

Импульсный преобразователь напряжения постоянного тока по схеме Чука

В статье представлена предельная непрерывная модель импульсного преобразователя напряжения постоянного тока по схеме Чука, позволившая оценить его основные свойства. Предложена методика оценки размаха пульсаций токов и напряжений преобразователя. С помощью математической модели преобразователя, учитывающей переключение его структуры, оценена корректность полученных результатов. Проведено сравнение с инвертирующим импульсным преобразователем, показавшее преимущества схемы Чука по основным показателям при практически полном совпадении статических характеристик.

Анатолий Коршун, д. т. н.

a.i.korshunov@mail.ru

Введение

Импульсный преобразователь напряжения постоянного тока (ИПНПТ) по схеме Чука [1, 2, 3] (рис. 1а) инвертирует входное напряжение и изменяет его величину в обе стороны подобно известному инвертирующему ИПНПТ. В отечественной литературе ИПНПТ Чука не уделено достаточного внимания, несмотря на многие его декларируемые достоинства. Задачей данной публикации является анализ свойств ИПНПТ Чука и их сравнение со свойствами известного инвертирующего ИПНПТ.

Математическая модель преобразователя Чука

В данной статье свойства ИПНПТ Чука анализируются на основе его предельной непрерывной модели.

Предельная непрерывная модель отличается от усредненной тем, что получена строгим математическим методом — предельным переходом по периоду переключений, стремящемуся к нулю ($T \rightarrow 0$). Модель соответствует непрерывной системе с полностью отсутствующими пульсациями фазовых координат [4]. При достаточно малом T свойствах преобразователя можно судить по его предельной непрерывной модели.

При построении модели принимаем обычные допущения: ПТ и VD полагаются идеальными, рассматривается режим непрерывного тока. Это позволяет в дальнейшем рассматривать эквивалентную схему преобразователя, представленную на рис. 1б.

ИПНПТ Чука, подобно другим ИПНПТ, относится к классу систем с периодическим высокочастотным изменением структуры. Изменение структуры осуществляет ключ К. Структура преобразователя Чука при положении ключа К «1» в течение первой части периода $0 < t < \tau = \gamma T$ представлена на рис. 2а, а при положении ключа К «2» в течение второй части периода $\gamma T = \tau < t < T$ представлена на рис. 2б.

Обе схемы содержат четыре ветви и два узла, что требует для описания каждой схемы четырех уравнений: одно по I закону Кирхгофа и три по II закону Кирхгофа. Уравнения для схем, приведенных на рис. 2а и рис. 2б:

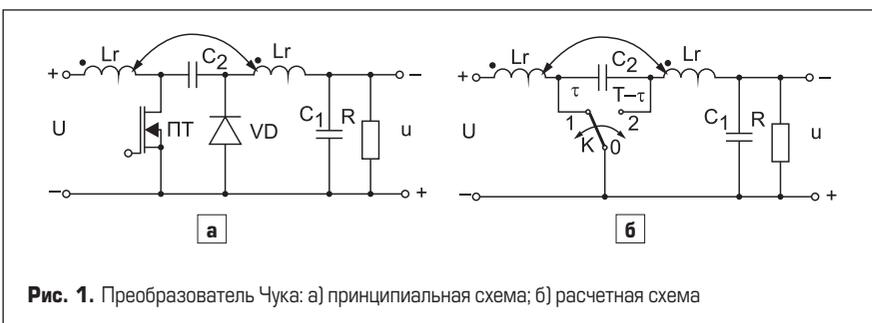


Рис. 1. Преобразователь Чука: а) принципиальная схема; б) расчетная схема

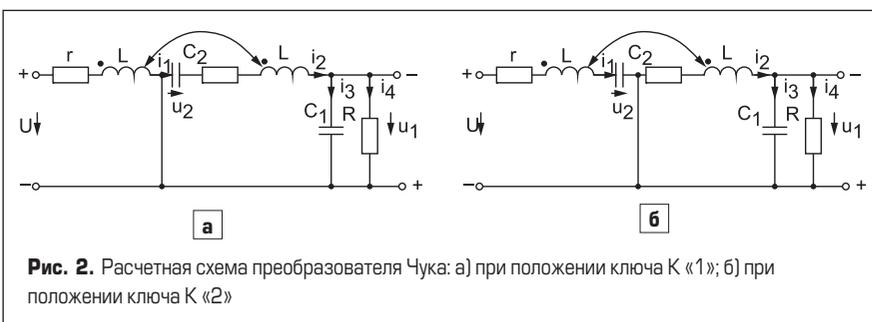


Рис. 2. Расчетная схема преобразователя Чука: а) при положении ключа К «1»; б) при положении ключа К «2»

$$\begin{aligned} L \frac{di_1}{dt} + ri_1 + M \frac{di_2}{dt} &= U, \\ L \frac{di_2}{dt} + ri_2 + M \frac{di_1}{dt} + u_1 + u_2 &= 0, \\ u_1 - Ri_4 &= 0, \\ i_2 - i_3 - i_4 &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} L \frac{di_1}{dt} + ri_1 + M \frac{di_2}{dt} + u_2 &= U, \\ L \frac{di_2}{dt} + ri_2 + M \frac{di_1}{dt} + u_1 &= 0, \\ u_1 - Ri_4 &= 0, \\ i_2 - i_3 - i_4 &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Состояние схемы в фазовом пространстве $\{X\}$ определяют четыре координаты: $X = [i_1, i_2, u_1, u_2]^T$.

