* * *

Формирование уравнений состояния линейных электрических цепей с обобщенными индуктивными сечениями и емкостными контурами

КУРГАНОВ С.А., ФИЛАРЕТОВ В.В.

Доказано существование уравнений состояния для независимых переменных в цепях с управляемыми источниками, содержащих обобщенные индуктивные сечения и емкостные контуры. Предлагается методика формирования уравнений состояния минимальной размерности без трудоемких операций исключения зависимых переменных.

Ключевые слова: *уравнения состояния, индуктивное сечение, емкостный контур, управляемые источники*

The existence of state equations for independent variables in circuits with controlled sources containing generalized inductive sections and capacitive loops is proven. A procedure for constructing state equations with the minimal dimension without laborious operations of eliminating dependent variables is proposed.

Key words: *state equations, inductive section, capacitive loop, controlled sources*

Уравнения состояния (УС) линейной электрической цепи – это система дифференциальных уравнений первого порядка в нормальной форме [1]:

$$p\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{v}, \quad (1)$$

где **x, v** – векторы переменных состояния и воздействий соответственно; **A, B** – вещественные матрицы; $p = d/dt$ – оператор дифференцирования.

Порядок сложности цепи. Уравнения (1) являются распространенной моделью для анализа переходных процессов в электрических цепях, поскольку разработаны эффективные методы их решения, в том числе с «жесткими» параметрами [2]. Можно уменьшить размерность системы (1) для *RLC*-цепей на число индуктивных сечений и емкостных контуров [1, 3].

В [3] доказано, что для *RLCM*-схем всегда возможно построение УС, число которых равно порядку сложности цепи. Порядок сложности *RLCM*-цепи (ранг цепи *r*) меньше общего числа емкостей и индуктивностей (взаимоиндуктивностей) на число емкостных и индуктивных контуров и сечений. Индуктивное или емкостное сечение может включать независимые источники (НИ) тока, а емкостный или индуктивный контур – НИ напряжения.

Вместе с тем, в [1] и [3] не определен порядок сложности цепей с управляемыми источниками (УИ). В [1] утверждается, что схемы на рис. 1,*а* и *б* имеют соответственно один и два контура из конденсаторов и УИ напряжения, но в первой из них $r = 0$, а во второй $r = n_c$.

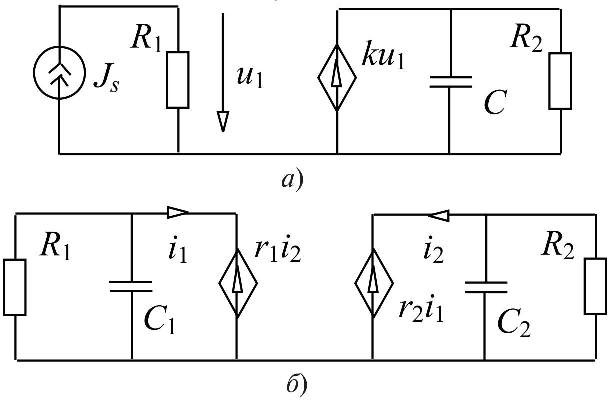


Рис. 1. Схемы с управляемыми источниками: с контуром из конденсатора и УИ напряжения (*а*); без особых контуров (*б*)

Однако вывод «из-за наличия зависимых источников нельзя по топологии схемы выявить зависимые напряжения и токи» [1, с. 293] ошибочен, поскольку первая схема (рис. 1,*а*) имеет контур из конденсатора и УИ, а во второй схеме (рис. 1,*б*) нет особых контуров, если учесть управляющие ветви тока i_1 и i_2.

Обобщенные емкостные и индуктивные контуры и сечения. Если n_C и n_L – число емкостей и индуктивностей, n_{SL} и n_{SC} – число обобщенных индуктивных и емкостных сечений, а n_{KC}, n_{KL} – число обобщенных емкостных и индуктивных контуров, то ранг цепи можно найти по формуле [4]:

$$r = n_C + n_L - n_{SL} - n_{KC} - n_{SC} - n_{KL}. \qquad (2)$$

Обобщенные индуктивные сечения содержат УИ тока и/или нораторы (рис. 2,*а*) или управляющие ветви напряжения и/или нуллаторы (рис. 2,*б*), а обобщенные емкостные контуры – УИ напряжения и/или нуллаторы (рис. 2,*в*) или управляющие ветви тока и/или нуллаторы (рис. 2,*г*).

