

# Метод синтеза ключевых систем силовой электроники

## на базе дуального преобразования цепей

**Целью формального синтеза ключевых систем силовой электроники, дуальных существующим системам, является перевод «проблем с напряжением» в «проблемы с током» и наоборот. В ряде случаев такой подход может быть оправданным и результативным.**

**Юрий Болотовский,**  
к. т. н.

eltech@ufacom.ru

**Георгий Таназлы,**  
к. т. н.

g\_thanazly@mail.ru

### 1. Определение дуальности в ТОЭ

По определению, данному в [1, 2], две электрические цепи называются дуальными, если условия изменения контурных токов в одной из них подобны условиям изменения узловых потенциалов в другой. В указанных работах рассмотрение дуальных цепей основано на линейных цепях, сформированных из элементов: источник напряжения, источник тока, сопротивление, проводимость, индуктивность, емкость.

При этом зависимости между напряжениями и токами имеют вид [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} u_r &= r i_r; \\ u_L &= L \frac{di_L}{dt}; \\ u_C &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_C dt; \end{aligned} \right\} (1) \quad \left. \begin{aligned} i_r &= g' u_r; \\ i_C &= C' \frac{du_C}{dt}; \\ i_L &= \frac{1}{L'} \int_{-\infty}^t u_L dt \end{aligned} \right\} (2)$$

Принятые обозначения ясны из рис. 1.

В данной работе предпринята попытка формального синтеза систем силовой электроники, дуальных существующим системам.

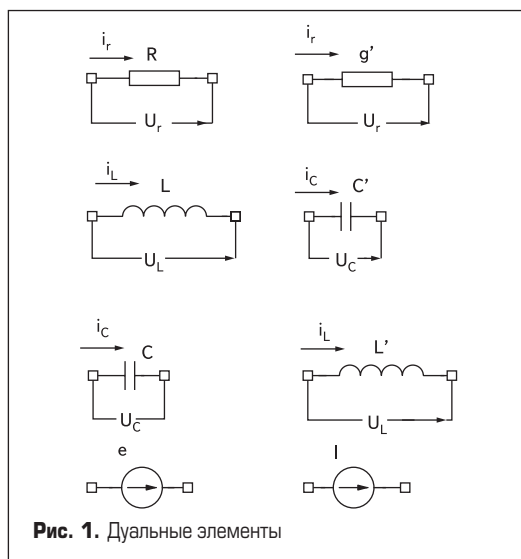


Рис. 1. Дуальные элементы

### 2. Определение графа

Граф определяется [3, 4] как задание двух множеств (первое из них обязательно непустое) и предиката, указывающего, какую пару элементов первого множества соединяет тот или иной элемент второго. Дан граф

$$L = (X, U, P),$$

если даны два множества  $X \equiv X_L \neq \emptyset, U \equiv U_L (X \cap U = \emptyset)$  и трехместный предикат  $P \ll \equiv \gg P_L \ll \equiv \gg P(, , )$ , удовлетворяющий следующим двум условиям:

- 1)  $P$  определен на всех упорядоченных тройках элементов  $x, u, y$ , для которых  $x, y \in X$  и  $u \in U$ .
- 2)  $\forall u \exists x, y \{P(x, u, y) \& \forall x', y' [P(x', u', y') \Rightarrow \Rightarrow (x = x' \& y = y') \vee (x = y' \& y = x')]\}$ .

Элементы множества  $X$  называются вершинами, элементы множества  $U$  — ребрами, а предикат  $P$  — инцидентором графа  $L$ ; высказывание  $P(x, u, y)$  читается так: ребро  $u$  соединяет вершину  $x$  с вершиной  $y$ , или  $u$  соединяет упорядоченную пару вершин  $xu$ .

Здесь применяются следующие необщепринятые обозначения:  $\equiv$  — «равно по определению»;  $\ll \equiv \gg$  — «равнозначно по определению».

### 3. Определение дуального графа

Граф  $L_2$  дуален графу  $L_1$  при таком взаимно однозначном соответствии между ребрами этих двух графов, что если  $H_1$  есть любой подграф графа  $L_1$  и  $H_2$  — дополнение соответствующего подграфа графа  $G_2$ , тогда

$$r_2 = R_2 - n_1, \quad (3)$$

где  $r_2$  и  $R_2$  — ранги соответственно  $H_2$  и  $L_2$ ;  $n_1$  — число контуров подграфа  $H_1$ .

В определении дуального графа применены следующие термины:

- 1) подграф — подмножество ребер графа ( $H_1$ );
- 2) дополнение подграфа — подмножество ребер графа, не входящее в подграф, которое в сумме с последним образует граф ( $H_2$ );
- 3) ранг графа с  $v$  вершинами и числом  $p$  изолированных подграфов равен  $v-p$ ;

4) контур — замкнутая однократная последовательность ребер, все вершины между которыми имеют степень 2 (вершине инцидентны два ребра).

#### 4. Построение дуального графа по исходному графу

Для построения дуального графа необходимо предварительно построить систему независимых контуров исходного графа. Формальные алгоритмы построения систем независимых контуров графа многократно описаны в литературе (например [5]) и в данной работе не даются. Ниже приведен простой известный графический способ построения дуального графа по исходному [1, 2, 4].

В каждой области, ограниченной независимым контуром исходного графа, наносится точка, рассматриваемая в качестве будущего узла дуального графа. Кроме этого, одна точка ставится вне исходного графа.

Узлы, соответствующие каждой паре смежных областей, соединяются параллельными ветвями, число которых равно числу ребер, последовательно включенных в контур, граничащий с указанными областями.

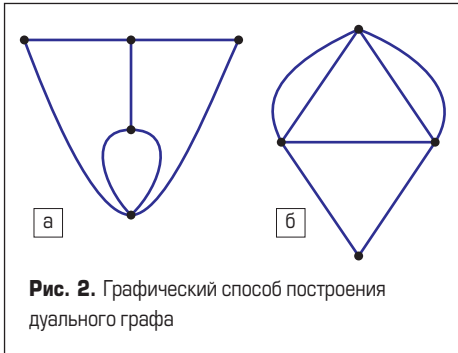


Рис. 2. Графический способ построения дуального графа

На рис. 2а приведен исходный граф, а на рис. 2б — построенный по этому способу дуальный ему граф.

#### 5. Построение дуальных схем

Пусть задана некоторая электрическая схема, состоящая из источников напряжения, источников тока, индуктивностей, емкостей и сопротивлений. Для получения дуальной схемы необходимо:

- 1) вычертить граф заданной схемы (исходный граф);
- 2) по способу, приведенному в пункте 4, построить граф, дуальный исходному;
- 3) в ветвях полученного дуального графа расположить элементы, дуальные элементам исходной схемы (согласно пункту 1), расположенным в соответствующих ее ветвях.

При согласовании направлений ЭДС и токов дуальных источников руководствуются следующим правилом [2]: если ЭДС источника действует в положительном направлении контура (по ходу часовой стрелки), то ток источника тока в дуальной цепи направлен к узлу, соответствующему данному контуру исходной схемы.

#### 6. Постановка задачи синтеза ключевых систем силовой электроники

Изложенный в пунктах 1–5 подход имеет достаточно ограниченное применение, поскольку используемая элементная база не позволяет рассматривать целые классы более сложных электрических и электронных схем.

Предлагаемый метод синтеза ключевых систем силовой электроники основан на расширении элементной базы и применении дуального преобразования. Он позволяет удвоить количество ключевых схем силовой электроники в случае необходимости получения перехода «ток–напряжение» или «напряжение–ток» на элементах схемы.

#### 7. Расширение класса рассматриваемых дуальных схем

Очевидно, что вольт-амперные характеристики дуальных элементов являются взаимно обратными функциями (их графики симметричны относительно диагонали I-го и III-го координатных углов). Поэтому теоретическое построение таких вольт-амперных характеристик не представляет труда, однако практическое использование дуальных элементов для реализации функционирующих схем проблемно. Ниже приводится попытка построения дуальных схем за счет расширения по сравнению с изложенным в пункте 1 элементным набором.