Разрешив первые два уравнения систем (1) и (2) относительно di_1/dt и di_2/dt и учтя уравнения конденсаторов $C_1 du_1/dt = i_3$, $C_2 du_2/dt = i_2$ в первой части периода и $C_1 du_1/dt = i_3$, $C_2 du_2/dt = i_1$ во второй части периода, приводим системы уравнений (1) и (2) к форме Коши:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= -\frac{Lr}{D}i_1 + \frac{Mr}{D}i_2 + \frac{M}{D}u_1 + \frac{M}{D}u_2 + \frac{L}{D}U, \\ \frac{di_2}{dt} &= \frac{Mr}{D}i_1 - \frac{Lr}{D}i_2 - \frac{L}{D}u_1 - \frac{L}{D}u_2 - \frac{M}{D}U, \\ \frac{du_1}{dt} &= \frac{1}{C_1}i_2 - \frac{1}{RC_1}u_1, \\ \frac{du_2}{dt} &= \frac{1}{C_2}i_2, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= -\frac{Lr}{D}i_1 + \frac{Mr}{D}i_2 + \frac{M}{D}u_1 - \frac{L}{D}u_2 + \frac{L}{D}U, \\ \frac{di_2}{dt} &= \frac{Mr}{D}i_1 - \frac{Lr}{D}i_2 - \frac{L}{D}u_1 + \frac{M}{D}u_2 - \frac{M}{D}U, \\ \frac{du_1}{dt} &= \frac{1}{C_1}i_2 - \frac{1}{RC_1}u_1, \\ \frac{du_2}{dt} &= \frac{1}{C_2}i_1, \end{aligned} \quad (4)$$

где $D = L^2 - M^2$.

В векторно-матричной форме:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A_1 X + h_1 U, \\ A_1 &= \begin{bmatrix} -\frac{Lr}{D} & \frac{Mr}{D} & \frac{M}{D} & \frac{L}{D} \\ \frac{Mr}{D} & -\frac{Lr}{D} & -\frac{L}{D} & -\frac{L}{D} \\ 0 & \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{RC_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2}i_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ X &= \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad h_1 = \begin{bmatrix} \frac{L}{D} \\ -\frac{M}{D} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A_2 X + h_2 U, \\ A_2 &= \begin{bmatrix} -\frac{Lr}{D} & \frac{Mr}{D} & \frac{M}{D} & -\frac{L}{D} \\ \frac{Mr}{D} & -\frac{Lr}{D} & -\frac{L}{D} & \frac{M}{D} \\ 0 & \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{RC_1} & 0 \\ \frac{1}{C_2} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ h_2 &= \begin{bmatrix} \frac{L}{D} \\ -\frac{M}{D} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Предельная непрерывная модель преобразователя Чука согласно [4] имеет вид:

$$\dot{X} = AX + hU,$$

$$u_1 = c^T X, \quad c^T = [0, 0, 1, 0], \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \gamma A_1 + (1-\gamma)A_2 = \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{Lr}{D} & \frac{Mr}{D} & \frac{M}{D} & \gamma\frac{M}{D} - (1-\gamma)\frac{L}{D} \\ \frac{Mr}{D} & -\frac{Lr}{D} & -\frac{L}{D} & -\gamma\frac{L}{D} + (1-\gamma)\frac{M}{D} \\ 0 & \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{RC_1} & 0 \\ \frac{\gamma}{C_2} & \frac{1}{\gamma C_2} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ h &= \gamma h_1 + (1-\gamma)h_2 = \begin{bmatrix} \frac{L}{D} \\ -\frac{M}{D} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

В стационарном режиме при $U = \text{const}$, $\gamma = \gamma_0$:

$$X = X_0 = A^{-1}hU = [I_{10}, I_{20}, U_{10}, U_{20}],$$

где

$$\begin{aligned} U_{10} &= -\frac{\gamma_0 U}{1-\gamma_0} \times \frac{R}{R + [1 + \gamma_0^2 / (1-\gamma_0)^2]r} = \\ &= -\frac{\gamma_0 (1-\gamma_0)RU}{(1-\gamma_0)^2 R + [(1-\gamma_0)^2 + \gamma_0^2]r}, \end{aligned} \quad (8) \quad \text{где}$$

$$U_{20} = \frac{U}{1-\gamma_0} \times \frac{R+r}{R + [1 + \gamma_0^2 / (1-\gamma_0)^2]r}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} I_{20} &= \frac{U_{10}}{R} = -\frac{\gamma_0 U}{1-\gamma_0} \times \\ &\times \frac{1}{R + [1 + \gamma_0^2 / (1-\gamma_0)^2]r}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} I_{10} &= -\frac{\gamma_0 I_{20}}{1-\gamma_0} = \frac{U_{10}}{R} = \\ &= \frac{\gamma_0^2 U}{(1-\gamma_0)^2} \times \frac{1}{R + [1 + \gamma_0^2 / (1-\gamma_0)^2]r}. \end{aligned} \quad (11)$$

Статическая характеристика преобразователя Чука $U_{10} = f(\gamma_{10})$ при крайних значениях γ_{10} (0 и 1) принимает нулевое значение ($U_{10} = 0$). Исследование на экстремум дает единственную стационарную точку характеристики

$$\gamma_{0m} = 1 / (1 + \sqrt{r / (r + R)}), \quad (12)$$

соответствующую максимуму величины выходного напряжения:

$$(U_{10})_m = U_{10}(\gamma_0)|_{\gamma_0=\gamma_{0m}} = \frac{U\sqrt{R/r}}{2 + \sqrt{1+r/R}}. \quad (13)$$