Обобщенные емкостные сечения включают УИ тока и/или нораторы (рис. 3,*а*) или управляющие ветви напряжения и/или нуллаторы (рис. 3,*б*), а обобщенные индуктивные контуры – УИ напряжения и/или нораторы (рис. 3,*в*) или управляющие ветви тока и/или нуллаторы (рис. 3,*г*). Обобщен-

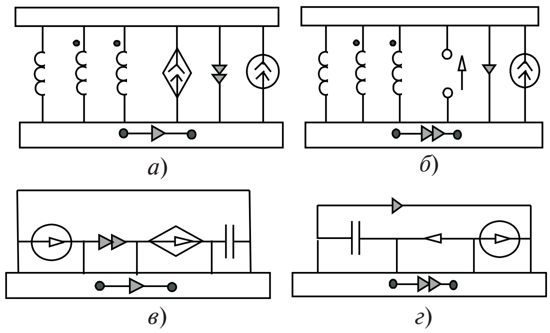


Рис. 2. Примеры обобщенных индуктивных сечений (*а, б*) и обобщенных емкостных контуров (*в, г*)

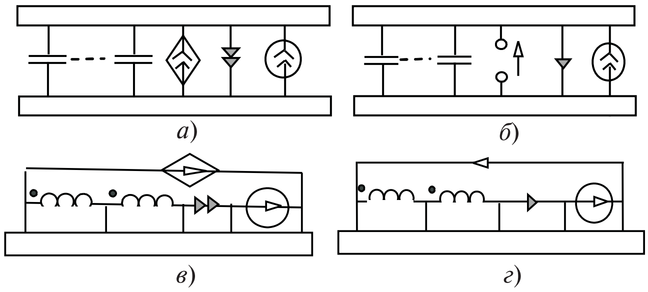


Рис. 3. Примеры обобщенных емкостных сечений (*а, б*) и обобщенных индуктивных контуров (*в, г*)

ным считается сечение или контур при любом числе упомянутых выше «обобщающих» элементов.

Возможность существования УС и их размерность для цепей с УИ определяется путем исключения зависимых переменных в избыточных промежуточных системах уравнений [1]. Поэтому необходимо выяснить, когда существуют УС на основе независимых переменных для цепей с УИ, имеющих обобщенные емкостные и/или обобщенные индуктивные контуры и сечения. Если существуют, то как сформировать коэффициенты УС, минуя построение и преобразование вспомогательных систем уравнений?

Существование уравнений состояния для обобщенных индуктивных сечений и емкостных контуров. Для схем с такими особенностями справедливо следующее утверждение.

Утверждение 1. Для цепей с УИ, имеющих обобщенные индуктивные сечения и/или обобщенные емкостные контуры, существуют (за исключением частных параметрических случаев) УС на основе независимых переменных.

Доказательство. Рассмотрим цепь общего вида (рис. 4,*а*). Многополюсники не содержат реактивных элементов. Обобщенные емкостный контур и индуктивное сечение включают $n+1$ и $k+1$ емкостей и индуктивностей соответственно. Согласно (2) при $n_{SC} = 0$ и $n_{KL} = 0$ схема имеет $n+k$ переменных состояния, например напряжения u_{C1}, ..., u_{Cn} и токи i_{L1}, ..., i_{Lk}.

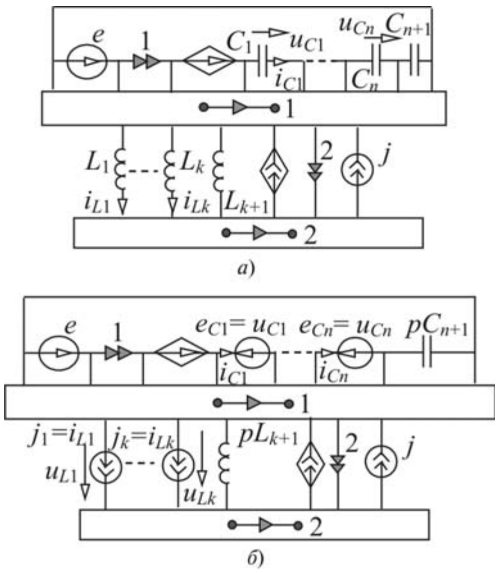


Рис. 4. Схема с обобщенным емкостным контуром и обобщенным индуктивным сечением (*а*) и ее схема замещения (*б*)

