrow ток узла, соответствующий эксперименту.

Используя обратную аналогию, можно видеть, что в диагностической схеме замещения узел n расщепляется на узлы: v^1, v^2, \dots, v^k , образуя k двухузловых подсхем с объединенными (заземленными) узлами $1, 2, \dots, i, \dots, k$ (рис. 2,а). Подсхема i представляется параллельным соединением проводимости y_i , источника тока \underline{J}_i и $k-1$ ИТУН с параметрами $Y_{i\chi}$ ($i, \chi=1, 2, \dots, k; i \neq \chi$), управляемых напряжениями других подсхем (рис. 2,а). Ток источника \underline{J}_i состоит из тока тестового источника и токов ветвей с известными проводимостями узла v . Номера подсхем и экспериментов совпадают с нумерацией узлов.

Формальным параметрам схемы замещения (рис. 2,а) соответствуют фактические диагностические переменные и параметры (рис. 2,б): проводимости y_i – напряжение \underline{U}_{iv}^i , измеренное в узле i эксперименте с номером i ; параметру ИТУН Y_{ik} – напряжение \underline{U}_{kv}^i , измеренное в узле k эксперименте i ; напряжению \underline{U}_i – проводимости Y_{iv} . Схемный подход к диагностике методом звезд позволяет автоматизировать определение проводимостей с помощью программы символьного анализа электронных цепей CirSym, разработанной В.В. Филаретовым [9–11]. Онлайн-сервис программы имеется на сайте <http://intersyn.net/cirsym.html>.

Диагностика доступных схем и подсхем по узлам с наименьшей степенью. Для получения минималь-

ных по сложности выражений схемных определителей следует, в первую очередь, выделять проводимости, инцидентные узлам с наименьшей степенью (правило минимума) [9, 11]. Сложность диагностики узла зависит не от числа всех инцидентных этому узлу элементов, а от числа k неизвестных параметров. Максимальная среди диагностируемых узлов степень k_m равна числу требуемых экспериментов. Этот показатель может совпадать по значению со степенью узла, поэтому назовем его диагностической степенью или для краткости – степенью.

При переходе от узла к узлу увеличивается число известных параметров и снижаются степени смежных узлов. Число экспериментов и измерений уменьшится в большей мере, если последовательность узлов будет включать, в первую очередь, узлы с наименьшей степенью из оставшихся узлов, что доказывает правило минимума для диагностики по узлам. Из двух и более узлов с одинаковой степенью следует выбирать узел, смежный узлу с наименьшей степенью среди оставшихся узлов или узел с ветвью, замыкающей путь, образованный ветвями с известными параметрами. В результате получается оптимальная последовательность узлов.

Схемно-алгебраический алгоритм диагностики по узлам состоит из шагов:

1. В каждом из k экспериментов используется один и тот же источник при обеспечении ненулевого задающего тока диагностируемого узла и независимости режимов цепи во всех экспериментах.

1.1. Выделить в оптимальной последовательности узлов s узлов, не включающих на момент диагностики ветвей с известными параметрами.

1.2. Если $s=2k$ (число клемм источников в k экспериментах), то подключить к каждому узлу одну из клемм источника в одном из k экспериментов.

1.3. Если $s < 2k$, то оставшиеся свободными клеммы подключить к любым парам узлов, повторяющихся с использованными узлами.

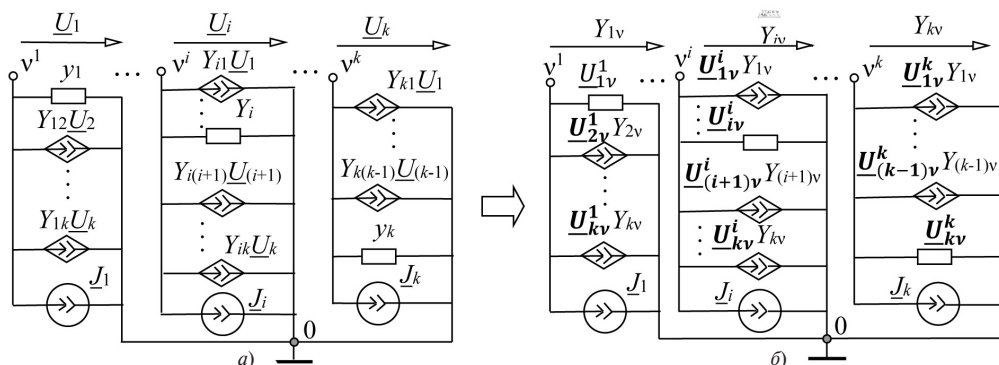


Рис. 2. Схема замещения (а) для диагностики узла v ; переход к фактическим параметрам (б)