Оценка пульсаций токов и напряжений в преобразователе Чука

Для упрощения получения оценки пренебрежем потерями в дросселе. С учетом допущения схемы рис. 2а и 2б описываются соответственно системами уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= \frac{M}{D}u_1 + \frac{L}{D}u_2 + \frac{L}{D}U, \\ \frac{di_2}{dt} &= -\frac{L}{D}u_1 - \frac{L}{D}u_2 - \frac{M}{D}U, \\ \frac{du_1}{dt} &= \frac{1}{C_1}i_2 - \frac{1}{RC_1}u_1, \\ \frac{du_2}{dt} &= \frac{1}{C_2}i_2, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= +\frac{M}{D}u_1 - \frac{L}{D}u_2 + \frac{L}{D}U, \\ \frac{di_2}{dt} &= -\frac{L}{D}u_1 + \frac{M}{D}u_2 - \frac{M}{D}U, \\ \frac{du_1}{dt} &= \frac{1}{C_1}i_2 - \frac{1}{RC_1}u_1, \\ \frac{du_2}{dt} &= \frac{1}{C_2}i_1, \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя в уравнения (15) и (16) токи и напряжения в виде суммы постоянной и пульсирующей составляющих

$$\begin{aligned} i_1 &= I_{10} + \delta i_1, \quad i_2 = I_{20} + \delta i_2, \\ u_1 &= U_{10} + \delta u_1, \quad u_2 = U_{20} + \delta u_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{10} &\approx \frac{\gamma_0^2 U}{(1-\gamma_0)^2 R}, \quad I_{20} \approx -\frac{\gamma_0 U}{(1-\gamma_0)R}, \\ U_{10} &\approx -\frac{\gamma_0 U}{(1-\gamma_0)}, \quad U_{20} \approx \frac{U}{(1-\gamma_0)}, \end{aligned}$$

и пренебрегая в правых частях всех уравнений, кроме третьего, пульсирующими составляющими, получаем из уравнений (14) и (15) соответственно:

$$\begin{aligned} \frac{d\delta i_1}{dt} &= \frac{M+L}{D}U, \quad \frac{d\delta i_2}{dt} = -\frac{M+L}{D}U, \\ \frac{d\delta u_1}{dt} &= \frac{1}{C_1}\delta i_2 - \frac{1}{RC_1}\delta u_1, \\ \frac{d\delta u_2}{dt} &= -\frac{\gamma_0 U}{(1-\gamma_0)R}, \\ \frac{d\delta i_1}{dt} &= -\frac{\gamma_0}{(1-\gamma_0)} \times \frac{M+L}{D}U, \\ \frac{d\delta i_2}{dt} &= \frac{\gamma_0}{(1-\gamma_0)} \times \frac{M+L}{D}U, \\ \frac{d\delta u_1}{dt} &= \frac{1}{C_1}\delta i_2 - \frac{1}{RC_1}\delta u_1, \\ \frac{d\delta u_2}{dt} &= \frac{\gamma_0^2 U}{(1-\gamma_0)^2 R}. \end{aligned} \quad (16)$$

В течение первой части периода переключений (ключ К в положении «1», $0 < t < \tau = \gamma T$), согласно эквивалентной схеме рис. 5а, преобразователь описывается системой дифференциальных уравнений

$$L \frac{di}{dt} = -ri + U, \quad C \frac{du_c}{dt} = -\frac{u_c}{R},$$

или в векторно-матричной форме:

$$\dot{X} = A_1 X + h_1 U, \quad X = \begin{bmatrix} i \\ u_c \end{bmatrix},$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, \quad h_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

В течение второй части периода переключений (ключ К в положении «2», $\gamma T = \tau < t < T$), согласно эквивалентной схеме рис. 5б, преобразователь описывается системой дифференциальных уравнений

$$L \frac{di}{dt} = -ri - u_c, \quad C \frac{du_c}{dt} = i - \frac{u_c}{R},$$

или в векторно-матричной форме

$$\dot{X} = A_2 X + h_2 U, \quad X = \begin{bmatrix} i \\ u_c \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, \quad h_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Предельная непрерывная модель инвертирующего преобразователя, согласно [4], имеет в векторно-матричной форме следующий вид:

$$\dot{X} = AX + hU, \quad X = \begin{bmatrix} i \\ u_c \end{bmatrix},$$

$$A = \gamma A_1 + (1-\gamma)A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & \frac{1-\gamma}{L} \\ \frac{1-\gamma}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix},$$

$$h = \gamma h_1 + (1-\gamma)h_2 = \begin{bmatrix} \frac{\gamma}{L} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Записав соответствующую систему дифференциальных уравнений, получаем:

$$L \frac{di}{dt} = -ri - (1-\gamma)u_c + \gamma U,$$

$$C \frac{du_c}{dt} = (1-\gamma)i - \frac{1}{R}u_c.$$

Приравняв производные к 0, получаем систему уравнений стационарного режима:

$$rI_0 - (1-\gamma_0)U_{c0} = \gamma_0 U, \quad (1-\gamma_0)I_0 - \frac{1}{R}U_{c0} = 0,$$

