

Использование переноса ветвей для порождения схем с одинаковым числом элементов

ГОРШКОВ К.С., ТОКАРЕВ Ю.В., ФИЛАРЕТОВ В.В.

Сформулированы общие условия для сохранения числа элементов в специальных случаях переноса ветвей независимых источников и откликов, а также управляемых и управляющих ветвей зависимых источников. Предложен алгоритм для получения полного множества эквивалентных схем с одинаковыми схемными функциями и числом элементов. Рассмотрены особенности применения преобразования переноса к решению задач структурной оптимизации электрических цепей.

Ключевые слова: электрические цепи, эквивалентные преобразования, перенос элементов, символьная схемная функция, структурная оптимизация

Большинство известных методов схемной реализации основаны на использовании наперед заданных структур цепей или частных классов структур, поэтому важную роль при структурном синтезе электрических цепей играют топологические преобразования, порождающие новые схемы с одинаковыми символьными функциями (ССФ) [1]. Однако известными преобразованиями нельзя получить полный класс схем, инвариантных к ССФ, при этом требуются изменения элементной базы или следует ограничиться изменением взаимного положения активных элементов. Необходимым условием инвариантности к ССФ является сохранение числа элементов в схеме. Но до сих пор преобразования, удовлетворяющие этому свойству, не были достаточно изучены.

Простейшие случаи эквивалентных преобразований, сохраняющих число элементов. Условия сохранения числа элементов могут быть выполнены, если эквивалентное преобразование схемы не приводит к появлению новых элементов, что возможно, например, при перестановке последовательно соединенных элементов и групп элементов.

Специальный класс образуют нуллорные преобразования: 1) преобразование, связанное с перенумерацией пар нораторов или нуллаторов (преобразование взаимозамещением входов и выходов) [1]; 2) перенос элементов нуллора [2], что предусматривает смену положения нораторов (в нораторном дереве) или нуллаторов (в нуллаторном дереве). Первое преобразование в отличие от второго, по существу, не позволяет порождать новые схемы,

The general conditions under which the same number of elements is retained in making a transformation by transferring active elements are formulated. An algorithm for obtaining the full set of equivalent circuits with the same circuit functions and number of elements is proposed. Specific features connected with the use of transformation by means of transfer for solving problems relating to structural optimization of electric circuits are considered.

Key words: electric circuits, equivalent transformations, transfer of elements, controlled source, symbolic circuit function, circuit determinant, structural synthesis, structural optimization

так как не изменяются узлы подключения активных элементов. Перенос идеальных элементов приводит к получению новых структур, но не может быть применен к зависимым источникам с конечными параметрами.

Традиционный «перенос» источников напряжения через сечение или источников тока по контуру [3], строго говоря, не является переносом, поскольку элемент, «исчезая» (путем нейтрализации стягиванием или удалением) из одного места, появляется одновременно в нескольких других местах схемы. Таким образом, элемент не переносится, а «размножается» и (частично) «растворяется» при объединении с соседними элементами. «Переносом» было бы логичнее назвать такое преобразование, при котором один и тот же элемент с одним и тем же параметром меняет положение (переносится) из одного места схемы в другое.

Появление только одной «копии» элемента с таким же параметром возможно, когда другие «копии» нейтрализуются соседними элементами схемы. Например, в [4] для доказательства нетрадиционного преобразования переносом через узел независимого источника тока используется перенос источника напряжения через узел, как показано на рис. 1. В этом случае сохраняется количество элементов схемы, поскольку в одной из ветвей перенесенный источник напряжения нейтрализуется источником тока.

Дальнейшее развитие теории пошло по пути переноса пассивных элементов [5, 6], что нашло применение в анализе, но не в структурном синтезе

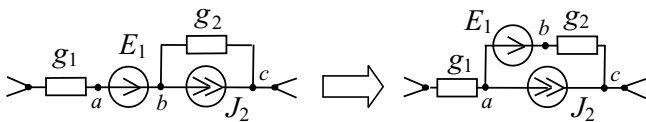


Рис. 1. Перенос источника напряжения при сохранении числа элементов схемы

схем, поскольку перенос пассивных элементов сопровождается появлением как избыточных двухполюсников, так и избыточных управляемых источников. В ходе экспериментов с программой SymSyn [7], предназначенной для восстановления полного множества схем, было установлено, что в классе схем из двухполюсников не существует неизоморфных схем, эквивалентных по ССФ. Поэтому перенос двухполюсников не может привести к порождению новых структур при сохранении числа элементов, а источником новых схемных решений являются активные элементы.