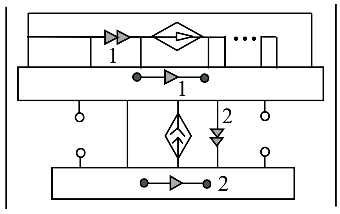
Заменим реактивные элементы с независимыми переменными – емкости C_1, ..., C_n и индуктивности L_1, ..., L_k на НИ напряжения e_1, ..., e_n и НИ тока j_1, ..., j_k соответственно. В то же время элементы с зависимыми переменными – емкость C_{n+1} и индуктивность L_{k+1} заменим операторной проводимостью и сопротивлением соответственно (рис. 4,*б*). Это отличает предлагаемую схему замещения от схемы [1, с. 304], в которой независимые емкости и индуктивности заменяются НИ напряжения и тока, а зависимые емкости и индуктивности – НИ тока и напряжения соответственно.

Из схемы на рис. 4,*б* можно выразить ток i_C через любую независимую емкость или напряжение u_L на любой независимой индуктивности через напряжения других независимых емкостей и токи других независимых индуктивностей, а также напряжения и токи НИ напряжения и тока. Так можно записать $n+k$ уравнений. После замены в левой части этих уравнений вида $i_C = Cdu_C / dt$ и $u_L = Ldi_L / dt$ записываются уравнения относительно независимых переменных состояния в виде

$$\begin{bmatrix} C_1pu_{C1} \\ \text{M} \\ C_npu_{Cn} \\ L_1pi_{L1} \\ \text{M} \\ L_kpi_{Lk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{C11} & \text{K} & A_{C1n} & A_{C1L1} & \text{K} & A_{C1Lk} \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ A_{Cn1} & \text{K} & A_{Cnn} & A_{CnL1} & \text{K} & A_{CnLk} \\ A_{L1C1} & \text{K} & A_{L1Cn} & A_{L11} & \text{K} & A_{L1k} \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ A_{LkC1} & \text{K} & A_{LkCn} & A_{Lk1} & \text{K} & A_{Lkk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{C1} \\ \text{M} \\ u_{Cn} \\ i_{L1} \\ \text{M} \\ i_{Lk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{C1e} & B_{C1j} \\ \text{M} & \text{M} \\ B_{Cne} & B_{Cnj} \\ B_{L1e} & B_{L1j} \\ \text{M} & \text{M} \\ B_{Lke} & B_{Lkj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ j \end{bmatrix}, \quad (3)$$

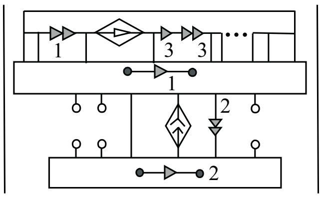
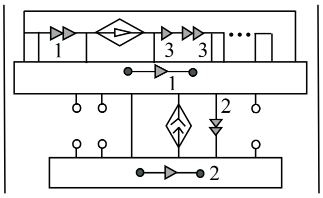
где A_{C11}, ..., A_{C1n} и A_{Cn1}, ..., A_{Cnn} – передаточные проводимости i_{C1}/u_{C1},..., i_{C1}/u_{Cn} и i_{Cn}/u_{C1}, ..., i_{Cn}/u_{Cn} соответственно; A_{C1L1},..., A_{C1Ln} и A_{CnL1},..., A_{CnLk} – коэффициенты передачи по току i_{C1}/i_{L1}, ..., i_{C1}/u_{Ln} и i_{Cn}/i_{L1}, ..., i_{Cn}/i_{Lk} соответственно; A_{L1C1},..., A_{L1Cn} и A_{LkC1}, ..., A_{LkCn} – коэффициенты передачи по напряжению $u_{L1}u_{C1}$, ..., u_{L1}/u_{Cn} и u_{Lk}/u_{C1}, ..., u_{Lk}/u_{Cn} соответственно; A_{L11}, ..., A_{L1k} и A_{Lk1}, ..., A_{Lkk} – передаточные сопротивления u_{L1}/i_{L1}, ..., u_{L1}/i_{Lk} и u_{Lk}/i_{L1}, ..., u_{Lk}/i_{Lk} соответственно; B_{C1e}, ..., B_{Cne} – передаточные проводимости i_{C1}/e, ..., i_{Cn}/e; B_{C1j}, ..., B_{Cnj} – коэффициенты передачи по току i_{C1}/j, ..., i_{Cn}/j; B_{L1e}, ..., B_{Lke} – коэффициенты передачи по напряжению u_{L1}/e, ..., u_{Ln}/e; B_{L1j}, ..., B_{Lkj} – передаточные сопротивления u_{L1}/j, ..., u_{Lk}/j.