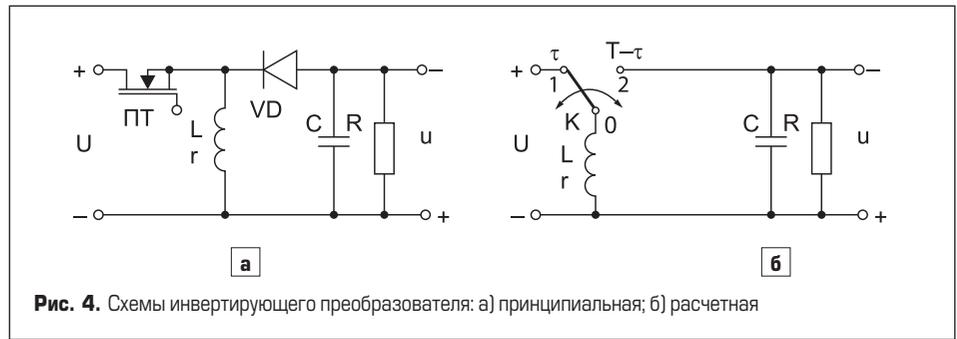


Рис. 4. Схемы инвертирующего преобразователя: а) принципиальная; б) расчетная

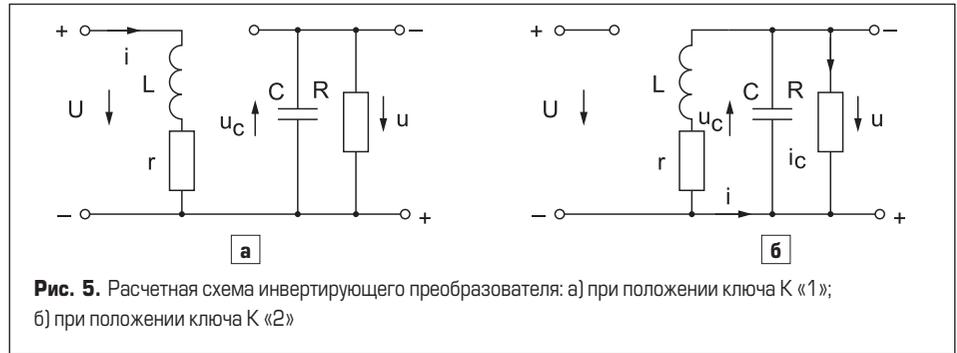


Рис. 5. Расчетная схема инвертирующего преобразователя: а) при положении ключа К «1»; б) при положении ключа К «2»

откуда находим установившиеся значения фазовых координат системы:

$$U_{c0} = -U_0 =$$

$$= \frac{\gamma_0 U}{1-\gamma_0} \times \frac{R}{R+r/(1-\gamma_0)^2} = \frac{\gamma_0(1-\gamma_0)RU}{(1-\gamma_0)^2 R+r},$$

$$I_0 = \frac{\gamma_0 U}{r+(1-\gamma_0)^2 R}. \quad (23)$$

Исследование на экстремум функции $U_{c0}(\gamma_0)$ показывает наличие максимума при

$$\gamma_0 = \gamma_m = 1/(1+\sqrt{r/(R+r)}), \quad (24)$$

$$(U_{c0})_{\max} = |U_0|_{\max} =$$

$$= U_{c0}(\gamma_m) = \frac{R}{2\sqrt{r}(\sqrt{R+r}+\sqrt{r})} U. \quad (25)$$

При тех же допущениях, что и при оценке пульсаций в схеме Чука, для инвертирующего

преобразователя получены системы уравнений для $0 < t < \tau = \gamma T$ и для $\gamma T = \tau < t < T$ соответственно:

$$L \frac{d\delta i}{dt} = U, \quad L \frac{d\delta i}{dt} = -U_{c0},$$

$$C \frac{d\delta u_c}{dt} = -\frac{1}{R}U_{c0}, \quad C \frac{d\delta u_c}{dt} = I_0 - \frac{U_{c0}}{R}.$$

Из полученных систем уравнений определяем размах пульсаций тока дросселя и выходного напряжения преобразователя:

$$\Delta i = \frac{UT\gamma_0}{L}, \quad \Delta u = \frac{U}{RC} \times \frac{T\gamma_0^2}{1-\gamma_0}. \quad (26)$$

Относительная величина пульсаций выходного напряжения увеличивается с ростом γ :

$$\frac{\Delta u}{|U_0|} = \frac{U}{RC} \times \frac{T\gamma_0}{1-\gamma_0} / \frac{\gamma_0 U}{1-\gamma_0} = \frac{T\gamma_0}{RC}. \quad (27)$$

Сравнение статических характеристик преобразователей (см. (8) и (23)) показывает,

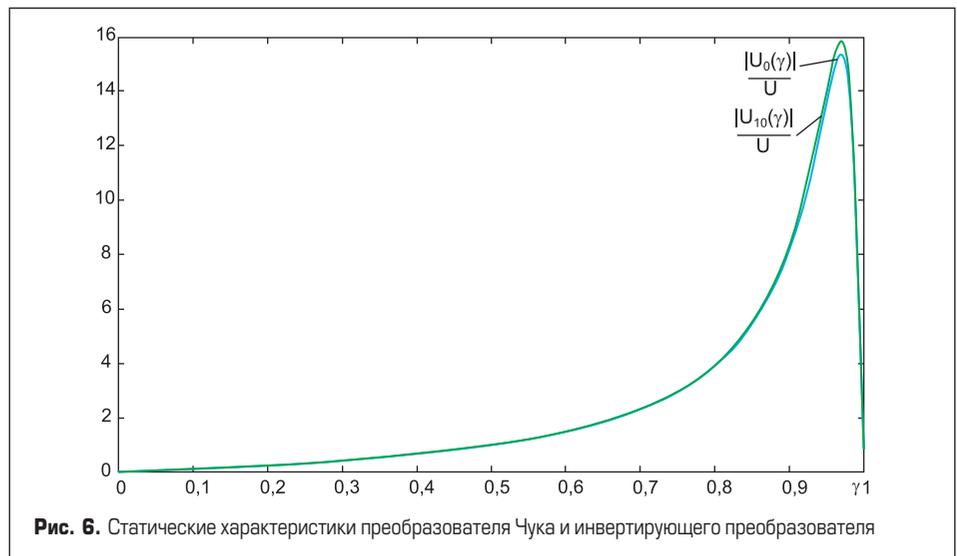


Рис. 6. Статические характеристики преобразователя Чука и инвертирующего преобразователя

Таблица 2. Собственные значения матрицы A при разных знаках взаимоиндуктивности обмоток дросселя и $\gamma_0 = 0,4$