#### 8. Определение дуальных элементов

##### 8.1. Элемент, дуальный индуктивно связанным катушкам

На рис. 3 приведены схемы двух индуктивно согласно (рис. 3а) и встречно (рис. 3б) связанных катушек.

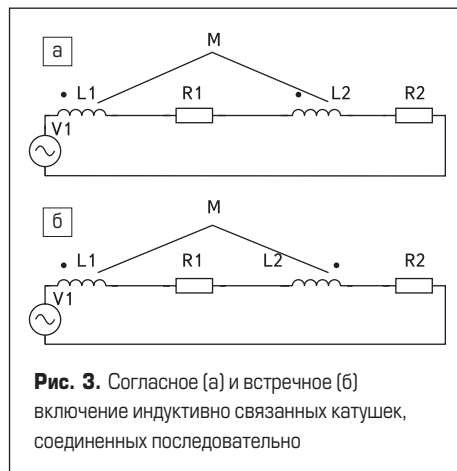


Рис. 3. Согласно (а) и встречное (б) включение индуктивно связанных катушек, соединенных последовательно

Схемам, приведенным на рис. 3а и б, соответствуют уравнения (4) — согласно включение и (5) — встречное включение катушек [2].

$$U_{\text{кор}} = (R1+R2)i + (L1+L2+2M) di/dt; \quad (4)$$

$$U_{\text{вст}} = (R1+R2)i + (L1+L2-2M) di/dt. \quad (5)$$

Построим схемы (рис. 4), дуальные приведенным на рис. 3.

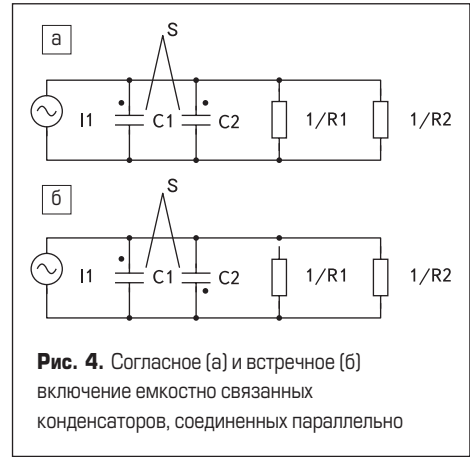


Рис. 4. Согласно (а) и встречное (б) включение емкостно связанных конденсаторов, соединенных параллельно

Запишем уравнения для схем, приведенных на рис. 4.

$$I_{\text{кор}} = U_c(1/(R1+R2)) + (C1+C2+2S)dU_c/dt; \quad (6)$$

$$I_{\text{вст}} = U_c(1/(R1+R2)) + (C1+C2-2S)dU_c/dt. \quad (7)$$

В уравнениях (6), (7): S — коэффициент взаимоемкостной связи конденсаторов (аналогично коэффициенту взаимной индукции M в уравнениях (4), (5)). В уравнении (6) значение S соответствует случаю, когда поля конденсаторов C1 и C2 складываются, а в уравнении (7) — вычитаются.

Возможный принцип построения такого устройства приведен на рис. 5.

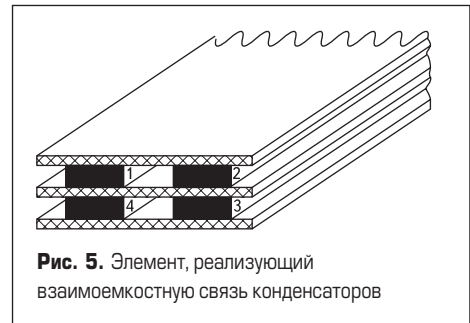


Рис. 5. Элемент, реализующий взаимоемкостную связь конденсаторов

На рис. 5 — 1, 3 и 2, 4 — обкладки первого и второго конденсаторов, разделенные и закрытые снизу и сверху диэлектрическими пленками. Выводы обкладок не показаны. Увеличение емкости такого устройства возможно за счет свивания пленки в рулон или параллельного соединения пластин, аналогичных приведенным на рисунке, в пакет.

Предполагается, что в области вертикальной оси симметрии средней диэлектрической пленки будет находиться область поля, являющаяся общей для обоих конденсаторов.

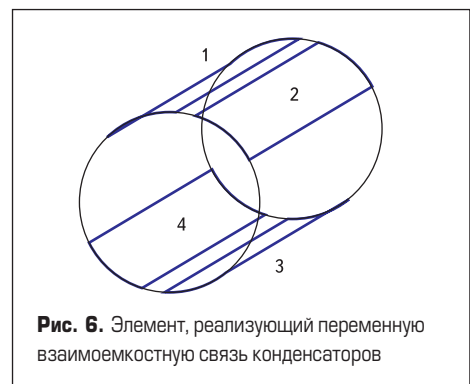


Рис. 6. Элемент, реализующий переменную взаимоемкостную связь конденсаторов

Вариант устройства, подразумевающий переменный коэффициент взаимоемкостной связи, приведен на рис. 6.

Так же как и на рис. 5, здесь 1, 3 и 2, 4 — обкладки первого и второго конденсаторов. Выводы обкладок не показаны. Обеспечивается возможность перемещения обкладок по цилиндрической образующей поверхности. Предполагается, что в области оси цилиндрической образующей поверхности будет находиться область поля, являющаяся общей для обоих конденсаторов. Объем и конфигурация этой области будут изменяться при перемещении обкладок по образующей цилиндрической поверхности, обеспечивая изменение коэффициента взаимоемкостной связи<sup>1</sup>.

**8.2. Дуальность кусочно-линейного ключа**

Перейдем от дуальных элементов с линейными характеристиками (см. разделы 1–5) к рассмотрению дуальных элементов с кусочно-линейными характеристиками. Оно будет проведено на примере применяемого в среде OrCAD управляемого ключа типа Sbreak (библиотека break-out.lib) [6]. Ключ характеризуется следующими опциями (в скобках — значения по умолчанию):

- 1)  $R_{OFF}$  — сопротивление в закрытом состоянии ( $10^6$ );
- 2)  $R_{ON}$  — сопротивление в открытом состоянии (1);
- 3)  $V_{OFF}$  — управляющее напряжение выключения (0);
- 4)  $V_{ON}$  — управляющее напряжение включения (1).

Из соображений численной устойчивости не рекомендуется, чтобы отношение  $R_{OFF}/R_{ON}$  превышало  $10^{12}$ . Из этих же соображений должно выполняться следующее неравенство:

$$|V_{ON} - V_{OFF}| \leq RELTOL \times (\text{MAX}(V_{ON}, V_{OFF})) + VNTOL,$$

где  $RELTOL$  — относительная погрешность вычисления токов и напряжений ( $10^{-3}$ );  $VNTOL$  — абсолютная погрешность вычисления напряжения ( $10^{-6}$ ) [7].

<sup>1</sup> Авторы будут благодарны за любую информацию об устройствах, реализующих взаимоемкостную связь.

Обращаем внимание на то, что ключ Sbreak нельзя признать идеально кусочно-линейным, поскольку для обеспечения численной устойчивости при переходе от состояния  $R_{ON}$  к  $R_{OFF}$  и обратно изменение сопротивления происходит не мгновенно, а в соответствии со специальной зависимостью, которая определяется соответствующими выражениями:

- 1) Когда  $V_{ON} > V_{OFF}$ :
  - если  $V_C \geq V_{ON}$ , то  $R_S = R_{ON}$ ;
  - если  $V_C \leq V_{OFF}$ , то  $R_S = R_{OFF}$ ;
  - если  $V_{OFF} < V_C < V_{ON}$ , то  $R_S = \exp(L_m + 3 \times L_r \times (V_C - V_m) / 2 V_d - 2 \times L_r \times (V_C - V_m)^3 / V_d^3)$ .
- 2) Когда  $V_{ON} < V_{OFF}$ :
  - если  $V_C < V_{ON}$ , то  $R_S = R_{ON}$ ;
  - если  $V_C > V_{OFF}$ , то  $R_S = R_{OFF}$ ;
  - если  $V_{OFF} > V_C > V_{ON}$ , то  $R_S = \exp(L_m - 3 \times L_r \times (V_C - V_m) / 2 V_d + 2 \times L_r \times (V_C - V_m)^3 / V_d^3)$ ,

где  $V_C$  — текущее напряжение управления;  $R_S$  — текущее сопротивление ключа;  $L_m = (\ln(R_{ON} \times R_{OFF})) / 2$ ;  $L_r = \ln(R_{ON} / R_{OFF})$ ;  $V_m = (V_{ON} + V_{OFF}) / 2$ ;  $V_d = V_{ON} - V_{OFF}$ .