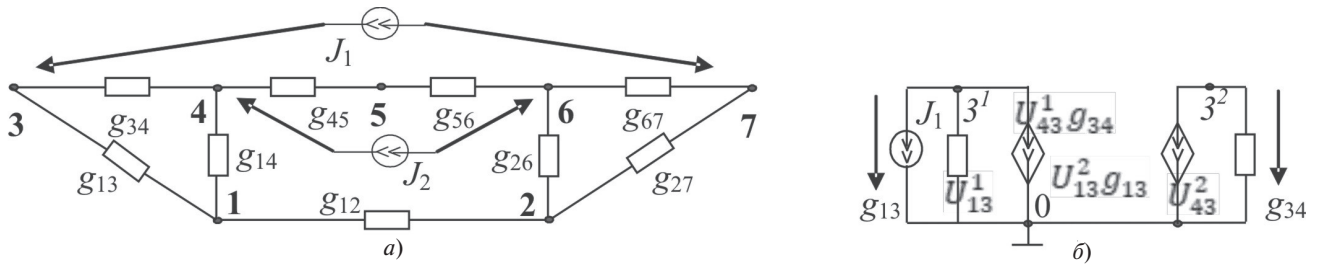


Рис. 3. Схема с доступными узлами: жирными линиями показаны ветви дерева (а); схема замещения для нахождения проводимостей узла 3 (б)

Таблица 1

Диагностика схемы по узлам с наименьшей степенью в порядке 3-4-5-7-6-1 (рис. 3,а)

№ узла	Степень	№ экспериментов	Нахождение проводимостей по 11 измерениям: $U_{13}^1, U_{13}^2, U_{43}^1, U_{43}^2, U_{45}^1, U_{45}^2, U_{56}^1, U_{27}^1, U_{27}^2, U_{67}^1, U_{67}^2$
3	2	1, 2	$g_{13} = -U_{43}^2 J_1 / D_3; g_{34} = U_{13}^2 J_1 / D_3$, где $D_3 = U_{13}^1 U_{43}^2 - U_{13}^2 U_{43}^1$
4	2	1, 2	$g_{45} = [g_{34}(-U_{41}^1 U_{43}^2 + U_{41}^2 U_{43}^1) - U_{41}^1 J_2] / D_4;$ $g_{14} = [g_{34}(-U_{43}^1 U_{45}^2 + U_{43}^2 U_{45}^1) + U_{45}^1 J_2] / D_4;$ где $D_4 = U_{41}^1 U_{45}^2 - U_{41}^2 U_{45}^1; U_{41}^i = U_{43}^i - U_{13}^i; i=1,2$
5	1	1	$g_{56} = g_{45} U_{45}^1 / U_{56}^1$
7	2	1, 2	$g_{27} = U_{67}^2 J_1 / D_7; g_{67} = -U_{27}^2 J_1 / D_7$, где $D_7 = U_{27}^1 U_{67}^2 - U_{27}^2 U_{67}^1$
6	1	1	$g_{26} = (g_{56} U_{56}^1 - g_{67} U_{67}^1) / (U_{67}^1 - U_{27}^1)$
1	1	1	$g_{12} = (g_{14} U_{41}^1 - g_{13} U_{13}^1) / (U_{45}^1 - U_{41}^1 + U_{56}^1 + U_{67}^1 - U_{27}^1)$

1.4. Если $s > 2k$, то уменьшить число s путем изменения порядка диагностирования до значения не более $2k$. Перейти к п. 1.2.

2. Выбрать очередной узел из оптимальной последовательности узлов. Построить для выбранного узла схему замещения (рис. 2,б). При наличии ветвей с известными проводимостями учесть их значения токов в источниках тока $J_1, \dots, J_i, \dots, J_k$.

3. Получить выражения неизвестных параметров узла, используя метод схемных определителей (МСО) [6, 7, 11] или программу CirSym [10]. Перейти к п. 2, если остались узлы с неизвестными параметрами.