	$\lambda_{1,2r} c$	$\lambda_{3,4r} c$
$M = -0,009$ Гн	$-2,4426 \times 10^2 \pm 1,3505 \times 10^3 i$	$-2,5626 \times 10^2 \pm 1,0027 \times 10^3 i$
$M = +0,009$ Гн	$-2,1043 \times 10^1 \pm 1,8781 \times 10^3 i$	$-4,8948 \times 10^2 \pm 7,3127 \times 10^3 i$

Таблица 3. Собственные значения матрицы A при разных знаках взаимоиндуктивности обмоток дросселя и $\gamma_0 = 0,6$

	$\lambda_{1,2r} c$	$\lambda_{3,4r} c$
$M = -0,009$ Гн	$-2,4439 \times 10^2 \pm 8,7673 \times 10^3 i$	$-2,5614 \times 10^2 \pm 1,0079 \times 10^3 i$
$M = +0,009$ Гн	$-2,8845 \times 10^1 \pm 1,2293 \times 10^3 i$	$-4,7168 \times 10^2 \pm 7,4472 \times 10^3 i$

что при $r \ll R$ характеристики оказываются очень близкими, причем характеристика схемы Чука проходит немного выше характеристики инвертирующего преобразователя.

На рис. 6 представлены относительные статические характеристики $|U_{10}(\gamma)|/U$ схемы Чука и $|U_0(\gamma)|/U$ понижающего преобразователя при $R = 100$ Ом, $r = 0,1$ Ом.

Форма пульсаций выходного напряжения в схеме Чука гладкая, как после LC -фильтра, а размах пульсаций пропорционален квадрату периода коммутации, т. е. T^2 . В инвертирующем преобразователе пульсации выходного напряжения имеют пилообразную форму, как после RC -фильтра, а размах пульсаций пропорционален периоду коммутации T . Вычисление размаха пульсаций выходного напряжения в инвертирующем преобразователе при тех же значениях $U, R, T, C = C_1$ и γ_0 , согласно формуле (26), имеет значение $4/15$ В (267×10^{-3} В), в 100 раз большее, чем в схеме Чука.

Потребляемый схемой Чука ток от источника питания непрерывен с пульсациями пилообразной формы, размах которых пропорционален периоду коммутации T . В инвертирующем преобразователе входной ток имеет разрывы непрерывности первого рода в моменты срабатывания ключа К. Ток, потребляемый инвертирующим преобразователем, приближается к последовательности прямоугольных импульсов с амплитудой I_0 (23) и длительностью γT .

Подмагничивание сердечника дросселя в схеме Чука происходит при $M < 0$ намагничивающей силой:

$$F = W(I_{10} - I_{20}) = W \frac{\gamma_0 U}{(1 - \gamma_0)^2 R + [(1 - \gamma_0)^2 + \gamma_0^2] r} \quad (28)$$

В инвертирующем преобразователе сердечник дросселя подмагничивается намагничивающей силой:

$$F = WI_0 = W \frac{\gamma_0 U}{(1 - \gamma_0)^2 R + r} \quad (29)$$

Анализ выражений (28) и (29) показывает, что при $r \ll R$ подмагничивание сердечника дросселя практически одинаково в обеих схемах, а с учетом r в схеме Чука незначительно меньше.

Сравнение габаритов схемы Чука и инвертирующего преобразователя показывает следующее. Поскольку подмагничивание сердечника дросселя в обеих схемах одинаково, а сумма величин токов в двух обмотках дросселя схемы Чука

$$I_{10} + |I_{20}| = \frac{\gamma_0 U}{(1 - \gamma_0)^2 R + [(1 - \gamma_0)^2 + \gamma_0^2] r}$$

оказывается практически равной току дросселя в инвертирующем преобразователе, мож-

но считать габариты дросселей одинаковыми. Схема Чука имеет два конденсатора вместо одного у инвертирующего преобразователя. Однако для получения одинакового размаха пульсаций емкость выходного конденсатора в инвертирующем преобразователе должна быть на два порядка больше.

Кроме рассмотренных свойств преобразователей, существенное значение имеют и динамические свойства, определяющие их работу в переходных режимах и при охвате обратной связью.

Динамические свойства преобразователя при изменении входного напряжения и постоянном $\gamma = \tau/T$ зависят от собственных значений матрицы предельной непрерывной модели A (7) для схемы Чука и (22) для инвертирующего преобразователя. Поскольку элементы матрицы A зависят от $\gamma = \tau/T$, то и ее собственные значения зависят от γ .

Поскольку коэффициенты векторно-матричных уравнений (7) и (22) зависят от γ , это существенно затрудняет аналитический анализ динамических свойств преобразователей при изменении γ .

Собственные значения матрицы A (7) схемы Чука при параметрах $R = 100$ Ом, $r = 0,1$ Ом, $L = 0,01$ Гн, $M = 0,009$ Гн, $C_1 = C_2 = 10^{-5}$ Ф, $T = 10^{-5}$ с, вычисленные для значений $\gamma_0 = 0,4$ и $\gamma_0 = 0,6$, представлены в таблицах 2 и 3 соответственно.

Для инвертирующего преобразователя при параметрах $R = 100$ Ом, $r = 0,1$ Ом, $L = 0,01$ Гн, $C = 10^{-5}$ Ф, $T = 10^{-5}$ с собственные значения матрицы A (22), вычисленные для значений $\gamma_0 = 0,4$ и $\gamma_0 = 0,6$, имеют, соответственно, значения:

$$\lambda_{1,2} = -5,0005 \times 10^2 \pm 1,8303 \times 10^3 i$$

$$\text{и } \lambda_{1,2} = -5,0005 \times 10^2 \pm 1,1619 \times 10^3 i.$$

Временные диаграммы выходного напряжения преобразователей при включении входного напряжения $U = 100$ В (1 — для схемы Чука при $M = -0,009$ Гн, 2 — для схемы Чука при $M = +0,009$ Гн, 3 — для инвертирующего преобразователя) представлены на рис. 7 ($\gamma_0 = 0,4$) и на рис. 8 ($\gamma_0 = 0,6$).