Раздельный перенос управляемых и управляющих ветвей зависимых источников выполняется аналогично классическому переносу ветвей независимых источников и является прямым следствием законов Кирхгофа. В [8, 9] рассмотрены общие случаи преобразования на рис. 1, в которых число элементов сохраняется за счет нейтрализации избыточных ветвей в результате параллельного или последовательного соединения с дуальными элементами или нуллорами. При этом переносимый элемент оказывается не в нескольких, а в одной ветви, т.е. переключается, поэтому потребовалось ввести новый класс преобразований, названных «преобразованиями переключением».

Сохранение числа элементов – не единственное важное свойство обсуждаемых специальных случаев преобразований переносом. Так, в [10] установлено, что если преобразование не затрагивает ветви независимого источника и отклика, то полученная схема будет инвариантна не только к передаточной характеристике порождающей структуры, но и к ее входным или выходным сопротивлениям. Цель статьи – вывод общих условий выполнения преобразований переносом без изменения числа элементов и разработка алгоритма порождения эквивалентных схем с одинаковым числом элементов.

Нейтрализация избыточных элементов. Элементы схемы подразделяются на четыре типа: тип E – независимые или управляемые источники напряжения; тип J – независимые или управляемые источники тока; тип U – искомые отклики напряжения или управляющие напряжения; тип I – искомые отклики тока или управляющие токи. Нейтрализация избыточных элементов при переносе ветвей схемы обусловлена эквивалентными схемными упрощениями, составляющими основу метода схем-

ных определителей [1, 7]. Ниже перечислены случаи нейтрализации элементов: 1) J -ветвь нейтрализуется в контуре из E -ветвей и (или) нораторов; 2) U -ветвь нейтрализуется в контуре из I -ветвей и (или) нуллаторов; 3) E -ветвь нейтрализуется в сечении из J -ветвей и (или) нораторов; 4) I -ветвь нейтрализуется в сечении из U -ветвей и (или) нуллаторов.

Перечисление эквивалентных схем путем выполнения всех возможных переносов независимых источников и откликов, управляемых и управляющих ветвей с последующей отбраковкой схем, не сохраняющих количество элементов, не только нецелесообразно, но и даже не представляется возможным. Целесообразно на основе рассмотрения случаев взаимной нейтрализации сформулировать условия выполнения переноса элементов, обеспечивающие заданное свойство.

Условия сохранения числа элементов при переносе ветвей электрических цепей. Сохранение числа элементов при переносе ветвей зависимых и независимых источников, а также ветвей откликов оказывается возможным при выполнении следующих условий, которым должна удовлетворять порождающая схема:

Условие 1. Переносимая E -ветвь находится в сечении из J -ветвей и (или) нораторов, содержащем также один элемент χ любого другого типа.

Условие 2. Переносимая I -ветвь находится в сечении из U -ветвей и (или) нуллаторов, содержащем также один элемент χ любого другого типа.

Условие 3. Переносимая J -ветвь находится в контуре из E -ветвей и (или) нораторов, содержащем также один элемент χ любого другого типа.

Условие 4. Переносимая U -ветвь находится в контуре из I -ветвей и (или) нуллаторов, содержащем также один элемент χ любого другого типа.

Таким образом, переносимый элемент схемы включается последовательно (параллельно) с единственным элементом, который находится в рассмотренном контуре или сечении, но не может обеспечить нейтрализацию перенесенного элемента. В примере на рис. 1 возможность сохранения числа элементов при переносе дуальных источников определяет наличие в схеме сечения, охватывающего узел b , и контура $a-b-c-a$ (при обратном переносе). Элементом χ здесь является проводимость g_2 .

