Гребенников Виталий Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ.
E-mail: grebennikovvv@tpu.ru
Область научных интересов: высокоэффективные преобразователи электрической энергии.
Ярославцев Евгений Витальевич, канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ.
E-mail: grebennikovvv@tpu.ru
Область научных интересов: высокоэффективные преобразователи электрической энергии.

УДК 621.314.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АМПЛИТУДЫ ВЫХОДНОГО ТОКА НА ЧАСТОТУ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ КЛЮЧА В СХЕМЕ ИНДУКТИВНО-КЛЮЧЕВОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ ТОКА

В.В. Гребенников, Е.В. Ярославцев

Томский политехнический университет
E-mail: grebennikovvv@tpu.ru

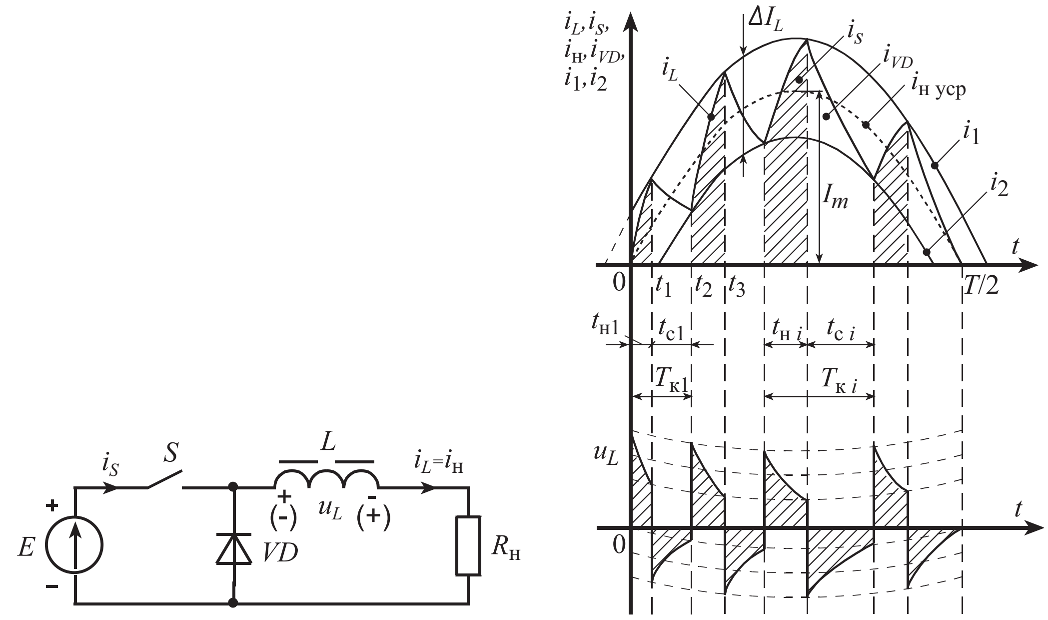
Представлены приближенные аналитические выражения для определения временных параметров переходных процессов в схеме индуктивно-ключевого формирователя квазисинусоидального тока, позволяющие предъявить требования к частотным свойствам и определить динамические потери ключа. Отражены результаты исследования влияния амплитуды выходного тока формирователя на изменения частоты переключения ключа в процессе формирования квазисинусоидального тока. Полученные данные важны при проектировании формирователей тока подобного типа.

Ключевые слова:
Источник питания, формирователь тока, квазисинусоидальный ток, электрохимические технологии.

В ряде случаев для повышения эффективности электрохимических процессов (электрокоагуляция, электродиализация, селективное извлечение металлов и др.) целесообразно использовать источники питания на базе индуктивно-ключевого формирователя квазисинусоидального асимметричного тока [1, 2]. При проектировании формирователя тока для рационального выбора элементной базы предъявляются требования к частотным свойствам, и определяются динамические потери в ключах схемы, для чего используются соответствующие расчетные соотношения. Точные выражения для расчета указанных параметров получены в работе [1], однако они являются трансцендентными, неудобными для практического использования, поскольку для получения конкретного результата требуется применение специального математического аппарата. Для упрощения процедуры расчета целесообразно получить более простые приближенные аналитические выражения, позволяющие с допустимой погрешностью рассчитать потери в ключах и предъявить требования к их частотным свойствам.