Пример диагностики доступной схемы по узлам с наименьшей степенью. Все узлы схемы (рис. 3,а) [8] доступны для измерения напряжений и подключения тестовых источников тока. Найти параметры всех проводимостей.

По методу «связи–дерево» [8] в отличие от предлагаемого алгоритма диагностика выполняется в последовательности узлов 1-2-3-4-5-7, т.е. начиная с узла с максимальной степенью 3. Соответствующее решение потребовало 3 эксперимента и 14 измерений. Следуя алгоритму 1–3, получается решение с последовательностью узлов 3-4-5-7-6-1 (табл. 1).

Формулы для искоемых проводимостей получаются по МСО из расчета схем замещения, построенных по рис. 2,б. Схема замещения для узла 3 дана на рис. 3,б. Параметры, найденные по формулам табл. 1, соответствуют расчету, приведенному в [8]. Как видно, диагностика по узлам с наименьшим числом неизвестных параметров потребовала существенно меньших затрат – 2 эксперимента и 11 измерений.

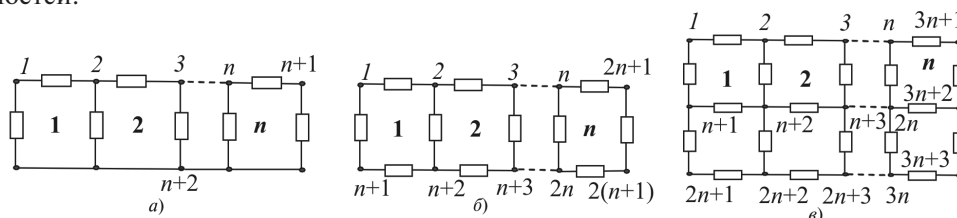


Рис. 4. Многозвенные электрические схемы: цепная (а), лестничная (б) и трехлинейная лестничная (в); 1,2,...,n – номера звеньев

Таблица 2

Число экспериментов и измерений напряжений при диагностике многозвенных цепей по узлам

Диагностика по узлам	Показатели диагностики	Цепная схема	Лестничная схема	Обобщенная лестничная схема
наихудший случай	число экспериментов	$(n+1)$	3	4
	число измерений	$(n+1)(n+1)$	$5,5n+2$	$10n+2$
правило минимума	число экспериментов	2	2	2
	число измерений	$2(n+1)$	$4n+1$	$6n+3$

При чередовании узлов с наименьшей степенью число измерений меняется незначительно, не превышая 12. Так, при порядке узлов 3-5-4-1-7-6 потребуется измерение тех же напряжений и напряжения U_{56}^2 (источник тока J_2 подключен между узлами 2 и 5). Другая последовательность 5-4-3-1-6-7 требует также 2 эксперимента и 12 измерений. Если правило минимума даже не игнорируется [8], а нарушается, то возрастают затраты диагностики. Например, для последовательности: 5-1-2-3-7 требуется 3 эксперимента и 15 измерений.

Диагностика многозвенных схем. Электрические сети обладают высокой разреженностью [8], поэтому представляет интерес сравнение трудоемкости экспериментов (табл. 2) при диагностике многозвенных электрических цепей – цепных (рис. 4,а) и лестничных (рис. 4,б и в) схем [9].

Для цепной схемы (рис. 4,а) наихудшим порядком диагностики является последовательность узлов: $(n+2), 1, 2, \dots, n$. Узел с номером $n+2$ имеет максимальную степень $n+1$, поэтому число экспериментов $\xi = n+1$. В каждом эксперименте измеряются напряжения на ветвях этого узла, в результате число измерений $\chi = (n+1)(n+1)$. Порядок узлов при выборе по правилу минимума: $1, 2, \dots, n, n+1$. Узлы $1, 2, \dots, n$ имеют по 2 неизвестных параметра, а узел с номером $n+1$ – один параметр, поэтому $\xi = 2$. При каждом эксперименте измерения выполняются на $n+1$ ветви дерева, значит $\chi = 2(n+1)$.