Значения  $R_{ON}$  и  $R_{OFF}$  принятые по умолчанию в ключе Sbreak, могут быть изменены, что дает возможность построить ключи SbreakI (исходный) и SbreakD (дуальный) с параметрами:

- SbreakI:  $R_{ON}=0,1$ ;  $R_{OFF}=10^6$ ;  $V_{OFF}=0$ ;  $V_{ON}=1$ .
- SbreakD:  $R_{ON}=10$ ;  $R_{OFF}=10^{-6}$ ;  $V_{OFF}=0$ ;  $V_{ON}=1$ .

Продemonстрируем работу исходного и дуального ключей SbreakI и SbreakD при их независимом управлении от источника питания типа VPULSE (библиотека source.lib).

На рис. 7 приведена простейшая схема, состоящая из источника переменного напряжения VSIN, последовательно включенного с ним ключа SbreakI и резистора. Параметры элементов приведены на схеме.

На рис. 8 приведена схема, дуальная схеме на рис. 7. Она построена в соответствии с правилами, изложенными в разделе 5, и в ней используется дуальный ключ SbreakD. Схема состоит из источника тока ISIN, ключа SbreakD и резистора, включенных параллельно. Параметры элементов приведены на схеме.

На рис. 9 и 10 приведены осциллограммы токов и напряжений на резисторах R1 и R2. Они демонстрируют полное совпадение тока на резисторе R1 и напряжения на резисторе R2 и наоборот.

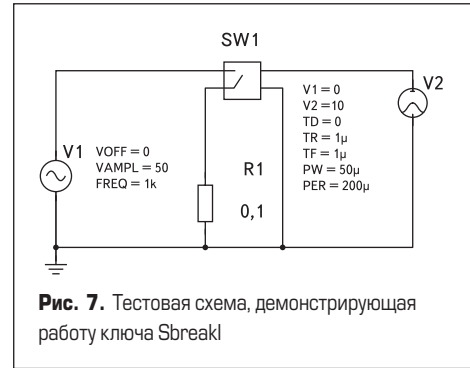


Рис. 7. Тестовая схема, демонстрирующая работу ключа SbreakI

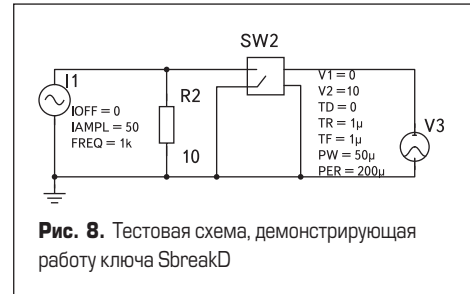


Рис. 8. Тестовая схема, демонстрирующая работу ключа SbreakD

Рассмотренные примеры демонстрируют получение дуальных схем с использованием дуальных кусочно-линейных ключей, вольт-амперные характеристики которых, так же как и дуальных элементов, рассмотренных в разделе 1, являются симметричными относительно диагонали I и III координатных углов.

Продолжим рассмотрение работы ключей SbreakI и SbreakD в дуальных схемах. На рис. 11 приведена схема, которая повторяет схему на рис. 8, но со следующими изменениями:

- 1) Дуальный ключ SbreakD заменен на исходный ключ SbreakI.
- 2) Изменены параметры управления ключом. Управляющие сигналы для схем на рис. 7 и 8 и на рис. 11 приведены на рис. 12.



Рис. 11. Тестовая схема, демонстрирующая работу ключа SbreakI в дуальной схеме

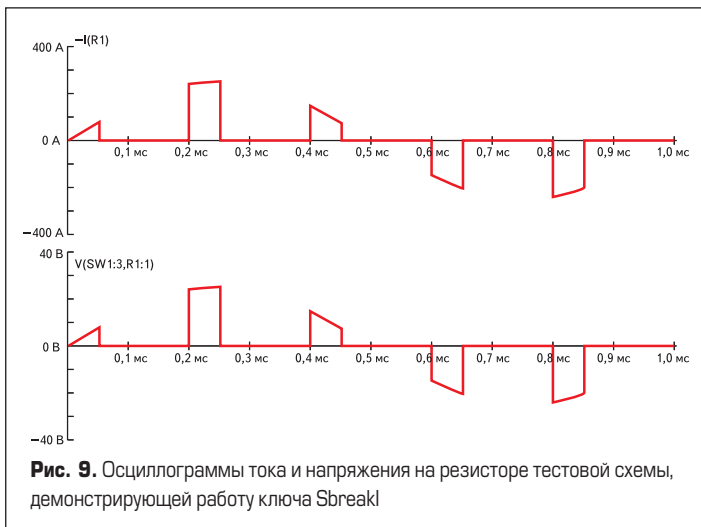


Рис. 9. Осциллограммы тока и напряжения на резисторе тестовой схемы, демонстрирующей работу ключа SbreakI

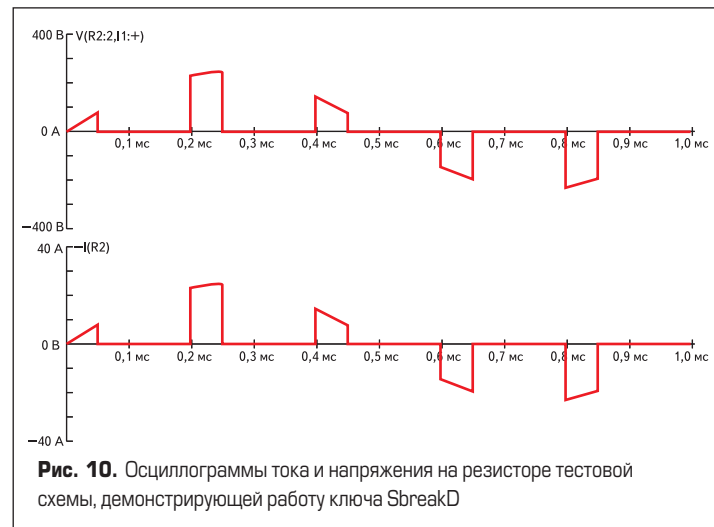
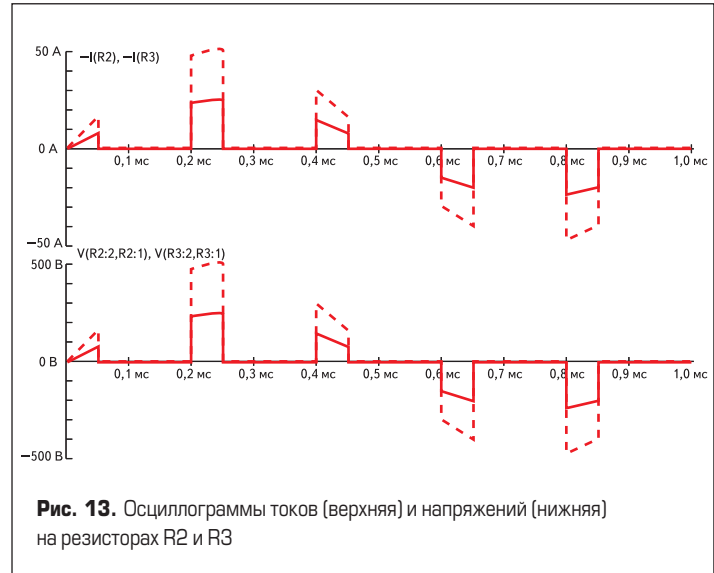
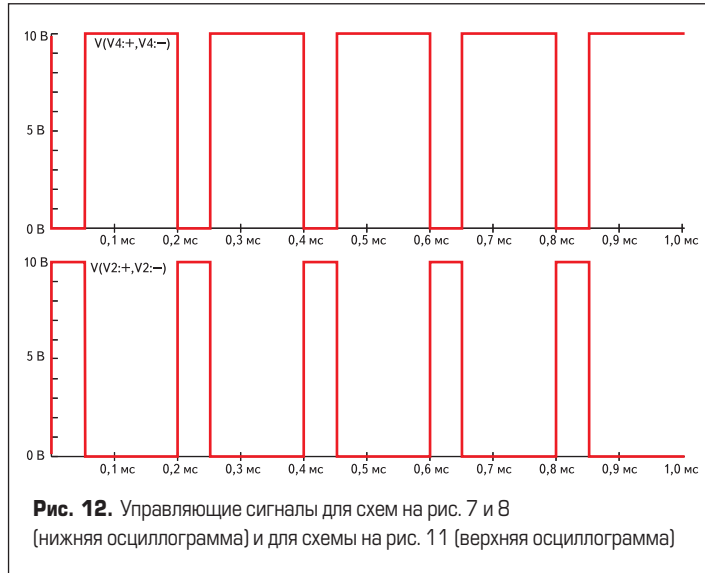