Схема индуктивно-ключевого формирователя квазисинусоидального асимметричного тока достаточно сложна [1], однако для решения поставленной задачи достаточно рассмотреть процесс формирования одной полуволны тока, что реализуется в упрощенном варианте схемы, представленном на рис. 1, *а*.

Принцип действия формирователя аналогичен используемому в активных корректорах коэффициента мощности [3]. Принципиальное отличие состоит в том, что в корректорах квазисинусоидальный ток формируется во входной цепи, а в рассматриваемой далее схеме – в выходной цепи (нагрузке) преобразователя постоянного напряжения в однополярный ток заданной формы.



а б

Рис. 1. Принципиальная схема индуктивно-ключевого формирователя однополярного тока (*а*) и диаграммы токов и напряжений (*б*)

Формирование квазисинусоидального тока в нагрузке осуществляется путем регулирования по заданному закону длительностей открытого и закрытого состояния ключа S и, соответственно, тока дросселя L и поясняется диаграммами токов и напряжений, приведенными на рис. 1, *б*. Для наглядности частота переключений ключа выбрана относительно невысокой.

Предположим, что на временном интервале $T/2$ для формирования заданной полуволны тока требуется N циклов работы ключа, каждый из которых состоит из двух переходных процессов: нарастания и спада тока дросселя, соответственно. Обозначим номер текущего цикла буквой i, причем $i = 1 \ldots N$ – целое число. Присвоим параметрам тока, напряжения и времени индексы: буквенный индекс «н» или «с» – указывает на этап нарастания или спада $i_L(t)$, соответственно; числовой индекс соответствует номеру рассматриваемого цикла.

При описании принципа действия схемы и выводе расчетных соотношений воспользуемся допущениями: источник E является идеальным источником напряжения; вентиль VD и ключ S – идеальны; активные потери в элементах схемы отсутствуют; дроссель L является линейным элементом; нагрузка $R_н$ постоянна и носит чисто активный характер; длительность текущего i-го цикла работы ключа $T_{к\,i}$ много меньше периода формируемой синусоиды, т. е. $T_{к\,i} << T$; за время текущего цикла работы ключа выходное напряжение формирователя $U_{н\,i} \approx \text{const}$ не меняется; ток нагрузки меняется по синусоидальному закону, т. е. его пульсации, обусловленные переключениями ключа, бесконечно малы.

Введем обозначения: $i_{н\ уср}(t) = i_{L\ уср}(t) = I_m \sin\omega t$ – усредненное значение тока дросселя и нагрузки, в идеале представляющего собой заданную полуволну синусоиды с амплитудой I_m, угловой частотой ω и периодом T; $i_1(t)$, $i_2(t)$ – верхний и нижний пороговые уровни, соответственно, ограничивающие пульсации тока дросселя относительно значения $i_{н\ уср}(t)$:

$$\left.\begin{aligned} i_1(t) &= 0,5\Delta I_L + i_{н\ уср}(t) = 0,5\Delta I_L + I_m \sin\omega t, \\ i_2(t) &= -0,5\Delta I_L + i_{н\ уср}(t) = -0,5\Delta I_L + I_m \sin\omega t \end{aligned}\right\}; \qquad (1)$$

$\Delta I_L = i_1(t) - i_2(t)$ – заданный размах пульсаций тока дросселя; $K_{пл} = \Delta I_L / I_m$ – коэффициент пульсаций тока дросселя и нагрузки; $U_{m\ н} = I_m R_н$ – усредненная амплитуда напряжения на нагрузке; $U^* = U_{m\ н}/E$ – нормированная амплитуда выходного напряжения; $\tau = L/R_н$ – постоянная времени цепи; $\tau^* = \tau/T$ – относительная постоянная времени; $\delta = 1/\tau^* = T/\tau$ – обратная величина относительной постоянной времени или коэффициент затухания переходного процесса, показывающий во сколько раз период синусоиды превышает постоянную времени; $t_{\text{н}\,i}{*} = t_{\text{н}\,i}/T$ – относительное время нарастания тока дросселя; $T_{\text{к}\,i}{*} = 1/f_{\text{к}\,i}{*} = T_{\text{к}\,i}/T$ – относительная длительность цикла; $t_{\text{с}\,i}{*} = t_{\text{с}\,i}/T$ – относительное время спада тока дросселя; $f_{\text{к}\,i}{*} = f_{\text{к}\,i}/f = 1/T_{\text{к}\,i}{*}$ – относительная локальная частота переключения.