В общем случае для образования контуров и сечений, удовлетворяющих условиям сохранения, может потребоваться предварительная модификация структуры схемы путем перестановки последовательно (параллельно) соединенных элементов и групп элементов или искусственное введение разомкнутых и короткозамкнутых ветвей.

Использование разомкнутых и короткозамкнутых ветвей. Выполнение условий сохранения всегда можно обеспечить включением χ -элементов в виде короткозамкнутых проводников $\chi \in \{R=0, g=\infty\}$ или разомкнутых ветвей $\chi \in \{R=\infty, g=0\}$. При этом идеальный проводник создается путем расщепления произвольного сечения (узла), а разомкнутая ветвь может быть добавлена в любой контур в виде фиктивной ветви.

Например, в части схемы на рис. 2,а согласно условию 2 возможен перенос I_1 -ветви через узел b с сохранением числа элементов. Это оказалось бы возможным и в случае, когда χ -элементом является идеальный проводник, образованный расщеплением узла b на узлы b_1 и b_2 (рис. 2,б). В обоих случаях получается схема, показанная на рис. 2,д. Рис. 2,в и г иллюстрируют, что введением идеального проводника несложно образовать сечение, удовлетворяющее условию 2, сокращая число элементов в сечении. В результате переноса I_1 -ветви получают схему на рис. 2,е и ж соответственно.

Теперь рассмотрим возможность сохранения числа элементов при переносе управляющей ветви напряжения в схеме на рис. 3,а. Добавление в схему фиктивных разомкнутых ветвей $a-c$ и $c-d$ (на рис. 3,б выделены штриховыми линиями) приводит к образованию контуров $a-b-c-a$ и $b-c-d-b$, удовлетворяющих условию 4. Это позволяет преобразовать схему на рис. 3,а согласно сформулированному выше правилу, как показано на рис. 3,в и г.

Как видно, схемы на рис. 2,ж и в совпадают. В общем случае перенос E -ветвей (I -ветвей) через се-

чение, содержащее дуальные J -ветви (U -ветви), может привести к тем же результатам, что и перенос J -ветвей (U -ветвей) по контуру, включающему E -ветви (I -ветви). Следовательно, для получения полного множества схем с помощью условий 1–4 необходимо осуществлять проверку порожденных структур на изоморфизм [11].

Алгоритм порождения новых схем с равным числом элементов. Предлагаемый алгоритм предусматривает три основных этапа:

- 1) перечисление сечений и контуров, удовлетворяющих условиям 1–4, применительно к порождающей схеме; перенос соответствующих ветвей в каждом сечении или контуре для получения схем, которые заносятся в множество N_1 ; $k=1$;
- 2) $k=k+1$; перечисление сечений и контуров, удовлетворяющих условиям 1–4, применительно к схемам из множества N_{k-1} ; перенос соответствующих ветвей в каждом сечении или контуре для получения схем, которые после проверки на изоморфизм всем ранее найденным схемам из множеств N_1, N_2, \dots, N_{k-1} заносятся в множество N_k ;
- 3) если $N_k=0$, то процесс порождения эквивалентных схем завершен; в противном случае – переход к шагу 2.

Результатом выполнения алгоритма будет k множеств N_i ($i=1, 2, \dots, k$) неизоморфных схем с одинаковым числом элементов и эквивалентными ССФ. При отсутствии сечений и контуров, удовлетворяющих условиям 1–4, в порождающей схеме или схемах-«потомках» выполняется введение в исходную схему фиктивных разомкнутых и коротко-