Каждая из схемных функций получается в виде отношения определителей схемы числителя и схемы знаменателя [5]. Схема знаменателя (общая для всех схемных функций) – характеристический полином – образуется из схемы на рис. 4,*б* путем нейтрализации всех НИ, замены идеальными проводниками приемников тока через емкости и удаления приемников напряжения на индуктивностях. При этом проводимость pC_{n+1} оказывается в контуре из УИ напряжения и норатора, а сопротивление pL_{k+1} в сечении из УИ тока и норатора, что упрощает схему в результате удаления pC_{n+1} и замены идеальным проводником pL_{k+1} [5]. Отсюда получается схемно-алгебраическое выражение (САВ) знаменателя:

$D =$  . (4)

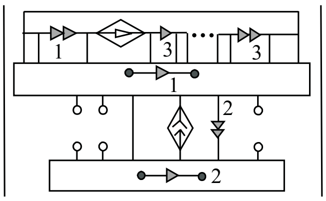
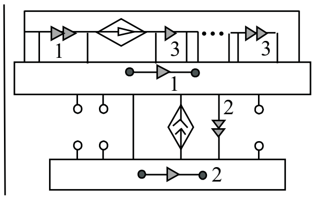
Как видно, формула (4) не содержит оператора p, поскольку его нет как в многополюсниках, так и в параметрах других элементов, т.е. знаменатель коэффициентов системы (3) не может нарушить ее нормальной формы.

Для исследования влияния числителей диагональных элементов матрицы **A** на структуру системы (3) построим, например, САВ числителя коэффициента A_{C11}, которое формируется из схемы на рис. 4,*б* путем замены НИ ЭДС e_{C1} норатором противоположного направления, а приемника i_{C1} – нуллатором с номером 3. Параметры всех остальных НИ приравниваются к нулю, поэтому сопротивление индуктивности pL_{k+1} заменяется идеальным проводником, как на схеме в (4). После выделения в сформированном схемном определителе емкостной проводимости [5] получается САВ числителя в следующем виде:

$A'_{C11} = pC_{n+1}$  $+$  . (5)

Как видно, первое слагаемое числителя диагонального элемента A_{C11} включает оператор p в первой степени. Это слагаемое, деленное на знаменатель (4), переносится в левую часть первого уравнения (3) и группируется с уже находящимся там слагаемым, содержащим оператор p. Аналогично учитываются диагональные элементы и в других уравнениях системы (3).

Теперь исследуем недиагональные элементы этой же матрицы **A**. Рассмотрим произвольный коэффициент A_{C1n}. Схемно-алгебраическое выражение числителя этого коэффициента получается аналогично (5):

$A'_{C1n} = pC_{n+1}$  $+$  . (6)

В отличие от САВ (5) первое слагаемое САВ (6) содержит производную переменной u_{Cn} и не может быть сгруппировано со слагаемым с производной переменной u_{C1} соответствующего уравнения (3). После переноса всех таких слагаемых из правой части в левую и учета, что все коэффициенты матриц **A** и **B** имеют одинаковый знаменатель D, система (3) приобретает вид