Рис. 10. Осциллограммы тока и напряжения на резисторе тестовой схемы, демонстрирующей работу ключа SbreakD



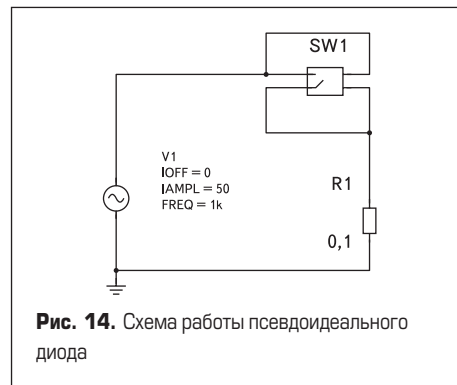
Назовем сигналы управления, приведенные на рис. 12, дополнительными.

На рис. 13 приведены осциллограммы токов и напряжений на схемах, приведенных на рис. 8 и 11.

Из рис. 13 следует, что осциллограммы, полученные на идеальной дуальной исходной схеме и схеме на рис. 11, качественно совпадают, но количественные значения токов и напряжений отличаются, причем их различия легко объяснимы, поскольку сопротивления  $R_{ON}$  и  $R_{OFF}$  ключа SbreakI с дополнительным управлением отличаются от идентичных ключа SbreakD с исходным управлением.

Назовем квазидуальным элемент, вольт-амперная характеристика которого является некоторым приближением подобной характеристики дуального элемента. При этом определяющим в целесообразности применения квазидуального элемента является вероятность использования его в качестве исходного элемента (возможно, с измененным управлением). Как уже говорилось выше, реализация дуальных элементов для нелинейных исходных элементов представляет существенные трудности. Поэтому использование исходных элементов в качестве квазидуальных заслуживает внимания.

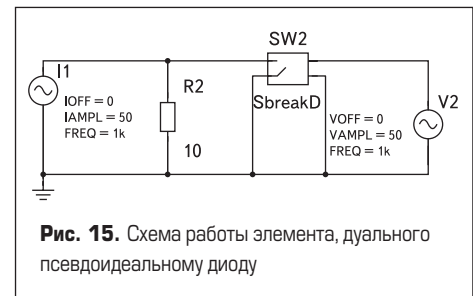
В рассматриваемом примере (схема на рис. 11) элемент SbreakI с дополнительным управле-



нием является квазидуальным элементу SbreakI с исходным управлением.

На базе ключа SbreakI легко создать модель псевдоидеального диода [8]. Условие коммутации такого диода является изменение напряжения «анод-катод». На рис. 14 приведена простейшая схема, иллюстрирующая работу такого диода.

На рис. 15 приведена схема, дуальная рассмотренной на рис. 14. В качестве элемента, дуального псевдоидеальному диоду, применен элемент SbreakD с управлением от независимого источника напряжения VSIN. Необходимость этого для получения дуальной схемы объясняется тем, что ключ Sbreak управляется напряжением, поэтому псевдо-



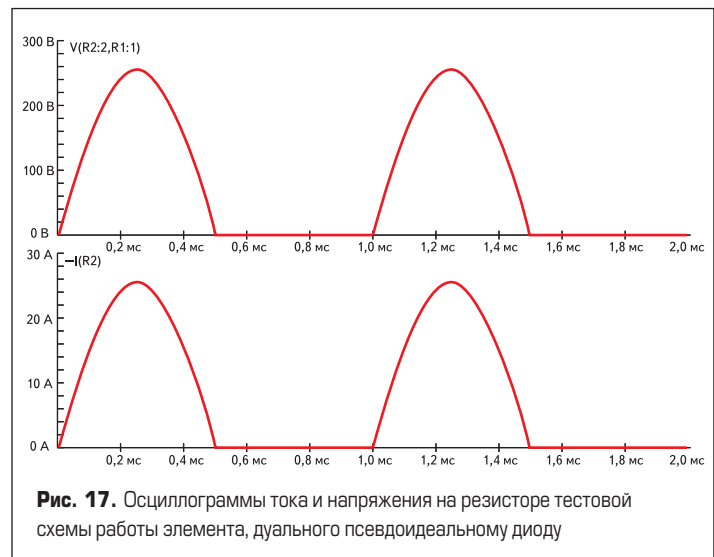
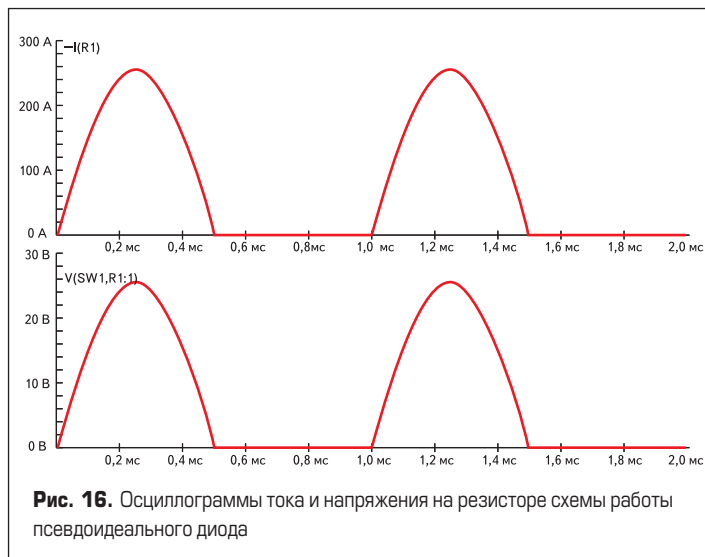
идеальный диод, построенный на ключе SbreakD, без независимого управления не функционирует.

На рис. 16 и 17 приведены осциллограммы токов и напряжений на резисторах R1 и R2. Они демонстрируют полное совпадение тока на резисторе R1 и напряжения на резисторе R2 и наоборот.

Таким образом, рассмотрение дуальных кусочно-линейных ключей позволило ввести понятие дополнительного управления и квазидуального элемента.

### 8.3. Дуальные цепи с реальными диодами

Очевидно, что получение элемента, дуального реальному диоду, является очень сложной задачей, поскольку решение ее «в лоб» требует создания реально существующего двухполюсного элемента, вольт-амперные характери-



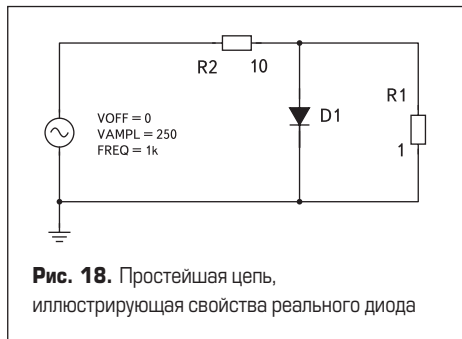


Рис. 18. Простейшая цепь, иллюстрирующая свойства реального диода

ки которого симметричны относительно диагонали I и III координатных углов вольт-амперным характеристикам исходного диода. Здесь такой подход не рассматривается.