Пусть в момент времени $t = 0$ ключ S замыкается. К последовательно включенным L и $R_{\text{н}}$ и обратному диоду VD прикладывается напряжение E, под действием которого VD заперт. В этот момент ток дросселя $i_L(t)$, а, соответственно, и ток нагрузки, равны нулю, следовательно, все напряжение источника E прикладывается к дросселю с положительной полярностью, указанной на рис. 1, *а* без скобок. С учетом принятых допущений ($T_{\text{к}\,i} << T \Rightarrow U_{\text{н}\,i} \approx \text{const}$) ток $i_L(t)$ начинает возрастать по линейному закону. Индуктивность дросселя выбрана такой, чтобы скорость увеличения тока $i_L(t)$ превышала скорость роста $i_{\text{н уср}}(t)$ с некоторым запасом. В момент времени t_1 ток дросселя достигает верхнего порогового уровня $i_1(t_1)$, и ключ S размыкается. Полярность напряжения на обмотке L меняется на противоположную, указанную на рис. 1, *а* в скобках. Замыкаясь через нагрузку и открытый обратный диод, ток дросселя линейно уменьшается. Достигнув нижнего порогового уровня $i_2(t_2)$ в момент времени t_2, ключ S вновь замыкается, и ток дросселя снова начинает возрастать. Далее описанные процессы циклически повторяются. Таким образом, в результате большого числа циклов работы ключа в нагрузке формируется ток, усредненное (аппроксимированное) значение которого (на рис. 1, *б* показано пунктирной линией) соответствует полуволне синусоидального сигнала.

Для получения основных расчетных соотношений проведем анализ переходных процессов в рассматриваемой схеме [4].

Рассмотрим некоторый i-й цикл работы ключа (рис. 1, *а*), имеющий место при t_i – фиксированный момент времени из диапазона 0–T/2, в который совершается i-й цикл работы формирователя. С учетом допущений ток нагрузки в этот момент имеет вполне определенное значение

$$i_{\text{н}\,i}(t_i) = I_m \sin \omega t_i.$$

На этапе нарастания тока дросселя в рассматриваемом цикле ключ S замкнут, и к дросселю приложено постоянное по величине положительное напряжение (полярность на рис. 1, *а* указана без скобок)

$$U_{L\text{н}\,i} = E - i_{\text{н}\,i}(t_i) R_{\text{н}} = \text{const}. \tag{2}$$

После размыкания ключа на этапе спада в этом же цикле ток замыкается через обратный диод VD, а напряжение на дросселе меняет знак (полярность напряжения показана на рис. 1, *а* в скобках) и становится равным

$$U_{L\text{с}\,i} = -i_{\text{н}\,i}(t_i) R_{\text{н}} = -U_{m\,\text{н}} \sin \omega t_i = \text{const}. \tag{3}$$

Как известно, напряжение и ток дросселя связаны между собой соотношением [4]

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}, \tag{4}$$

из которого следует, что, если напряжение, приложенное к дросселю, постоянно, то ток дросселя меняется по линейному закону:

$$i_L(t) = I_L(0) + \frac{U_L}{L} t,$$

где $I_L(0)$ – независимое начальное условие для переходного процесса.

С учетом последнего уравнения и выражений (2) и (3) законы изменения тока дросселя в i-м цикле приобретают вид (начало отсчета времени переносим в момент переключения ключа):

$$i_{L\text{н}\,i}(t) = I_{L\text{н}\,i}(0) + \frac{U_{L\text{н}\,i}}{L} t = I_{L\text{н}\,i}(0) + \frac{E - U_{m\,\text{н}} \sin \omega t_i}{L} t,$$

$$i_{L\text{с}\,i}(t) = I_{L\text{с}\,i}(0) + \frac{U_{L\text{с}\,i}}{L} t = I_{L\text{с}\,i}(0) - \frac{U_{m\,\text{н}} \sin \omega t_i}{L} t.$$

Независимые начальные условия для этапов нарастания и спада с учетом уравнений (1) определяются выражениями:

$$I_{L\text{н}\,i}(0)=i_2(t_i)=-\frac{\Delta I_L}{2}+I_{m\,\text{н}}\sin\omega t_i,$$

$$I_{L\text{с}\,i}(0)=i_1(t_i)=\frac{\Delta I_L}{2}+I_{m\,\text{н}}\sin\omega t_i.$$