Анализ процессов включения преобразователей, представленных на рис. 7 и 8, показывает, что лучшим качеством переходного процесса по устойчивости и по быстродействию обладает инвертирующий преобразователь. Из преобразователей Чука намного лучшим быстродействием обладает преобразователь с отрицательной взаимоиндукцией обмоток дросселя.

При одинаковых емкостях выходного конденсатора схема Чука с отрицательной взаимоиндуктивностью обмоток дросселя имеет размах пульсаций выходного напряжения в 100 раз меньше, чем у инвертирующего преобразователя. Увеличив емкость выходного конденсатора инвертирующего преобразователя в 100 раз, получаем тот же размах пульсаций выходного напряжения, как и в схеме Чука, но за счет резкого снижения устойчивости и быстродействия. На математической модели инвертирующего преобразователя, представленной

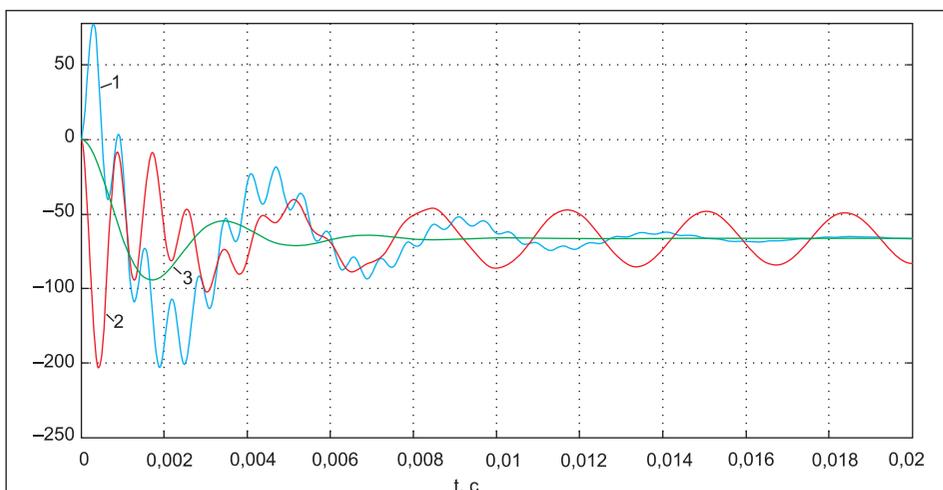


Рис. 7. Переходные процессы включения преобразователя Чука и инвертирующего преобразователя при $\gamma_0 = 0,4$

на рис. 9, получены переходные процессы включения инвертирующего преобразователя при исходной емкости выходного конденсатора в 10 мкФ и при увеличенной в 100 раз (кривые 1 и 2 на рис. 10 соответственно).

Собственные значения матрицы A (22) при увеличенной в 100 раз емкости выходного конденсатора: $\lambda_{1,2} = -1,00001 \times 10^4 \pm 1,8974 \times 10^2 i$ подтверждают сделанный вывод.

Включение преобразователя Чука при отрицательной взаимной индуктивности обмоток дросселя ($M < 0$) приводит к первоначальному изменению выходного напряжения в направлении, противоположном установившемуся отрицательному значению. Математически это объясняет передаточная функция преобразователя при $\gamma = \text{const}$:

$$W(p) = \frac{U_1(p)}{U(p)} = \frac{b_2 p^2 + b_0}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (30)$$

где $U(p)$ и $U_1(p)$ — изображения по Лапласу входного и выходного напряжений,

$$b_2 = C_2 M / (1-\gamma) D, \quad b_0 = \gamma, \quad a_4 = C_1 C_2 / (1-\gamma), \\ a_0 = (1-\gamma) + r[(\gamma^2 + (1-\gamma)^2) / (1-\gamma)] / R.$$

При включении постоянного входного напряжения U

$$U(p) = U/p, \quad U_1(p) = W(p)U/p$$

установившееся значение выходного напряжения

$$U_{10} = \lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p U_1(p) = -\frac{b_0}{a_0} U = \\ = -\frac{\gamma U}{1-\gamma + r[(\gamma^2 + (1-\gamma)^2) / (1-\gamma)] / R} = \\ = -\frac{\gamma U}{1-\gamma} \times \frac{R}{R + [1 + \gamma^2 / (1-\gamma)^2] r}$$

совпадает с полученным выше результатом (формула (8)).

Анализ начальных значений производных выходного напряжения $d^k u_1 / dt^k(+0)$, $k = 0, 1, 2$ дает следующее:

$$u_1(+0) = \lim_{p \rightarrow \infty} p U_1(p) = \\ = \lim_{p \rightarrow \infty} p[W(p)U/p] = U \lim_{p \rightarrow \infty} W(p) = 0, \\ du_1 / dt(+0) = U \lim_{p \rightarrow \infty} p^2 U_1(p) = 0, \\ d^2 u_1 / dt^2(+0) = U \lim_{p \rightarrow \infty} p^3 U_1(p) = \\ = -U \frac{b_2}{a_4} = -U \frac{C_2 M}{(1-\gamma) D} / \frac{C_1 C_2}{(1-\gamma)} = -\frac{UM}{DC_1}.$$

При $M < 0$ начальное значение второй производной выходного напряжения положительно при нулевом начальном значении его первой производной и отрицательном установившемся значении выходного напряжения. Это объяс-