$$\mathbf{M}\begin{bmatrix} pu_{C1} \\ \vdots \\ pu_{Cn} \\ pi_{L1} \\ \vdots \\ pi_{Lk} \end{bmatrix} = \frac{1}{D}\begin{bmatrix} A'_{C11} & \cdots & A'_{C1n} & A'_{C1L1} & \cdots & A'_{C1Lk} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A'_{Cn1} & \cdots & A'_{Cnn} & A'_{CnL1} & \cdots & A'_{CnLk} \\ A'_{L1C1} & \cdots & A'_{L1Cn} & A'_{L11} & \cdots & A'_{L1k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A'_{LkC1} & \cdots & A'_{LkCn} & A'_{Lk1} & \cdots & A'_{Lkk} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_{C1} \\ \vdots \\ u_{Cn} \\ i_{L1} \\ \vdots \\ i_{Lk} \end{bmatrix} + \frac{1}{D}\begin{bmatrix} B'_{C1e} & B'_{C1j} \\ \vdots & \vdots \\ B'_{Cne} & B'_{Cnj} \\ B'_{L1e} & B'_{L1j} \\ \vdots & \vdots \\ B'_{Lke} & B'_{Lkj} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e \\ j \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где **M** – квадратная матрица коэффициентов с размерностью емкостей и индуктивностей; $A'_{C11},...,A'_{Cnn},...,A'_{Lkk}$ – числители элементов матрицы **A** – вещественные коэффициенты; $B'_{C1e},...,B'_{Lkj}$ – числители элементов матрицы **B**.

Матрица **M** будет диагональной, если в цепи отсутствуют обобщенные емкостные контуры и индуктивные сечения, а также в случае, когда в каждый емкостный контур и индуктивное сечение входит только две емкости и две индуктивности, поскольку в недиагональных элементах вида (6) первое слагаемое с оператором p будет равно нулю.

Система (7) не изменится по структуре при наличии в схеме обобщенных емкостных контуров и индуктивных сечений другого типа – с управляющей ветвью тока (рис. 2,*г*) и управляющей ветвью напряжения (рис. 2,*б*) соответственно. Матрица **M** – неособенная, поскольку все диагональные элементы ненулевые и нет линейно зависимых строк и столбцов. Исключением является идеальный случай, когда равен единице коэффициент связи двух и более катушек индуктивности или конденсаторов, т.е. для практических цепей с УИ, содержащих обобщенные емкостные контуры и индуктивные сечения, утверждение 1 справедливо – нормальные УС существуют, и их число равно рангу цепи (2). На этом утверждении – с использованием системы (7) – основана методика формирования УС, которая состоит в нахождении передаточных функций этой системы методом схемных определителей [5].

Невозможность формирования уравнений состояния для обобщенных емкостных сечений и индуктивных контуров. Эти схемные особенности не уменьшают число УС в отличие от емкостных сечений, содержащих только емкости и НИ тока, и индуктивных контуров, образованных только индуктивностями и НИ напряжения. Для схем с обобщенными емкостными сечениями и индуктивными контурами справедливо следующее утверждение.

Утверждение 2. При наличии в схеме обобщенных емкостных сечений и/или обобщенных индуктивных контуров не существуют уравнения состояния на основе независимых переменных.

Доказательство. Обобщенные емкостные сечения и обобщенные индуктивные контуры снижают ранг цепи в соответствии с формулой (2), но не уменьшают число УС (1). Уравнения такой цепи на основе независимых переменных состояния не могут быть приведены к нормальной форме.

Действительно, возьмем обобщенное емкостное сечение, содержащее УИ тока и нораторы (рис. 3,*а*). Чтобы выразить напряжение на одной из емкостей через напряжения других емкостей и токи источников, входящих в сечение, необходимо все слагаемые уравнения разделить на оператор p. В результате параметры УИ тока будут содержать оператор p в отрицательной степени, что приведет к появлению таких множителей в коэффициентах матрицы **A** из системы (3), что не допускается при формировании УС.

Аналогично в матрице **A** появятся слагаемые с отрицательной степенью оператора p, если в цепи будут присутствовать и другие особые структуры – обобщенные емкостные сечения с управляющей ветвью напряжения (рис. 3,*б*), обобщенные индуктивные контуры с УИ напряжения (рис. 3,*в*) или управляющей ветвью тока (рис. 3,*г*). Таким образом, при наличии в схеме обобщенных емкостных сечений и/или обобщенных индуктивных контуров построить УС на основе независимых переменных невозможно.