Представим в формуле (4) дифференциалы времени и тока в виде приращений при постоянном напряжении на дросселе

$$U_L(t)=L\frac{\Delta i_L}{\Delta t}=const; \tag{5}$$

Обозначив $\Delta t=t_{\text{н}\,i}$ – для этапа нарастания, $\Delta t=t_{\text{с}\,i}$ – для этапа спада, подставляем указанные параметры в (5), и, используя выражения (2) и (3), после преобразований получаем:

$$t_{\text{н}\,i}=\frac{\Delta I_L L}{E-U_{m\,\text{н}}\sin\omega t_i}=\frac{K_{\text{пл}}\tau U^*}{1-U^*\sin\omega t_i},$$

$$t_{\text{с}\,i}=\frac{\Delta I_L L}{\left|-U_{m\,\text{н}}\right|\sin\omega t_i}=\frac{K_{\text{пл}}\tau}{\sin\omega t_i},$$

$$T_{\text{к}\,i}=t_{\text{н}\,i}+t_{\text{с}\,i}=\frac{K_{\text{пл}}\tau}{\sin\omega t_i-U^*\sin^2\omega t_i},$$

$$f_{\text{к}\,i}=\frac{1}{T_{\text{к}\,i}}=\frac{\sin\omega t_i-U^*\sin^2\omega t_i}{K_{\text{пл}}\tau}.$$

Используя ранее принятые обозначения, представим полученные параметры в безразмерном виде:

$$t_{\text{н}\,i}^*=\frac{t_{\text{н}\,i}}{T}=\frac{K_{\text{пл}}\cdot U^*}{\delta\cdot\left(1-U^*\sin\omega t_i\right)}, \tag{6}$$

$$t_{\text{с}\,i}^*=\frac{t_{\text{с}\,i}}{T}=\frac{K_{\text{пл}}}{\delta\cdot\sin\omega t_i}, \tag{7}$$

$$T_{\text{к}\,i}^*=\frac{T_{\text{к}\,i}}{T}=\frac{K_{\text{пл}}}{\delta\cdot\left(\sin\omega t_i-U^*\sin^2\omega t_i\right)}, \tag{8}$$

$$f_{\text{к}\,i}^*=\frac{f_{\text{к}\,i}}{f}=\frac{\delta(\sin\omega t_i-U^*\sin^2\omega t_i)}{K_{\text{пл}}}. \tag{9}$$

Наиболее важными для практики являются сведения о локальной частоте переключения ключа $f_{\text{к}}^*$ на полупериоде формируемой синусоиды, позволяющей определить требования, предъявляемые к частотным свойствам ключей, и оценить величину динамических потерь в них.

Приближенное выражение (9) позволяет весьма просто проследить тенденции изменения частоты переключения ключа на полупериоде синусоиды при изменении нормированной амплитуды выходного напряжения U^*. На рис. 2 представлены зависимости, полученные по выражению (9). Видно, что три локальных экстремума (2 максимума и 1 минимум) наблюдаются при значениях $U^*>0{,}5$; при $U^*\le 0{,}5$ имеет место единственный локальный экстремум – максимум.

Поскольку максимальная частота переключения ключа является важной с точки зрения выбора элементов величиной, целесообразно определить значения указанных экстремумов. Продифференцировав уравнение (9) по параметру $\omega t=\nu$ и приравняв результат к нулю, находим корни полученного уравнения, соответствующие искомым экстремумам:

$$\nu_1=\pi/2; \tag{10}$$

$$\nu_2=\arcsin\left(1/2U^*\right); \tag{11}$$

$$\nu_3=\pi-\arcsin\left(1/2U^*\right). \tag{12}$$

Анализ выражений (10)–(12) показал, что корни ν_2 и ν_3 существуют только для значений $U^* \geq 0{,}5$, а корень ν_1 – для всех значений из диапазона $0 \leq U^* \leq 0{,}5$.