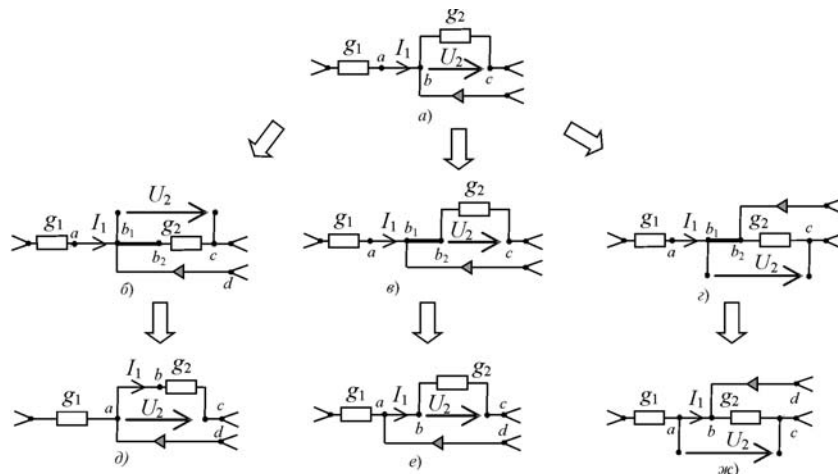


Рис. 2. Перенос управляющего тока I_1 через узел b при сохранении числа элементов схемы

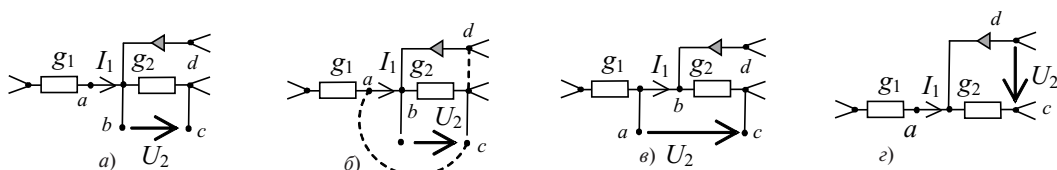


Рис. 3. Перенос управляющего напряжения U_2 по контурам $a-b-c-a$ (в) и $b-c-d-b$ (г) при сохранении числа элементов схемы

замкнутых ветвей, как рассмотрено ранее. Перечисление контуров и сечений выполняется с помощью известных эффективных алгоритмов [2].

Порождение схем, эквивалентных операционному преобразователю. Используем предложенный алгоритм для получения полного множества схем, инвариантных к ССФ, на основе порождающей схемы операционного преобразователя, представленной на рис. 4,а [13]. Здесь активные элементы K_1 и K_2 являются усилителями напряжения, B_1 – повторителем тока.

Шаг 1. Перечисление контуров и сечений, удовлетворяющих одному из условий 1–4, в порождающей схеме рис. 4,а (множество N_1). Сечение, охватывающее узел 3, соответствует условию 1, поскольку включает переносимую E -ветвь K_1 , J -ветвь B_1 и I -ветвь B_1 , используемую в качестве χ -элемента. Сечение, охватывающее узел 2, соответствует условию 2, поскольку включает переносимую I -ветвь B_1 , U -ветвь K_1 и J -ветвь B_1 , используемую в качестве χ -элемента. Контур 3–4–0–3 удовлетворяет условию 3, поскольку образован переносимой J -ветвью B_1 , E -ветвью K_1 и разомкнутой ветвью между узлами 0 и 4 (χ -элементом). Контур 2–0–3–2 удовлетворяет условию 4, поскольку образован переносимой U -ветвью K_1 , I -ветвью B_1 и разомкнутой ветвью между узлами 0 и 3 (χ -элементом). Перенос указанных элементов в выбранных сечениях и контурах приводит к получению схем на рис. 4,б и в (множество N_2 , $k=2$). На схеме рис. 4,в усилитель K_1 заменен идеальным проводником, поскольку выход этого усилителя замкнут на вход. Отметим, что для получения множества N_2 потребовали ввести идеальные проводники путем расщепления узла 0.

Шаг 2. Перечисление контуров и сечений, удовлетворяющих одному из условий 1–4, в схемах множества N_2 . В схеме на рис. 4,б это сечение, охватывающее узел 2, а также контуры: 0–4–1–0; 0–4–0–5; 2–0–3–2. В схеме на рис. 4,в это контуры: 0–4–1–0 и 0–4–0–5. Перенос элементов в

выбранных сечениях и контурах приводит к получению схем на рис. 4,з–ж (множество N_3 , $k=3$).