Пример построения уравнений состояния в частном случае – для цепи с емкостным контуром и индуктивным сечением. В схеме на рис. 5,*а* [1, с. 304; 3, с. 45] имеется сечение из индуктивностей и независимых источников тока и контур из емкостей и независимых источников ЭДС. Схема на рис. 5,*а* в соответствии с формулой (2) имеет ранг 2. В качестве независимых переменных состояния выберем напряжение u_1 емкости C_1 и ток i_3 индуктивности L_3. Для этих переменных система (3) имеет вид

$$\begin{bmatrix} C_1 & \\ & L_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} pu_1 \\ pi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{C11} & A_{C1L3} \\ A_{L3C1} & A_{L33} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_1 \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{C1e} & B_{C1j} \\ B_{L3e} & B_{L3j} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e \\ j \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Схема замещения получается заменой в схеме на рис. 5,*а* емкости с независимым напряжением и индуктивности с независимым током источником ЭДС e_1 и источником тока j_3 соответственно (рис. 5,*б*). Найдем ток i_1 в схеме на рис. 5,*б*, используя принцип наложения. Для этого рассмотрим четыре схемы, образованные из схемы на рис. 5,*б* путем оставления одного из НИ и нейтрализации других НИ (рис. 6).

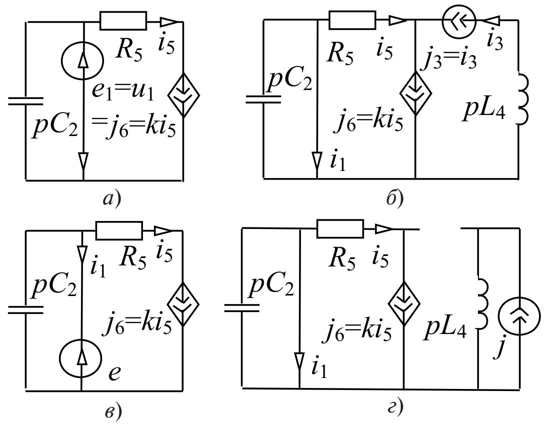


Рис. 6. Схемы для нахождения коэффициентов в первой строке системы (8)

Для схем на рис. 6,*а* и *б* можно записать уравнение $i_5 = ki_5$, поэтому $i_5 = 0$ и ИТУТ нейтрализуется. Отсюда из единственного контура находятся отклики тока: $i_1 = -pC_2 i_1$ и $i_1 = -pC_2 e$ соответственно. В схеме на рис. 6,*б* $i_1 = -i_5$, поэтому можно записать: $i_1 - ki_1 = i_3$ и $i_1 = i_3/(1-k)$. Схема на рис. 6,*г* не даст вклада в отклик i_1, поскольку единственный независимый источник тока j не образует с этим откликом пути для тока. После суммирования частичных откликов получаем первое уравнение для системы (8):

$$i_1 = -pC_2 u_1 + i_3/(1-k) - pC_2 e. \quad (9)$$

Теперь в схеме на рис. 5,*б* найдем напряжение u_3, используя принцип наложения. Для этого рассмотрим четыре схемы, образованные из схемы на рис. 5,*б* путем оставления одного из НИ и нейтрализации других НИ (рис. 7).

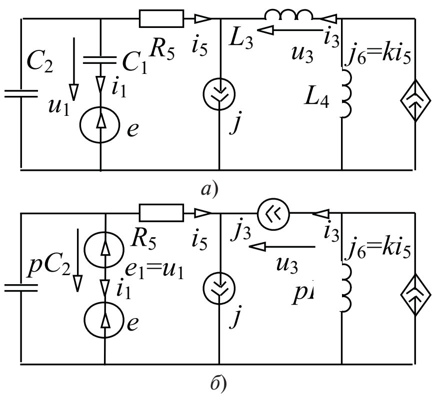


Рис. 5. Электрическая цепь с емкостным контуром и индуктивным сечением: исходная схема (*а*); схема замещения (*б*)

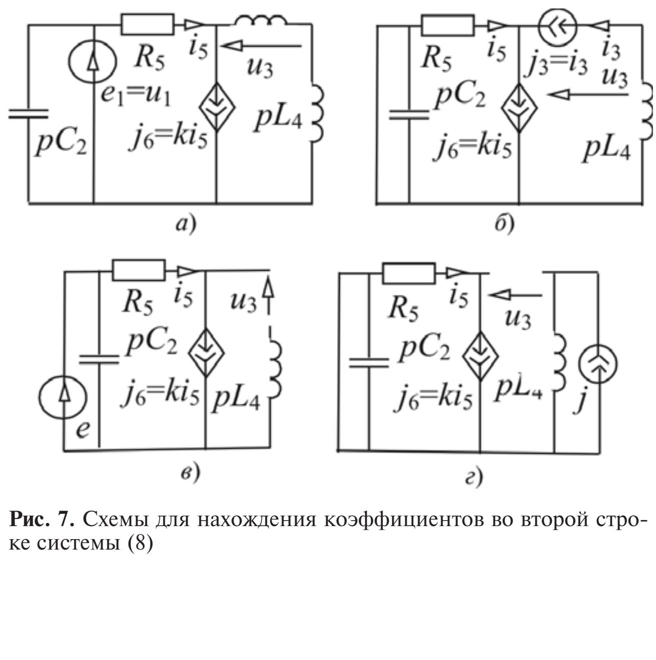


Рис. 7. Схемы для нахождения коэффициентов во второй строке системы (8)