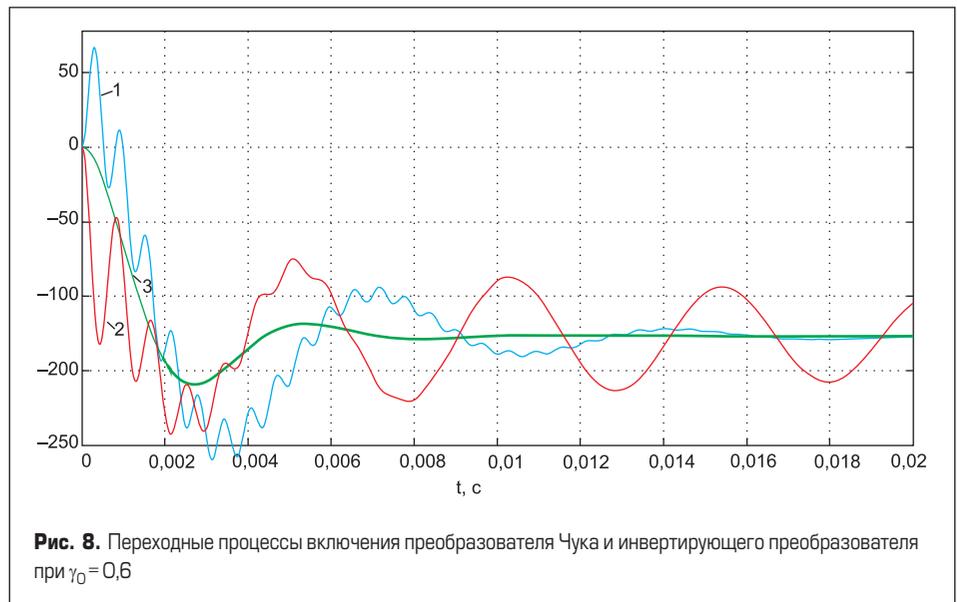


Рис. 8. Переходные процессы включения преобразователя Чука и инвертирующего преобразователя при $\gamma_0 = 0,6$

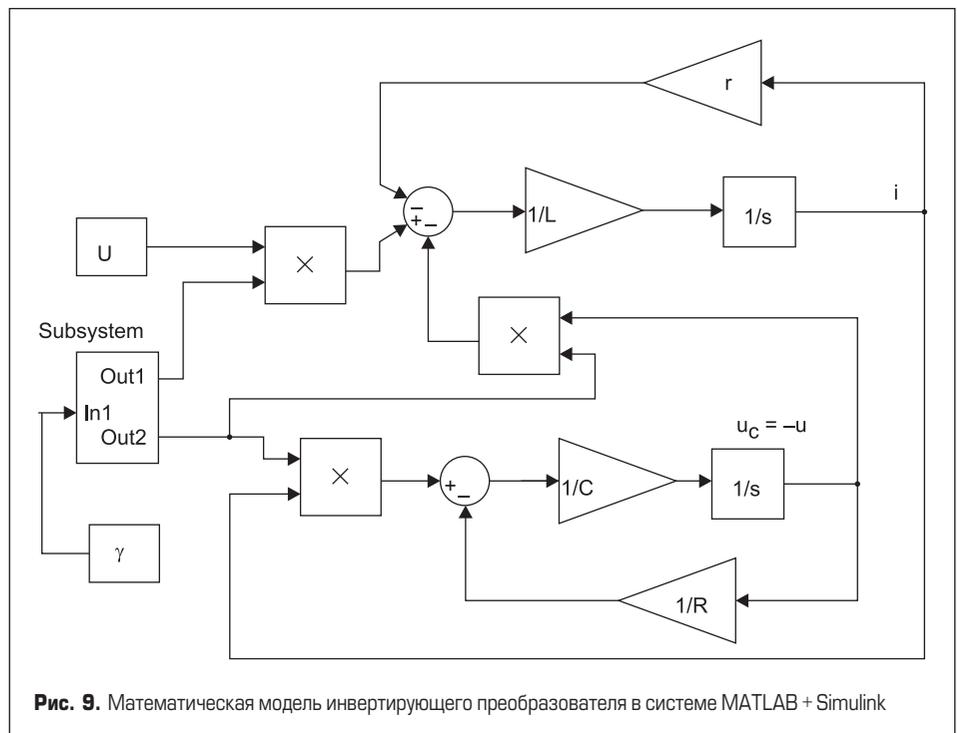


Рис. 9. Математическая модель инвертирующего преобразователя в системе MATLAB + Simulink

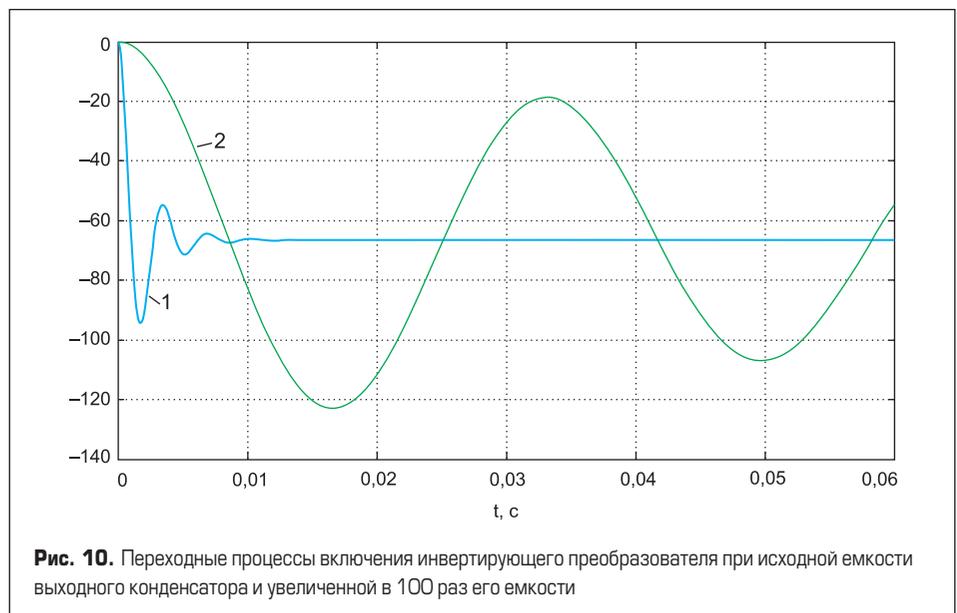


Рис. 10. Переходные процессы включения инвертирующего преобразователя при исходной емкости выходного конденсатора и увеличенной в 100 раз его емкости