Шаг 3. Порождение схем на основе N_3 не приводит к получению новых структур, т.е. $N_2=0$ и алгоритм завершен.

Как видно, исходная схема (рис. 4,а) не удовлетворяет требованию технологичности, поскольку повторитель тока B_1 не имеет общей точки с источником сигнала и выходами усилителей K_1 и K_2 . С помощью предложенного алгоритма удалось получить: 1) схемы на рис. 4,б и в – более технологичные, чем исходная, причем схема на рис. 4,в содержит меньшее число активных элементов; 2) схемы на рис. 4,з–д, в которых уменьшено число активных элементов по сравнению с исходной схемой; 3) схемы на рис. 4,е и ж, в которых, как и в исходной схеме, повторитель B_1 не имеет общей точки с источником сигнала и выходами усилителей K_1 и K_2 .

Преобразование переноса как источник новых схемных решений. В [7] для получения полного множества эквивалентных схем предложен переборный алгоритм восстановления схем по ССФ, основанный на использовании аппарата схемных определителей. Задача восстановления схемы является обратной по отношению к задаче нахождения ССФ, и ее решение обеспечивает порождение всех возможных структур, инвариантных к ССФ. Однако при реализации множества схем с помощью программы восстановления SymSyn предъявляются высокие требования к ресурсам компьютера.

Эксперименты с программой SymSyn показали, что [7]: 1) синтез новых эквивалентных схем возможен при наличии в порождающей схеме дуальных по типу ветвей активных элементов и искомым откликов; 2) все новые схемы получаются без трудоемкого процесса восстановления на основе предложенного выше несложного алгоритма.

Существенно, что предложенное правило переноса с сохранением числа элементов позволяет направленно модифицировать структуру в соответ-

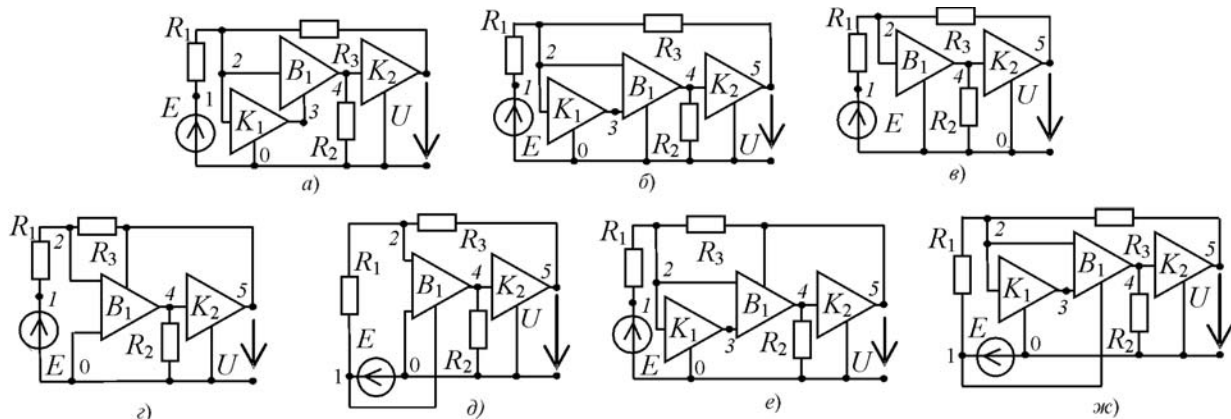


Рис. 4. Порождение множества эквивалентных схем (б–ж) операционного преобразователя (а)

вии с критериями технического задания [14], чтобы избежать необходимости анализа всех возможных схемных вариантов. Так, в практических схемах используется, как правило, подключение активных элементов к заземленному узлу. Поэтому для получения патентоспособных схем требуется выполнять перенос элементов относительно этого узла.

Важно подчеркнуть, что обсуждаемые специальные случаи преобразования переносом не имеют ограничений на тип активных элементов и могут применяться как для схем на традиционной аналоговой элементной базе — операционных усилителях, повторителях тока и т.д., так и для цепей на современных компонентах, например на транскондуктивных усилителях [15].