Для схем на рис.7,*а*, *в* и *г* можно записать уравнение $i_5 = ki_5$, поэтому $i_5 = 0$ и ИТУТ нейтрализуется. Отсюда из соответствующих единственных контуров находятся отклики напряжения: $u_3 = -u_1$, $u_3 = -e$ и $u_3 = pL_4 j$. Для схемы на рис.7,*б* можно записать уравнения: $i_5 = ki_5 - i_3$ и $i_5 = -i_3/(1-k)$, а затем $u_3 = -[pL_4 + R_5/(1-k)]i_3$. После суммирования частичных откликов получаем второе уравнение для системы (8):

$$u_3 = -u_1 - [pL_4 + R_5/(1-k)]i_3 - e + pL_4 j. \quad (10)$$

После подстановки уравнений (9) и (10) в систему (8) получаем

$$\begin{bmatrix} C_1 + C_2 & 0 \\ 0 & L_3 + L_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} pu_1 \\ pi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/(1-k) \\ -1 & -R_5/(1-k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -pC_2 & 0 \\ -1 & pL_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ j \end{bmatrix}, \quad (11)$$

Уравнения состояния (11), сформированные непосредственно на основе двух независимых переменных состояния, совпадают с УС в [1] и [3] при подстановке численных значений параметров. В [1] УС получаются на основе вспомогательной системы из пяти уравнений трудоемким нахождением параметров десятиполюсника и исключением трех лишних переменных, а в [3] УС формируются исключением избыточных уравнений из десяти уравнений, построенных на основе нормального дерева.

Пример построения уравнений состояния для цепи с емкостным контуром и обобщенным индуктивным сечением. Рассмотрим схему, полученную из схемы на рис. 5,*а* взаимной заменой УИ тока j_6 и НИ тока j (рис. 8,*а*). В схеме имеется один емкостный контур и одно обобщенное индуктивное сечение, поэтому в соответствии с формулой (2) ранг схемы равен 2. Независимыми переменными состояния, как и в предыдущем примере, выберем напряжение u_1 емкости C_1 и ток i_3 индуктивности L_3. Соответствующая система уравнений также будет иметь вид (8). Схема замещения исходной цепи получается аналогично схеме на рис. 5,*б* (рис. 8,*б*).

Рис. 8. Электрическая цепь с емкостным контуром и обобщенным индуктивным сечением: исходная схема (*а*); схема замещения (*б*)

Найдем ток i_1 в схеме на рис. 8,*б*, используя принцип наложения. Для этого рассмотрим четыре схемы, образованные из схемы на рис. 8,*б* оставлением одного из НИ и нейтрализацией других НИ (рис. 9). Визуальный анализ простых схем на рис. 9,*а–г* приводит к четырем слагаемым для искомого тока:

$$i_1 = -pC_2 u_1 - i_3 + pC_2 e + j. \quad (12)$$

Теперь найдем напряжение u_3 в схеме на рис. 8,*б*, используя принцип наложения. Для этого рассмотрим четыре схемы, образованные из схемы на рис. 8,*б* путем оставления одного из НИ и нейтрализации других НИ (рис. 10). Визуальный анализ простых схем на рис. 10,*а–г* приводит к четырем слагаемым для искомого напряжения:

$$u_3 = u_1 - [R_5 + (k+1)pL_4]i_3 - e + (R_5 + kpL_4)j. \quad (13)$$

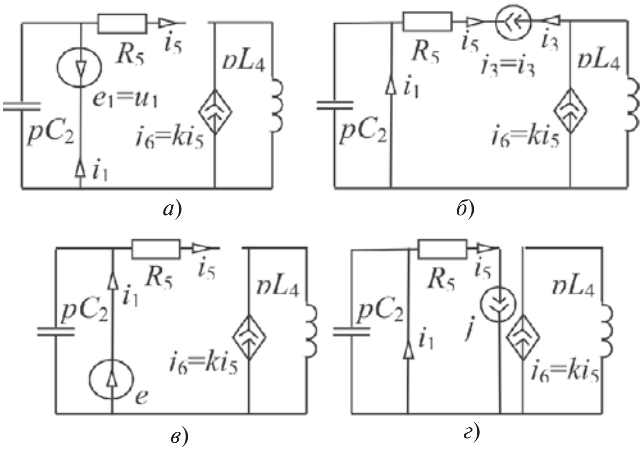


Рис. 9. Схемы для нахождения коэффициентов в первой строке системы (8)

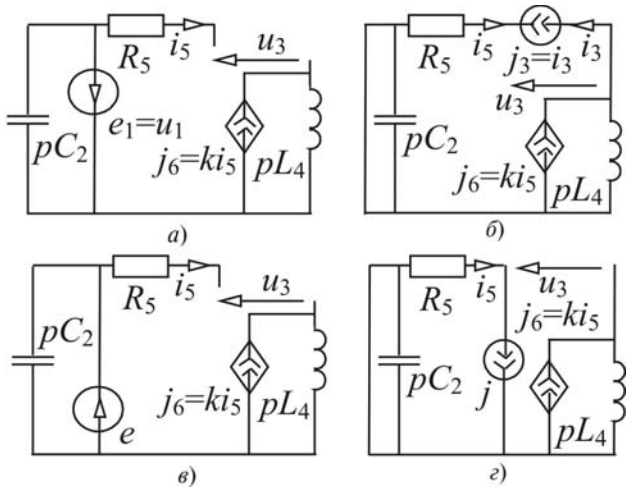


Рис. 10. Схемы для нахождения коэффициентов во второй строке системы (8)

После подстановки уравнений (12) и (13) в уравнение (8) получаем

$$\begin{bmatrix} (C_1+C_2)pu_1 \\ [L_3+L_4(k+1)]pi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -R_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} pC_2 & 1 \\ -1 & pL_4k+R_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ j \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Уравнение (14) можно получить более трудоемким путем [1] — построением уравнений относительно всех четырех переменных состояния и исключением двух зависимых переменных.

Выводы. 1. Доказано, что для цепей с управляемыми источниками, содержащими обобщенные емкостные контуры и индуктивные сечения, существуют уравнения состояния в нормальной форме, число которых меньше общего числа емкостей и индуктивностей на число указанных контуров и сечений.

2. Предложена методика формирования уравнений состояния минимальной размерности без построения промежуточных систем уравнений и исключения зависимых переменных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чуа Л.О., Лин П.М.** Машинный анализ электронных схем/Пер. с англ. – М.: Энергия, 1980, 640 с.

2. **Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноруцкий И.Г.** Численные методы решения жестких систем. — М.: Наука, 1979, 208 с.

3. **Ионкин П.А., Максимович Н.Г., Перфильев Ю.С., Стахив П.Г.** Синтез линейных электрических и электронных цепей. Метод переменных состояния. – Львов: Вища школа, 1982, 312 с.

4. **Курганов Д.С., Курганов С.А., Филаретов В.В.** Нахождение порядка сложности произвольной активной электрической цепи методом схемных определителей. — Международ. сб. науч. тр. «Синтез, анализ и диагностика электронных цепей», вып. 6. – Ульяновск: УлГТУ, 2008, с. 140–151.

5. **Филаретов В.В.** Топологический анализ электронных схем методом выделения параметров. – Электричество, 1998, № 5, с. 43–52.

[27.12.12]

*Авторы: **Курганов Сергей Александрович** окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института (ныне Ульяновский государственный технический университет – УГТУ). В 2006 г. защитил докторскую диссертацию «Символьный анализ и диакоптика линейных электрических цепей» в Санкт-Петербургском государственном политехническом институте. Профессор, зам. заведующего кафедрой «Электроснабжение» УГТУ.*

***Филаретов Владимир Валентинович** окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института в 1982 г. В 2002 г. защитил докторскую диссертацию «Топологический анализ электрических цепей на основе схемного подхода» в МЭИ. Профессор кафедры «Электроснабжение» УГТУ.*

* * *