Для лестничной схемы (рис. 4,б) наихудшим порядком является выбор узлов с максимальной степенью, равной 3 ($\xi = 3$). При этом по 3 и 2 измере-

ния выполняется на ветвях $n/2$ трехлучевых звезд и $n/2+1$ поперечных смежных звездам ветвях. Всего измерений $\chi = 5,5n+2$. При диагностике по правилу минимума степени узлов $1, 2, \dots, 2n+1$ не превышают двух ($\xi = 2$). По 2 и 1 измерению выполняются на $2n$ и 1 ветви дерева, поэтому $\chi = 4n+1$.

Для обобщенной лестничной схемы (рис. 4,в) наихудший случай наблюдается при диагностике по узлам с максимальным числом неизвестных параметров – 4 ($\xi = 4$). Для числа звеньев n , кратного 4, измерения выполняются в 4-х экспериментах на ветвях $n/2$ четырехлучевых звезд – получается $8n$ измерений. Измеряются также напряжения на поперечных ветвях, не входящих в звезды. Таких ветвей $n+2$, причем на n ветвях выполняются двукратные измерения, а на двух – однократные. Всего $\chi = 10n+2$ измерений.

По правилу минимума достаточно двух экспериментов ($\xi = 2$), чтобы выполнить диагностику в следующем порядке узлов: $1, 2n+1, n+1, 2, 2n+2, n+2, \dots, n, 3n, 2n$ и $3n+1, 3n+3, 3n+2$. Измерения выполняются на $3n+2$ ветвях дерева. При этом на $3n+1$ ветви напряжения измеряются в двух экспериментах, а на одной ветви – в одном эксперименте, поэтому $\chi = 6n+3$.

Показатели диагностики многозвенных схем сведены в столбцы 3–5 табл. 2. Для всех типов схем предлагаемый алгоритм требует проведения минимального числа (двух) экспериментов. Число измерений сокращается в несколько раз – $(n+1)/2$ (цепные схемы) или уменьшается примерно на 1/3 (лестничные схемы) и 2/3 (обобщенные лестничные схемы).

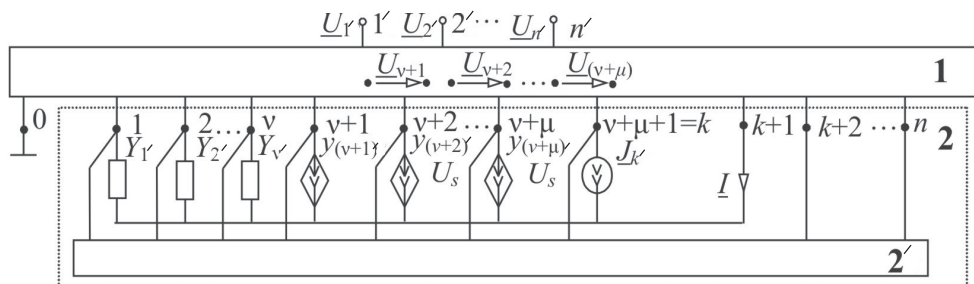


Рис. 5. Электрическая цепь с узлом из ветвей с неизвестными параметрами; $U_{v+1}, U_{v+2}, \dots, U_{v+\mu}$ – управляющие напряжения ИТУН; U_1, U_2, \dots, U_v – узловые напряжения

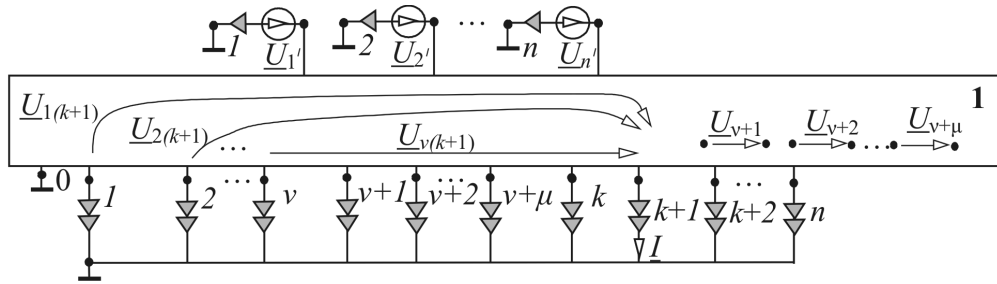


Рис. 6. Компенсированная схема для диагностируемой цепи на рис. 5: 1, 2, ..., v, v+1, v+2, ..., v+μ, v+μ+1=k, k+1, k+2, ..., n – номера нораторов и нуллаторов

Диагностика параметров ветвей узла в недоступной подсхеме. Электрическая цепь в базисе проводимостей делится на подсхемы 1 и 2 (рис. 5) с известными и неизвестными параметрами элементов. Подсхема 1 содержит общие с подсхемой 2 полюса (1, 2, ..., n), собственные узлы и n' = n доступных полюсов с номерами 1', 2', ..., n', которые могут соединяться с базисным узлом или между собой для получения независимых режимов цепи. У подсхемы 2 все полюса внешние и недоступные для измерений.