Рассмотрим реальный диод с точки зрения использования его как квазидуального самому себе. На рис. 18 приведена простейшая схема, состоящая из источника переменного напряжения, двух резисторов и диода hfa08tb60. Параметры элементов схемы ясны из рисунка. Описание модели диода взято с официального интернет-сайта фирмы International Rectifier ([www.irf.com](http://www.irf.com)):

```
*****
* Model Generated by MODPEX *
* Copyright(c) Symmetry Design Systems*
* All Rights Reserved *
* UNPUBLISHED LICENSED SOFTWARE *
* Contains Proprietary Information *
* Which is The Property of *
* SYMMETRY OR ITS LICENSORS *
* Commercial Use or Resale Restricted *
* by Symmetry License Agreement *
*****
* Model generated on Jan 30, 02
* MODEL FORMAT: SPICE3
.MODEL hfa08tb60 d
+IS=2.88464e-12 RS=0.0305193 N=2 EG=1.29955
+XTI=0.521907 BV=600 IBV=0.0001 CJO=1.37419e-10
+VJ=0.4 M=0.418241 FC=0.5 TT=1e-09
+KF=0 AF=1
```

Приведем также некоторые паспортные данные этого диода:

- напряжение анод-катод  $V_f = 600$  В;
- продолжительный прямой ток (при 100 °С)  $I_F = 8$  А;
- одиночный импульс прямого тока  $I_{FSM} = 60$  А;
- максимальный повторяющийся прямой ток  $I_{FRM} = 24$  А;
- максимальное прямое падение напряжения  $V_{FM} = 2,1$  В.

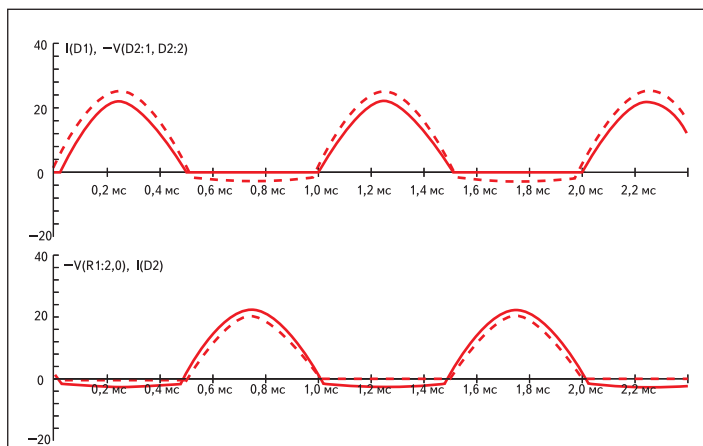


Рис. 20. Осциллограммы токов и напряжения на диодах D1 (сплошная линия) и D2 (штриховая линия) для режимов, близких к максимально допустимой нагрузке по току

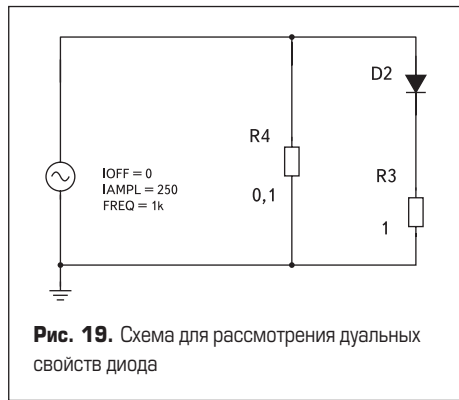


Рис. 19. Схема для рассмотрения дуальных свойств диода

На рис. 19 приведена схема, дуальная рассмотренной на рис. 18. Схема получена на основании правил, приведенных в разделе 5. При этом в качестве элемента, дуального диоду hfa08tb60, используется собственно этот диод.

На рис. 20 приведены осциллограммы токов и напряжения на диодах D1 и D2 для режимов, близких к максимально допустимой нагрузке по току.

Приведем осциллограммы (рис. 21), аналогичные представленным на рис. 20, для значений  $VAMPL = 100$  В (рис. 18) и  $IAMPL = 100$  А (рис. 19).

Как видно из рис. 20 и 21, для схем, которые по построению являются дуальными, получить идеальное совпадение токов и напряжений на двух режимах работы не удалось. Это объясняется квазидуальностью рассматриваемого диода hfa08tb60 самому себе. При этом можно отметить качественное совпадение кривых соответствующих токов и напряжений, что в ряде случаев может оказаться приемлемым для систем силовой электроники.

На рис. 22 приведен участок вольт-амперной характеристики диода hfa08tb60, на котором четко выделяются линейная и нелинейная области. Можно предположить, что погрешность токов и напряжений для дуальных цепей в линейной области будет постоянной, а в нелинейной будет зависеть от положения рабочей точки на вольт-амперной характеристике.

В данном разделе показана возможность использования диода как элемента, квазидуального самому себе при качественном равенстве токов и напряжений для исходной и, соответственно, дуальной схемы.

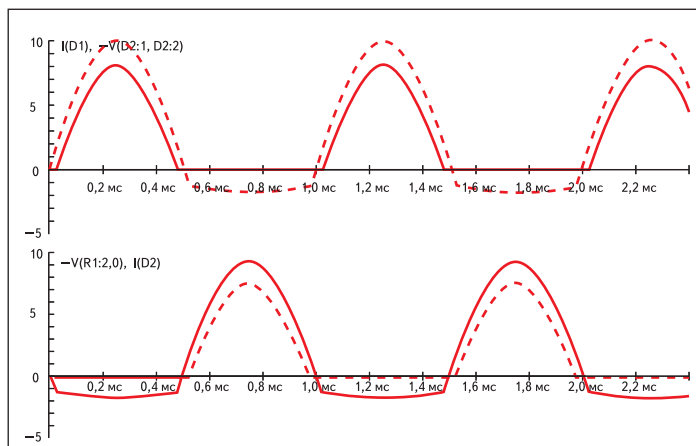


Рис. 21. Осциллограммы токов и напряжения на диодах D1 (сплошная линия) и D2 (штриховая линия) для  $VAMPL = 100$  Вольт,  $IAMPL = 100$  Ампер

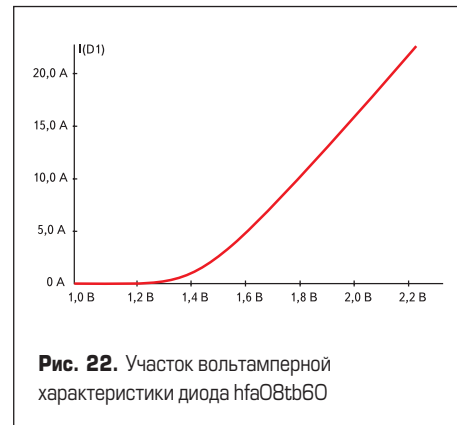


Рис. 22. Участок вольт-амперной характеристики диода hfa08tb60

#### 8.4. Дуальные цепи с транзисторами

Покажем, что транзистор, работающий в ключевом режиме, так же как и диод, квазидуален самому себе. Однако эта квазидуальность в полной мере проявляется только при использовании в дуальной цепи дополнительного управления (см. раздел 8.2).

Продemonстрируем свойства квазидуальности транзистора самому себе в ключевом режиме на примере.