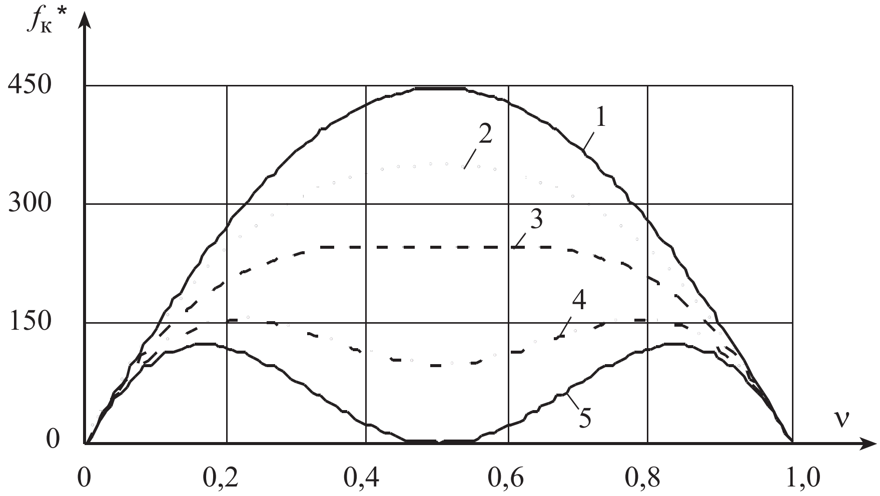


Рис. 2. Зависимости относительной локальной частоты переключения ключа от относительной текущей фазы при $K_{пл} = 0{,}2$, $\delta = 100$ и различных U^*: 1 – $U^* = 0{,}1$; 2 – $U^* = 0{,}3$; 3 – $U^* = 0{,}5$; 4 – $U^* = 0{,}8$; 5 – $U^* = 1{,}0$

Получим выражения для расчета относительной частоты переключения ключа в экстремальных точках. Для нахождения экстремумов частоты при $U^* \geq 0{,}5$ в уравнение (9) подставляем корни ν_1, ν_2, ν_3. После преобразований для первого и второго максимумов частоты переключения ключа получаем:

$$f_{к\,max1}{}^* = \frac{f_{к\,max1}}{f} = \frac{f_{к\,max2}}{f} = \frac{\delta}{4U^* K_{пл}}, \tag{13}$$

а выражение для локального минимума имеет вид:

$$f_{к\,min}{}^* = \frac{f_{к\,min}}{f} = \frac{\delta(1-U^*)}{K_{пл}}. \tag{14}$$

Подставляя корень ν_1 в уравнение (9), получаем выражение для определения единственного максимума частоты переключения ключа при $U^* \leq 0{,}5$:

$$f_{к\,max}{}^* = \frac{f_{к\,max}}{f} = \frac{\delta(1-U^*)}{K_{пл}}. \tag{15}$$

Выражения (14) и (15) идентичны. Это позволяет утверждать, что при изменении U^* от 0 до 1 максимум перерождается в минимум, причем граничный случай наблюдается при $U^* = 0{,}5$, когда $f_{к\,min}{}^* = f_{к\,max}{}^*$.

Уравнения (6)–(15) являются удобными для анализа, но приближенными, и могут служить для «качественной» оценки влияния того или иного параметра на длительность переходного процесса. Сравнение результатов расчетов максимальных частот, проведенных по приближенным формулам, с результатами, полученными при использовании точных формул [1], показало, что погрешность не превышает 10 %, если количество циклов переключения ключа составляет $N \geq 12$ при любом U^* и $K_{пл} \leq 0{,}3$.

Выводы

1. В результате проведенного анализа индуктивно-ключевого формирователя однополярного квазисинусоидального тока получены приближенные расчетные соотношения, определяющие временные параметры переходных процессов в схеме. Полученные относительно

простые выражения позволяют проследить тенденции и характер изменения временных параметров переходных процессов, происходящих в выходной цепи формирователя квазисинусоидального тока и произвести их расчет для заданных параметров нагрузки и тока.

2. Исследование показало, что при $U^* > 0,5$ функция относительной локальной частоты переключения ключа от относительной текущей фазы имеет три локальных экстремума – два максимума и один минимум; при $U^* < 0,5$ у функции наблюдается единственный экстремум – максимум, превышающий по величине максимальные частоты, характерные для случая $U^* > 0,5$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гребенников В.В. Индуктивно-ключевой формирователь асимметричного квазисинусоидального тока для электрохимических технологий: дис. … канд. техн. наук. – Томск, 2006. – 169 с.
2. Багинский Б.А., Гребенников В.В., Нигоф Б.М. Огородников Д.Н., Ярославцев Е.В. Модуляционный формирователь квазисинусоидального асимметричного тока // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 2. – С. 121–123.
3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
4. Попов В.П. Основы теории цепей. – Изд. 3-е, испр. – М.: Высшая школа, 2000. – 575 с.

Поступила 24.08.2012 г.