Выводы. 1. Предложено переносить ветви активных элементов и искомых откликов через сечения и по контурам электрических цепей таким образом, чтобы сохранялось число элементов в порождаемых схемах. На основе правил взаимной нейтрализации элементов сформулированы общие условия сохранения числа элементов.

2. Разработан алгоритм нахождения полного класса схем с одинаковым числом элементов и эквивалентными символьными схемными функциями, не требующий комбинаторного восстановления каждой схемы.

3. Показано, что преобразования переносом могут быть использованы для направленной модификации структуры исходной электрической цепи в соответствии с критериями технического задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волгин Л.И., Королев Ф.А., Филаретов В.В.** Схемно-алгебраический анализ и топологические преобразования моделей электронных цепей. — Ульяновск: УГТУ, 2007.
2. **Braun J.** Topological analysis of networks containing nullators and norators. — Electronics letters, 1966, vol. 2, №11.
3. **Атабеков Г.И.** Теоретические основы электротехники, т.1. Линейные электрические цепи. — М.: Энергия, 1966.
4. **Шакиров М.А.** Применение метода переноса источников для расчета и анализа линейных электрических цепей. — Изв. вузов. Электромеханика, 1973, № 11.
5. **Шакиров М.А.** Методы анализа сложных электрических цепей. — Л.: ЛПИ, 1984.
6. **Шакиров М.А.** Теоретические основы электротехники: новые идеи и принципы: схемоанализ и диакоптика. — СПб: СПбГТУ, 2001.
7. **Горшков К.С., Токарев Ю.В., Филаретов В.В.** Анализ и структурный синтез электрических цепей методом схемных определителей: Учебное пос. — Ульяновск: УГТУ, 2008.
8. **Горшков К.С., Токарев Ю.В., Филаретов В.В.** Эквивалентные преобразования электрических цепей переключением активных элементов. — Международ. сб. науч. тр. — Ульяновск: УГТУ, 2008, вып. 6.
9. **Горшков К.С., Филаретов В.В.** Преобразование электрических цепей переносом активных элементов через сечения и контуры с нуллорами. — Международ. сб. науч. тр. «Синтез, анализ и диагностика электронных цепей». — Ульяновск: УГТУ, 2009, вып. 7.
10. **Горшков К.С., Филаретов В.В.** Влияние преобразований переключением активных элементов на входные и выходные сопротивления цепи. — Международ. сб. науч. тр. «Синтез, анализ и диагностика электронных цепей» — Ульяновск: УГТУ, 2009, вып. 7.
11. **Горшков К.С., Филаретов В.В.** Установление изоморфизма ненаправленных и ориентированных графов на основе распределения показателей участия их ребер и дуг. — Международ. сб. науч. тр. «Синтез, анализ и диагностика электронных цепей». — Ульяновск: УГТУ, 2008, вып. 6.
12. **Гришкевич А.А.** Комбинаторные методы исследования минимальных структур математических моделей электрических цепей и систем. — Челябинск: Южно-Уральский гос. техн. ун-т, 2004.
13. **А.с. №432524 (СССР).** Операционный преобразователь/Л.И. Волгин. — БИ, 1974, № 22.
14. **Горшков К.С., Филаретов В.В.** Структурная оптимизация электронных схем переключением активных элементов. — Электроника и связь: Тематический вып. «Электроника и нанотехнологии», Киев, 2009.
15. **Горшков К.С.** Порождение транскондуктивных реализаций структурных схем электрических цепей преобразованием переключения. — Международ. сб. науч. тр. «Синтез, анализ и диагностика электронных цепей». — Ульяновск: УГТУ, 2009, вып. 7.

[13.11.08]

А в т о р ы : Горшков Константин Сергеевич окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета (УГТУ) по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» в 2006 г. В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию «Структурный синтез и символьный допусковый анализ электрических цепей методом схемных определителей» в Московском энергетическом институте (МЭИ). Старший преподаватель кафедры «Электроснабжение» УГТУ.

Токарев Юрий Владимирович окончил факультет информационных систем УГТУ по специальности «Информационные системы и технологии» в 2009 г. Аспирант УГТУ.

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