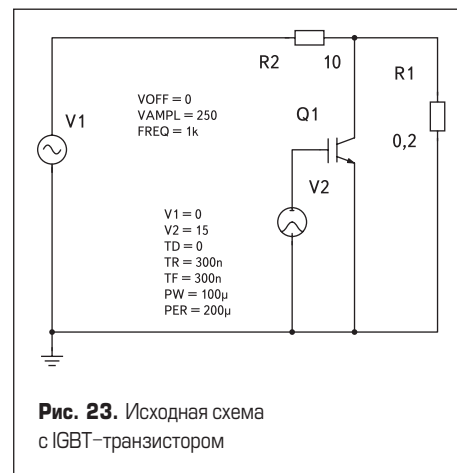


Рис. 23. Исходная схема с IGBT-транзистором

На рис. 23 приведена исходная схема, состоящая из источника V1 переменного напряжения VSIN, резисторов R1, R2 и IGBT транзистора Q1 типа IRG4PH50U. Описание модели транзистора взято с официального интернет-сайта фирмы International Rectifier ([www.irf.com](http://www.irf.com)):



```
.SUBCKT irg4ph50u 1 2 3
*****
* Model Generated by MODPEX *
* Copyright(c) Symmetry Design Systems*
* All Rights Reserved *
* UNPUBLISHED LICENSED SOFTWARE *
* Contains Proprietary Information *
* Which is The Property of *
* SYMMETRY OR ITS LICENSORS *
* Commercial Use or Resale Restricted *
* by Symmetry License Agreement *
*****
*Model generated on Dec 2, 97
* MODEL FORMAT: SPICE3
*Symmetry IGBT Model (Version 1.0)
*External Node Designations
*Node 1 -> C
*Node 2 -> G
*Node 3 -> E
M1 9 6 8 8 MSUB L=100u W=100u
* Default values used in MSUB:
* The voltage-dependent capacitances are
* not included. Other default values are:
* RD=0 RS=0 LD=0 CBD=0 CBS=0 CGBO=0
.MODEL MSUB NMOS LEVEL=1
+VTO=4 KP=0.5 LAMBDA=0 CGSO=3.65971e-05
RD 7 9 0.001
RS 4 8 0.001
Q1 4 7 1 QSUB OFF
.MODEL QSUB PNP
+IS=1e-16 BF=10 NF=1 VAF=100
+IKF=1000 ISE=1e-11 NE=2 BR=1
+NR=1 VAR=100 IKR=1000 ISC=1e-11
+NC=2 RB=0.1 IRB=1000 RBM=0.01
+RE=0.001 RC=0.001 XTB=0 XTI=3
+EG=1.16989 CJC=3.64714e-09 VJC=0.878241 MJC=0.9
+CJE=7.29428e-08 VJE=0.4 MJE=0.9 TF=3.04597e-11
RDS 7 4 1e8
RER 4 3 0.01
RG 6 2 6.18923
RL 10 11 1
D2 12 11 DCAP
* Default values used in DCAP:
* RS=0 EG=1.11 XTI=3.0 TT=0
* BV=infinite IBV=1mA
.MODEL DCAP D IS=1e-32 N=50
+CJO=5.60567e-09 VJ=0.4 M=0.9 FC=0.5
D3 0 11 DL
* Default values used in DL:
* EG=1.11 XTI=3.0 TT=0 CJO=0
* RS=0 BV=infinite IBV=1mA
.MODEL DL D IS=1e-10 N=0.4
VFI2 12 0 0
FI2 6 7 VFI2 -1
EV 10 0 7 6 1
CAP 10 13 6.81948e-09
RCAP 10 14 1
D4 0 14 DL
VFI1 13 14 0
FI1 6 7 VFI1 -1
.ENDS irg4ph50u
```

Управление транзистором осуществляется от источника V2 типа VPULSE. Параметры элементов схемы ясны из рисунка.

На рис. 24 приведена схема, дуальная исходной схеме с IGBT-транзистором. Построение

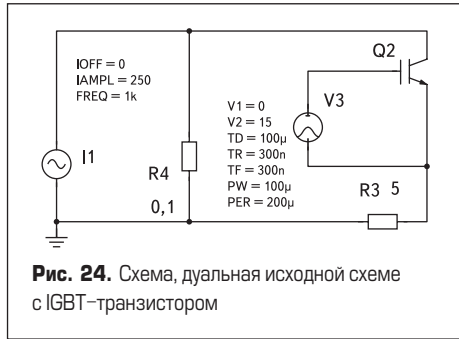


Рис. 24. Схема, дуальная исходной схеме с IGBT-транзистором

схемы выполнено на основании правил, приведенных в разделе 5.

Характерным для рассматриваемой дуальной схемы является использование того же транзистора с дополнительным управлением в качестве элемента, дуального транзистору. Еще раз отметим, что говорить об идеальной дуальности такого транзистора не приходится, что и объясняет расхождение токов и напряжений на соответствующих элементах исходной и дуальной схем, которые видны на рис. 25. Особенно важным различием является то, что транзистор в закрытом состоянии выдерживает и прямое, и обратное напряжение, в то время как ток протекает через рассматриваемый транзистор в одном направлении, что легко видеть по осциллограммам рис. 25 в интервале времени от 0,5 до 1 миллисекунды.

Укажем один из способов улучшения степени совпадения токов и напряжений на исходном IGBT-транзисторе и квазидуальном ему элементе.

На рис. 26 и 27 приведены исходная схема, построенная на IGBT-транзисторе с последовательно включенным диодом, и дуальная схема, в которой диод включен встречно-параллельно транзистору. Параметры элементов схем ясны из рисунков.

На рис. 28 приведены осциллограммы токов и напряжений на последовательно включенном транзисторе и диоде. Сопоставление осциллограмм, приведенных на рис. 25 и 28, показывает, что совпадение осциллограмм токов и напряжений в доработанных квазидуальных схемах лучше, чем в построенных только на транзисторе.

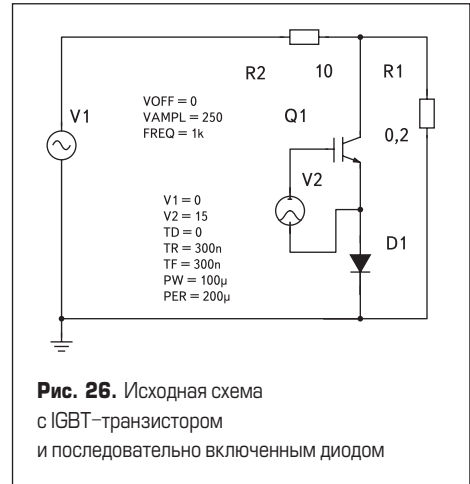


Рис. 26. Исходная схема с IGBT-транзистором и последовательно включенным диодом

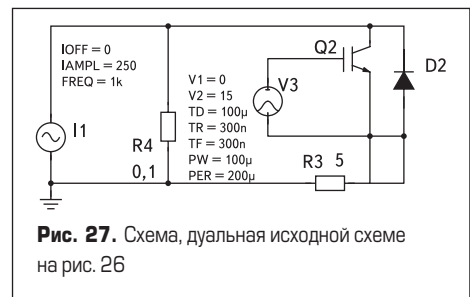


Рис. 27. Схема, дуальная исходной схеме на рис. 26

Вопросы построения более сложных транзисторных и дуальных им схем изложены в следующем разделе.

## 9. Построение схем, дуальных схемам транзисторных инверторов

### 9.1. Схема, дуальная одноячейковому транзисторному инвертору (четвертьмостовой, чопперный)

В качестве примера рассмотрим широко распространенную одноячейковую (четвертьмостовую, чопперную) [9] схему транзисторного инвертора (рис. 29), которая достаточно часто используется в системах индукционного нагрева (иногда в тиристорном варианте).

Параметры элементов схемы ясны из рисунка. В предположении непрерывного входного тока инвертора заменим последовательно включенные источник напряжения V1 и входной дроссель L1 источником тока. Преобразованная таким образом схема приведена на рис. 30.