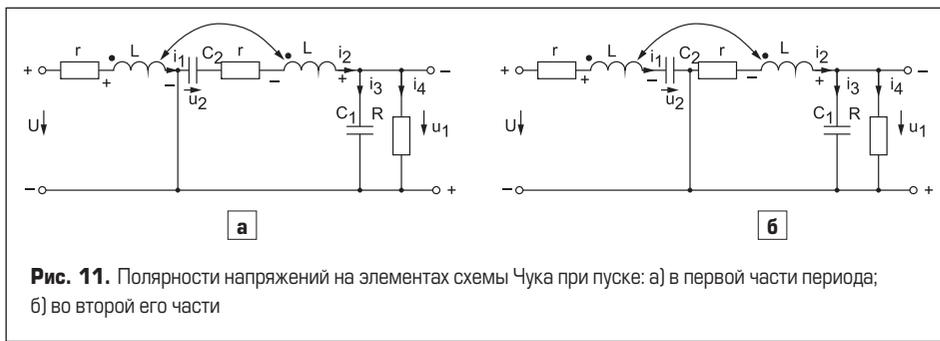


Рис. 11. Полярности напряжений на элементах схемы Чука при пуске: а) в первой части периода; б) во второй его части

няет начальное направление изменения выходного напряжения в направлении, противоположном установившемуся значению.

Такое свойство часто встречается у неминимально-фазовых систем, к которым относится и преобразователь Чука при изменении входного напряжения и $\gamma = \text{const}$. Действительно, из двух нулей передаточной функции $W(p)$ (30)

$$p_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{b_0}{b_2}} = \pm \sqrt{-\frac{\gamma(1-\gamma)D}{C_2 M}}$$

при $M < 0$ один лежит слева, а другой — справа от мнимой оси плоскости p .

Физический смысл первоначального изменения выходного напряжения при $M < 0$ в направлении, противоположном установившемуся значению, заключается в следующем. При включении преобразователя в первой части периода переключений, согласно рис. 2а, полярность ЭДС, наведенной во вторичной обмотке дросселя (рис. 11а), такова, что полярность выходного напряжения противоположна установившейся.

Учитывая, что при высокой частоте переключений конденсатор C_2 не успевает заметно зарядиться, во второй части периода полярности ЭДС в обеих обмотках дросселя не изменяются (рис. 11б), и выходной конденсатор C_1 продолжает заряжаться в преж-

ней полярности. Так будет продолжаться, пока C_2 не зарядится и не начнет перезаряжать C_1 в противоположной полярности и уменьшать напряжение, прикладываемое к первичной обмотке дросселя.

Выводы

1. Свойства импульсного преобразователя Чука существенно зависят от взаимоиндуктивности обмоток дросселя. При существенной величине взаимоиндуктивности изменение ее знака (перемена концов одной из обмоток) резко изменяет свойства преобразователя. При отрицательной взаимоиндуктивности пульсации выходного напряжения и входного тока существенно меньше, чем при положительной.
2. При отрицательной взаимоиндуктивности обмоток дросселя и постоянстве γ преобразователь Чука представляет собой неминимально-фазовую систему по отношению ко входному напряжению. Это проявляется в начальном изменении выходного напряжения при включении преобразователя в направлении, противоположном установившемуся значению.
3. Сравнение с известным инвертирующим импульсным преобразователем показало такое же значительное влияние малого активного сопротивления обмоток дросселя на величину выходного напряжения пре-

образователя. При одинаковых сопротивлениях нагрузки и достаточно малых сопротивлениях обмоток дросселя статические характеристики обоих преобразователей практически совпадают.

4. Пульсации выходного напряжения преобразователя Чука при одинаковых параметрах с инвертирующим преобразователем оказываются существенно меньшими, а входной ток оказывается непрерывным по сравнению с импульсным входным током инвертирующего преобразователя.
5. С точки зрения габаритов, схема Чука обладает лишним конденсатором, но для получения одинаковых пульсаций выходного напряжения выходной конденсатор в инвертирующем преобразователе должен иметь на два порядка большую емкость, что приводит к значительному ухудшению качества переходного процесса при включении по сравнению с преобразователем Чука.

Таким образом, преобразователь Чука обладает лучшими свойствами по сравнению с инвертирующим преобразователем.

Литература

1. S. Čúk and R. D. Middlebrook. A New Optimum Topology Switching DC-to-DC Converter // IEEE Power Electronics Specialist Conference. 1977.
2. S. Čúk and R. D. Middlebrook. Coupled Inductor and Other Extensions of a New Optimum Topology Switching Converter // IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting. 1977.
3. S. Čúk and W. M. Polivka. Analysis of Integrated Magnetics to Eliminate Current Ripple in Switching Converters // Power Conversion International Proceedings. 1983.
4. Коршунов А. И. Предельная непрерывная модель системы с высокочастотным периодическим изменением структуры // Известия вузов. Приборостроение. 2009. №9.