В подсхеме 2 (рис. 5) обособлен узел с номером k+1, который имеет степень k – содержит k = v+μ+1 элементов с неизвестными параметрами, из которых v проводимостей, μ ИТУН и один НИ тока. Остальная часть подсхемы 2 объединена в подсхему 2'. Требуется определить k параметров ветвей узла.

Построение и определение режима компенсированной схемы. Для схемы на рис. 5 КС строится путем замены подсхемы 2 n нораторами и подключения n' = n фиксаторов напряжения к разомкнутым полюсам 1', 2', ..., n' (рис. 6). Соответствующему эксперименту присваивается номер λ = 1. В остальных k-1 экспериментах (с номерами λ = 2, ..., k) полюс с номером λ-1 соединяется с базисным полюсом. Построение КС для экспериментов с номерами λ = 2, ..., k выполняется аналогично КС для λ = 1 (рис. 6). Для определения режима подсхем на основе КС – тока I, напряжений U1(k+1), U2(k+1), ..., Uv(k+1) и Uv+1, Uv+2, ..., Uv+μ – можно использовать известные программы численного анализа электрических цепей [3], а для получения символь-

ных выражений – программу символьного анализа CirSym [11].

Формулы для определения параметров элементов узла. Система из k уравнений для узла k+1 (рис. 5 и б) имеет вид:

$$\begin{pmatrix} I^1 \\ I^2 \\ \vdots \\ I^k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{-1(k+1)}^1 & U_{-2(k+1)}^1 & \dots \\ U_{-1(k+1)}^2 & U_{-2(k+1)}^2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ U_{-1(k+1)}^k & U_{-2(k+1)}^k & \dots \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} U_{-v(k+1)}^1 & U_{-v+1}^1 & U_{-v+2}^1 & \dots & U_{-v+\mu}^1 & 1 \\ U_{-v(k+1)}^2 & U_{-v+1}^2 & U_{-v+2}^2 & \dots & U_{-v+\mu}^2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{-v(k+1)}^k & U_{-v+1}^k & U_{-v+2}^k & \dots & U_{-v+\mu}^k & 1 \end{pmatrix} \times \text{col}(Y_1 Y_2 \dots Y_v y_{v+1} y_{v+2} \dots y_{v+\mu} J_{v+\mu+1}), \quad (1)$$

где верхний индекс означает номер эксперимента.

Из (1) находим вектор параметров:

$$\Pi = (U|I)^{-1} I, \quad (2)$$

где (U|I)⁻¹ – обратная матрица; U – матрица напряжений проводимостей и ИТУН размерностью k(k-1); (U|I) – матрица порядка k из матрицы U и вектора с единицами; I – вектор токов узла k+1 при экспериментах λ = 1, 2, ..., k.

Уравнение (2) решается по алгоритму из предыдущего раздела. Для определения символьных параметров желательно исключить из (2) отношения для напряжений и токов. После сокращения общего знаменателя

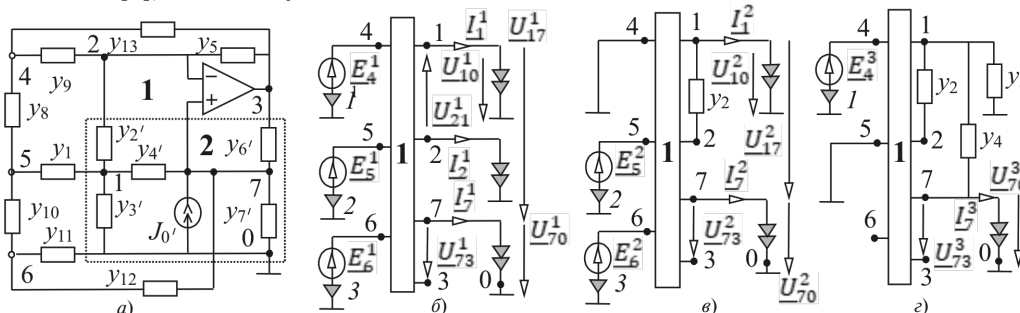


Рис. 7. Исходная (а) и компенсированные схемы (б–в) на основе экспериментов λ = 1 (б), λ = 2 (в) и λ = 3 (г)