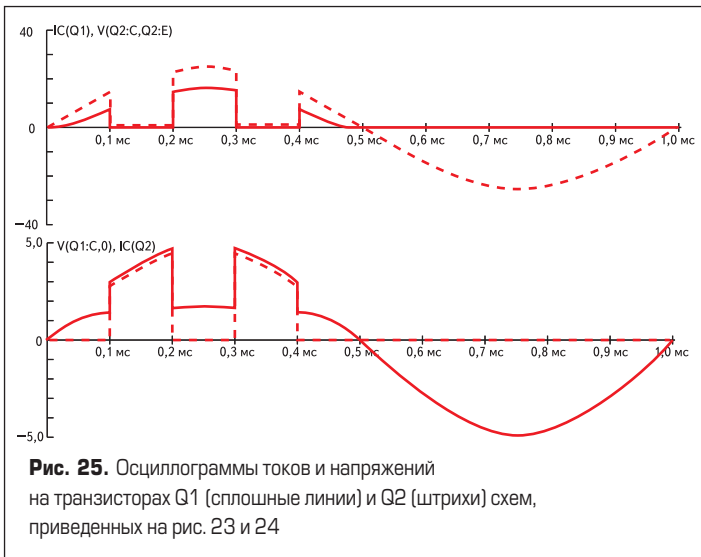


Рис. 25. Осциллограммы токов и напряжений на транзисторах Q1 (сплошные линии) и Q2 (штрихи) схем, приведенных на рис. 23 и 24

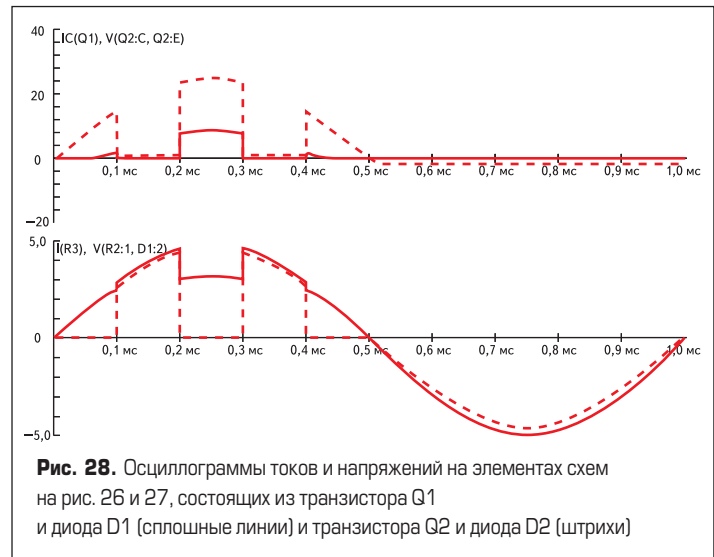
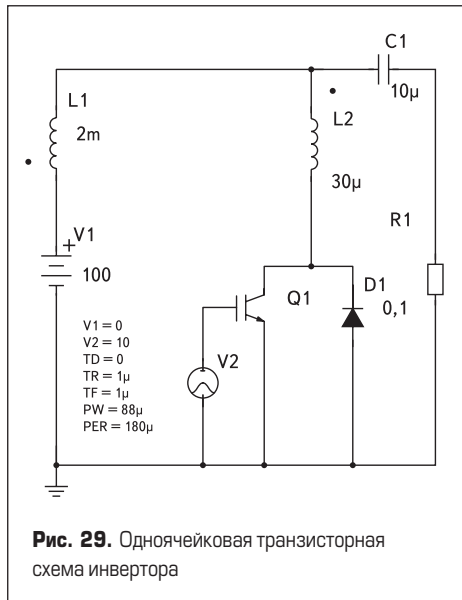


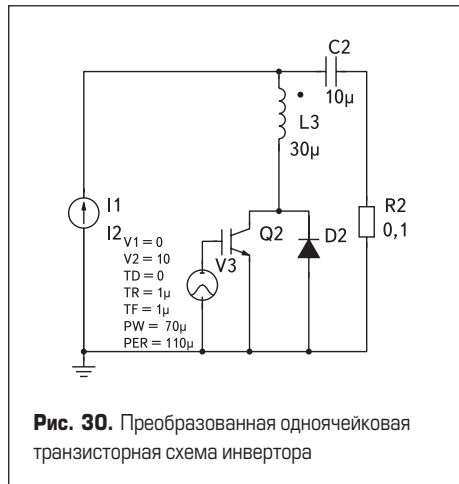
Рис. 28. Осциллограммы токов и напряжений на элементах схем на рис. 26 и 27, состоящих из транзистора Q1 и диода D1 (сплошные линии) и транзистора Q2 и диода D2 (штрихи)



**Рис. 29.** Одноячейковая транзисторная схема инвертора

Корректность такого преобразования схемы одноячейкового транзисторного инвертора подтверждается хорошим совпадением токов и напряжений на элементах схем, приведенных на рис. 29 и 30, при моделировании.

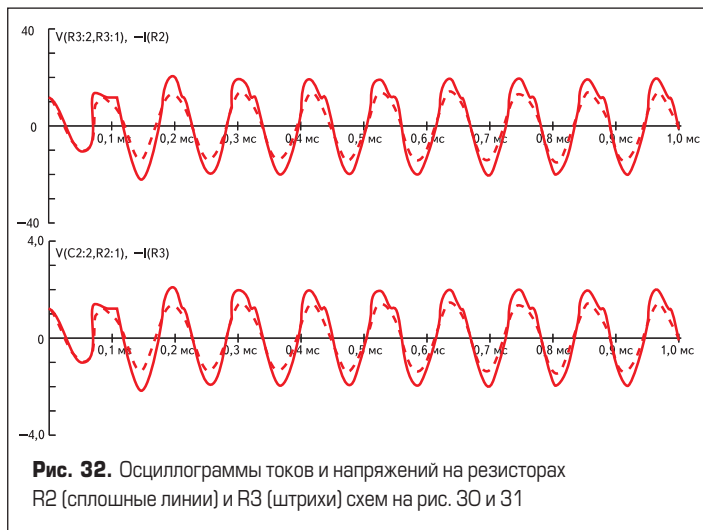
На рис. 31 дана схема, дуальная схеме на рис. 30. Построение выполнено на основании



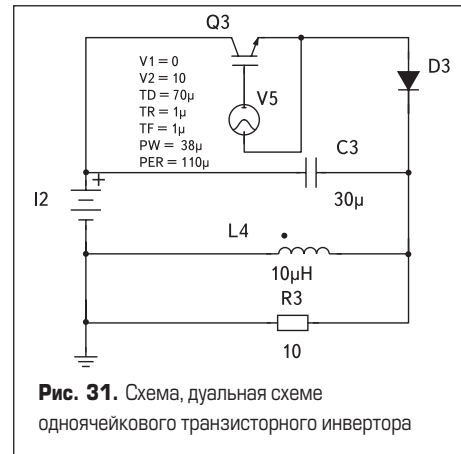
**Рис. 30.** Преобразованная одноячейковая транзисторная схема инвертора

правил, приведенных в разделе 5. Управление транзистором на первой схеме (рис. 31) является дополнительным по отношению к управлению транзистором на второй (рис. 30).

На рис. 32 представлены осциллограммы токов и напряжений на сопротивлениях нагрузки R2 и R3 для исходной (рис. 30) и дуальной (рис. 31) схем. Осциллограммы демонстрируют хорошее качественное и удовлетворительное количественное совпадение соответствующих токов и напряжений.