Таблица 3

Диагностика недоступной подсхемы по узлам с наименьшей степенью

Узлы	λ	Искомые параметры (верхний и нижний индексы – номер эксперимента и номера узлов)
2	1	$y_{2'} = v_2^1 / N_{21}^1$
1	1, 2	$\begin{pmatrix} y_{3'} \\ y_{4'} \end{pmatrix} = \frac{1}{N_{10}^1 N_{17}^2 - N_{10}^2 N_{17}^1} \begin{pmatrix} v_1^1 N_{17}^2 - v_1^2 N_{17}^1 \\ v_1^2 N_{10}^1 - v_1^1 N_{10}^2 \end{pmatrix}$
7	1, 2, 3	$y_{6'} = [D^1(v_7^2 N_{70}^3 - v_7^3 N_{70}^2) + D^2(v_7^3 N_{70}^1 - v_7^1 N_{70}^3) + D^3(v_7^1 N_{70}^2 - v_7^2 N_{70}^1)] / d;$ $y_{7'} = [D^1(v_7^3 N_{73}^2 - v_7^2 N_{73}^3) + D^2(v_7^1 N_{73}^3 - v_7^3 N_{73}^1) + D^3(v_7^2 N_{73}^1 - v_7^1 N_{73}^2)] / d;$ $J_{0'} = [v_7^1(N_{73}^2 N_{70}^3 - N_{73}^3 N_{70}^2) + v_7^2(N_{73}^3 N_{70}^1 - N_{73}^1 N_{70}^3) + v_7^3(N_{73}^1 N_{70}^2 - N_{73}^2 N_{70}^1)] / d;$ $d = D^1(N_{73}^2 N_{70}^3 - N_{73}^3 N_{70}^2) + D^2(N_{73}^3 N_{70}^1 - N_{73}^1 N_{70}^3) + D^3(N_{73}^1 N_{70}^2 - N_{73}^2 N_{70}^1)$

$$\mathbf{P} = (\mathbf{N}|\mathbf{D})^{-1} \mathbf{v}, \quad (3)$$

где \mathbf{N} , \mathbf{v} – матрицы числителей напряжений \mathbf{U} и токов \mathbf{I} размерностью $k \times (k-1)$ и $k \times 1$ соответственно; $\mathbf{D} = \text{col}(D^1, D^2, \dots, D^k)$ – матрица-столбец определителей КС для экспериментов $\lambda = 1, 2, \dots, k$.

Если в узле отсутствуют НИ тока, то (3) принимает вид:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{N}^{-1}) \mathbf{v}. \quad (4)$$

Необходимым условием однозначной диагностики подсхемы **2** (рис. 5) является отсутствие контуров из НИ тока и узлов с более чем одним НИ.

Пример диагностики подсхемы с недоступными полюсами по узлам с наименьшей степенью. В схеме на рис. 7,а [5] известны проводимости $y_1 = 9$, $y_5 = y_8 = y_9 = y_{10} = y_{11} = y_{12} = 1$ и $y_{13} = 0,5$ (См); операционный усилитель (ОУ) идеальный. Доступны узлы 4, 5 и 6 для установления независимых режимов. Найти проводимости: $y_{2'} = y_{3'} = y_{7'} = 1$; $y_{4'} = 3$; $y_{6'} = 0,1$ (См) и ток $J' = 10$ А подсхемы **2**.

Заменим ОУ на рис. 7,а нулором с номером 0, а для компенсации подсхемы **2** с полюсами 0, 1, 2, 3 и 7 проведем вычислительный эксперимент с номером $\lambda = 1$ при разомкнутых полюсах 4, 5 и 6. Подсхема **2** заменяется тремя нораторами 1, 2, 3 (рис. 7,б), а к полюсам 4, 5 и 6 подключаются фиксаторы напряжения с ЭДС: $E_4^1 = U_4^1$; $E_5^1 = U_5^1$ и $E_6^1 = U_6^1$. По программе CirSym получим узловые напряжения $U_4^1 = 4,844024135$; $U_5^1 = 3,979631135$; $U_6^1 = 2,999700458$. При $\lambda = 2$ узел 4 соединяется с общим узлом (рис. 7,в) и измеряются напряжения (В): $U_5^2 = 2,553904124$; $U_6^2 = 2,281766799$. При $\lambda = 3$ узел 5 соединяется с общим (рис. 7,г) и измеряется напряжение $U_4^3 = 2,114029468$ В.

Ход диагностики отражен в табл. 3. Проводимость $y_{2'}$ узла 2 с наименьшей степенью $k=1$ находится по КС с $\lambda=1$ (рис. 7,б). Проводимости $y_{3'}$ и $y_{4'}$ получаются по КС на рис. 7,б и в ($\lambda=1, 2$). Проводимости $y_{6'}$, $y_{7'}$ и ток J' находятся по КС на рис. 7,б–г ($\lambda=1, 2$ и 3). Выражения определителя КС (D), числителей тока (v) и напряжения (N) получены по CirSym.

Например, числитель и знаменатель для проводимости $y_{2'}$ из строки 2:

$$v_2^1 = -y_{12} E_4^1 y_1 [y_8 y_5 + y_{13} (y_9 + y_5) + y_5 y_9] + E_5^1 y_1 [(y_8 + y_{10}) y_{12} y_5 - y_{10} (y_{12} y_5 + y_{13} (y_9 + y_5) + y_5 y_9)] + E_6^1 y_1 (y_{12} + y_{11} + y_{10}) (y_{13} (y_9 + y_5) + y_5 y_6);$$

$$N_{21}^1 = -y_{12} E_4^1 y_{13} y_8 + E_5^1 y_{13} (y_1 (y_{12} + y_{10}) + y_{12} (y_8 + y_{10})) + E_6^1 y_{13} (-y_1 (y_{12} + y_{11} + y_{10}) - y_{10} y_{12}).$$

После подстановки численных значений: $y_{2'} = 1,000000017$, $y_{3'} = 1,000000004$, $y_{4'} = 3,000000010$, $y_{6'} = 0,100000001$, $y_{7'} = 0,999999997$ (в См) и $J_{0'} = 9,999999998$ А, которые равны заданным параметрам с учетом погрешности.

Как видно, при выборе узлов с наименьшей степенью максимальная степень $k_m = 3$ (число экспериментов) меньше числа инцидентных ветвей. Потребовалось 3 эксперимента и 6 измерений вместо 4 и 12 соответственно по блочно-матричному [5] или схемно-алгебраическому [7] методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демирчян К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. М.: Высшая школа, 1988, 335 с.
2. Киншт Н.В., Герасимова Г.Н., Кац М.А. Диагностика электрических цепей. М.: Энергоатомиздат, 1983, 192 с.
3. Farchy S.L., Gadzheva E.D., Raykovska L.H., Kouyoumdjiev T.G. Nullator-norator approach to analogue circuit diagnosis using general-purpose analysis programmes. – International Journal of Circuit Theory and Applications, 1995, vol. 23, iss. 6, pp. 571–585.

4. Djordjevic S. Analog circuit diagnosis based on the nullor concept and multiport description of the circuit. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*.— Springer: published online. 13 February 2018.

5. Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. Тестовая диагностика активных электрических цепей на основе коммутационных воздействий. — *Электричество*, 2014, № 6, с. 49–55.

6. Курганов С.А., Филаретов В.В. Формулы для символьной параметрической диагностики линейных электрических цепей. — *Электричество*, 2006, № 4, с. 47–60.

7. Горшков К.С., Курганов С.А., Филаретов В.В. Диагностика линейных электрических цепей с косвенной компенсацией подسхем при многократном эксперименте. — *Электричество*, 2017, № 12, с. 36–42.

8. Бутырин П.А., Васьковская Т.А. Принципы декомпозиции сложных электрических цепей при их диагностике по частям. — *Электричество*, 2001, № 6, с. 41–48.

9. Филаретов В.В. Синтез оптимальных формул схемных функций электрических цепей. — *Электричество*, 1995, № 4, с. 36–43.

10. Филаретов В.В. Программа символьного анализа CIRSYM: история создания, структура и функции. — *Международ. сб. научн. трудов. «Синтез, анализ и диагностика электронных цепей»*. — Ульяновск: УЛГТУ, 2010, вып. 10, с.158–171.