**Рис. 32.** Осциллограммы токов и напряжений на резисторах R2 (сплошные линии) и R3 (штрихи) схем на рис. 30 и 31

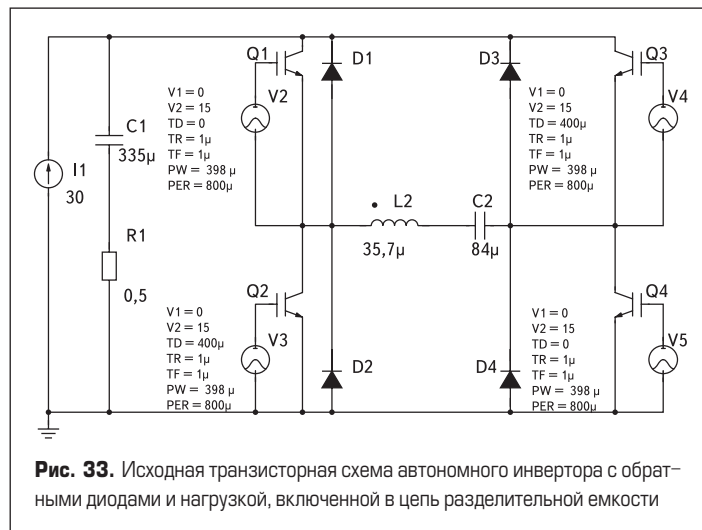


**Рис. 31.** Схема, дуальная схеме одноячейкового транзисторного инвертора

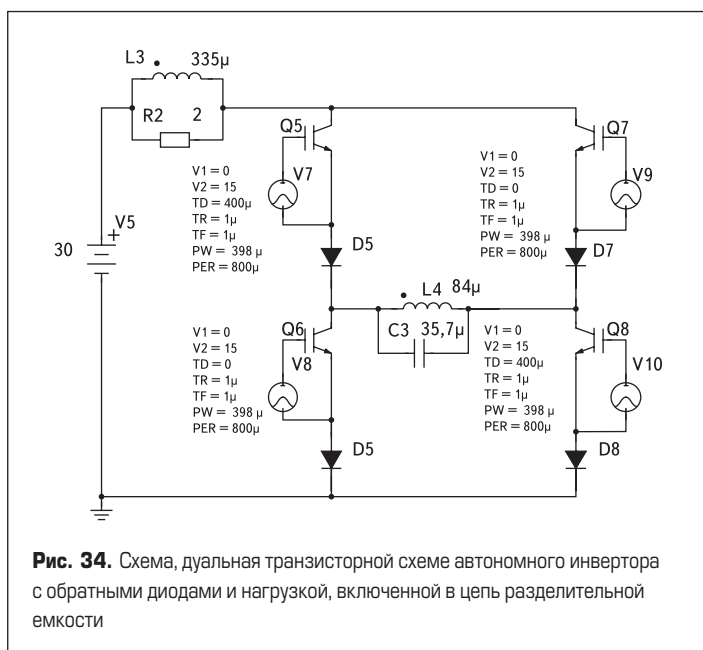
**9.2. Схема, дуальная мостовой транзисторной схеме с обратными диодами и нагрузкой, включенной в цепь разделительной емкости**

В системах индукционного нагрева достаточно широко применяется транзисторная схема автономного инвертора с обратными диодами и нагрузкой, включенной в цепь разделительной емкости, приведенная на рис. 33.

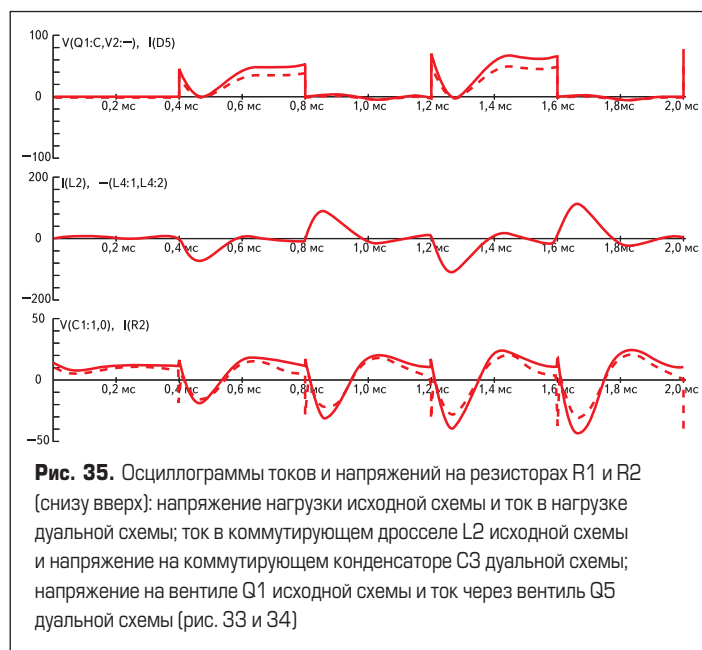
Традиционно такая схема запитывается от источника напряжения (выпрямителя), последовательно с которым ставится входной дрос-



**Рис. 33.** Исходная транзисторная схема автономного инвертора с обратными диодами и нагрузкой, включенной в цепь разделительной емкости



**Рис. 34.** Схема, дуальная транзисторной схеме автономного инвертора с обратными диодами и нагрузкой, включенной в цепь разделительной емкости



**Рис. 35.** Осциллограммы токов и напряжений на резисторах R1 и R2 (снизу вверх): напряжение нагрузки исходной схемы и ток в нагрузке дуальной схемы; ток в коммутирующем дросселе L2 исходной схемы и напряжение на коммутирующем конденсаторе C3 дуальной схемы; напряжение на вентиле Q1 исходной схемы и ток через вентиль Q5 дуальной схемы (рис. 33 и 34)

сель достаточно большой величины. На схеме, приведенной на рис. 33, источник напряжения, включенный последовательно с входным дросселем, заменен источником тока, что в режимах непрерывного входного тока является вполне корректным.

На рис. 34 приведена схема, дуальная транзисторной схеме автономного инвертора с обратными диодами и нагрузкой, включенной в цепь разделительной емкости. Построение схемы выполнено на основании правил, приведенных в разделе 5. Управление транзистором на этой схеме дополнительное по отношению к идентичному на схеме рис. 33. Для мостовых схем введение такого управления в рассматриваемом примере является формальным и необходимо для получения совпадения соответствующих осциллограмм, поскольку практически безразлично, какая из диагоналей моста будет работать с опережением, а какая — с отставанием.

Осциллограммы показывают вполне удовлетворительное совпадение дуальных токов и напряжений схем, приведенных на рис. 33 и 34.

Примеры, рассмотренные в данном разделе, подтверждают получение класса схем, дуальных исходным транзисторным, с использованием стандартных диодов и транзисторов в ключевых режимах, что позволяет разработчику в случае необходимости переводить «то-

ковые» или «напряженческие» проблемы исходных схем в «напряженческие» или «токовые» проблемы дуальных.

Отметим, что полного совпадения токов и напряжений в исходных и дуальных схемах за счет квазидуальных режимов работы диодов и транзисторов получить не удастся. Это позволяет поставить задачу коррекции токов и напряжений в дуальной схеме за счет изменения параметров ее элементов с целью приближения первых соответственно к напряжениям и токам исходной схемы.

В общем случае это задача вариативной оптимизации многопараметрической системы. Решению таких задач посвящено много литературных источников, в которых, к сожалению, не приводятся общезначимые критерии достижения оптимумов. В рассматриваемом нами случае можно поставить однокритериальную задачу совпадения (или приближения) тока или напряжения исходной схемы с соответствующим напряжением или током дуальной схемы. В такой постановке задача становится реальной, однако при этом следует иметь в виду, что совпадение или приближение тока или напряжения на одном элементе может привести к ухудшению соответствующих совпадений для других элементов схем. Целесообразность такой процедуры должна рассматриваться в каждом конкретном случае.

Таким образом, в данной статье показана возможность получения дуальных и квазидуальных схем с использованием реально существующих диодов и транзисторов, работающих в ключевом режиме, то есть провести синтез, удваивающий количество схем рассматриваемого класса.

## Литература

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа. 1964.
2. Атабеков Г. И. Линейные электрические цепи. М.: Энергия. 1970.
3. Зыков А. А. Теория конечных графов. Новосибирск: Наука. 1969.
4. Сешу С., Рид М. Е. Линейные графы и электрические цепи. М.: Высшая школа. 1971.
5. Болотовский Ю. И., Попов Н. П. Алгоритм выбора системы линейно независимых контуров на графе // Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева. Уфа, 1977. № 7.
6. PSpice Reference Guide, Cadence Design System, Inc.
7. Kukul T. S. Convergence Guide/ Edited by Shilpa Sharma, July 2003.
8. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга». М.: СОЛОН-Пресс. 2005.
9. Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black M. Handbook of Induction Heating. Marcel Dekker AG. Basel. 2003.