11. Filaretov V., Gorshkov K. Efficient generation of compact symbolic network functions in a nested rational form. — *International Journal of Circuit Theory and Applications: Research articles*, May 2020, pp. 1–25.



[25.04.2020]

Авторы: Курганов Сергей Александрович доктор техн. наук, профессор Ульяновского государственного технического университета (УГТУ).

Филаретов Владимир Валентинович — доктор техн. наук, профессор УГТУ.

Electrichestvo, 2021, No. 1, pp. 61–67

DOI:10.24160/0013-5380-2021-1-61-67

Diagnostics of Linear Electric Circuits by Nodes with the Minimal Number of Unknown Parameters

KURGANOV Sergey A. (*Ul'yanovsk State Technical University (USTU), Ul'yanovsk, Russia*) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

FILARETOV Vladimir V. (*USTU, Ul'yanovsk, Russia*) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

The star method and the links-tree method used for electric circuit diagnostics are improved. To decrease the number of experiments and measurements, it is proposed to carry out diagnostics by nodes with the lowest degree. The approach is illustrated by examples of diagnosing circuits with nodes accessible and inaccessible for measurements. In the circuits having nodes accessible for measurements it is proposed to carry out measurements on the tree branches composed of branches incident to the nodes with the lowest degree. It is exactly such branches that are selected as the top-priority ones for diagnostics. By diagnosing their parameters it becomes possible to decrease the necessary number of experiments and, hence, the number of measurements. For diagnosing the next branches that are incident to nodes with a higher degree, additional experiments may not be needed, because the parameters of certain branches are already known. In the configurations the scheme of which is partially inaccessible for measurements, diagnostics of branch parameters is additionally based on drawing up the circuit determinants of compensated schemes in the system's inaccessible part. The practical aim of the article is to achieve a fewer number of experiments and measurements in diagnosing linear electric circuits.

Key words: *electric circuit, diagnostics by nodes, node degree, multiple experiment, compensation of subschemes, nullor*

REFERENCES

1. Demirchyan K.S., Butyrin P.A. *Modelirovaniye i mashinnyy raschet elektricheskikh tsepey* (Modeling and machine calculation of electrical circuits). M.: Vysshaya shkola, 1988, 335 p.

2. Kinsht N.V., Gerasimova G.N., Kats M.A. *Diagnostika elektricheskikh tsepey* (Diagnostics of electrical circuits). M.: Energoatomizdat, 1983, 192 p.

3. Farchy S.L., Gadzheva E.D., Raykovska L.H., Kouyoumdjiev T.G. Nullator-norator approach to analogue circuit diagnosis using general-purpose analysis programmes. — *International Journal of Circuit Theory and Applications* (Nullator-norator approach to analogue circuit diagnosis using general-purpose analysis programs. — *International Journal of Circuit Theory and Applications*), 1995, vol. 23, iss. 6, pp. 571–585.

4. Djordjevic S. Analog circuit diagnosis based on the nullor concept and multiport description of the circuit. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*.— Springer: published online. 13 February (Analog circuit diagnosis based on the nullor concept and multiport description of the circuit. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. — Springer: published online. 13 February), 2018.

5. Kinsht N.V., Petrun'ko N.N. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 6, pp. 49–55.

6. Kurganov S.A., Filaretov V.V. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2006, No. 4, pp. 47–60.

7. Gorshkov K.S., Kurganov S.A., Filaretov V.V. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 12, pp. 36–42.

8. Butyrin P.A., Vas'kovskaya T.A. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2001, No. 6, pp. 41–48.

9. Filaretov V.V. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1995, No. 4, pp. 36–43.

10. Filaretov V.V. *Mezhdunarod. Sb. nauchnykh trudov «Sintez, analiz i diagnostika elektronnykh tsepey» — in Russ. (Intern. collection of scientific papers «Synthesis, analysis and diagnosis of electronic circuits»)*, 2010, iss. 10, pp. 158–171 (Ul'yanovsk State University).

11. Filaretov V., Gorshkov K. Efficient generation of compact symbolic network functions in a nested rational form. — *International Journal of Circuit Theory and Applications: Research articles*, May 2020, pp. 1–25.

[25.04.2020]