

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

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.

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.

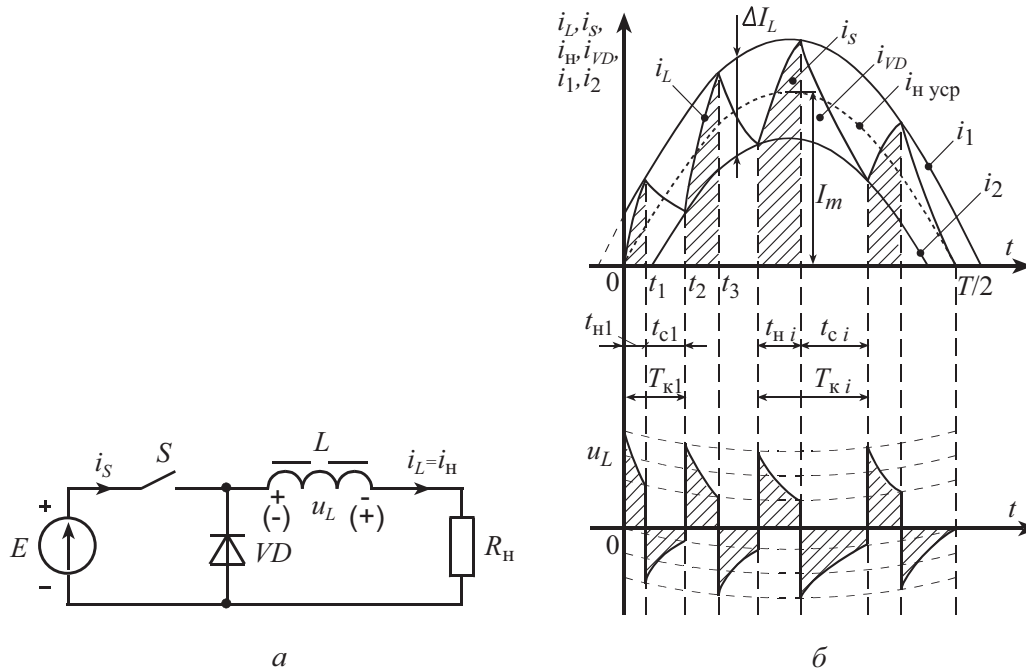


Рис. 1. Принципиальная схема индуктивно-ключевого формирователя однополярного тока (а) и диаграммы токов и напряжений (б)

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 $i = 1 \dots N$ – 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_n постоянна и носит чисто активный характер; длительность текущего i -го цикла работы ключа T_{ki} много меньше периода формируемой синусоиды, т. е. $T_{ki} \ll T$; за время текущего цикла работы ключа выходное напряжение формирователя $U_{ni} \approx \text{const}$ не меняется; ток нагрузки меняется по синусоидальному закону, т. е. его пульсации, обусловленные переключениями ключа, бесконечно малы.

Введем обозначения: $i_{n \text{ уср}}(t) = i_{L \text{ уср}}(t) = I_m \sin \omega t$ – 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 $i_{n \text{ уср}}(t)$:

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

$\Delta I_L = i_1(t) - i_2(t)$ – заданный размах пульсаций тока дросселя; $K_{пл} = \Delta I_L / I_m$ – коэффициент пульсаций тока дросселя и нагрузки; $U_{mн} = I_m R_n$ – усредненная амплитуда напряжения на нагрузке; $U^* = U_{mн} / E$ – нормированная амплитуда выходного напряжения; $\tau = L / R_n$ – постоянная времени цепи; $\tau^* = \tau / T$ – относительная постоянная времени; $\delta = 1 / \tau^* = T / \tau$ – обратная величина относительной постоянной времени или коэффициент затухания переходного процесса, показываю-

щий во сколько раз период синусоиды превышает постоянную времени; $t_{hi}^* = t_{hi}/T$ – относительное время нарастания тока дросселя; $T_{ki}^* = 1/f_{ki}^* = T_{ki}/T$ – относительная длительность цикла; $t_{ci}^* = t_{ci}/T$ – относительное время спада тока дросселя; $f_{ki}^* = f_{ki}/f = 1/T_{ki}^*$ – относительная локальная частота переключения.

Пусть в момент времени $t = 0$ ключ S замыкается. К последовательно включенным L и R_n 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, *a* без скобок. С учетом принятых допущений ($T_{ki} \ll T \Rightarrow U_{hi} \approx \text{const}$) ток $i_L(t)$ начинает возрастать по линейному закону. Индуктивность дросселя выбрана такой, чтобы скорость увеличения тока $i_L(t)$ превышала скорость роста $i_{n\text{уср}}(t)$ 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, *a* 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, *b* 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, *a*), 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

$$i_{ni}(t_i) = I_m \sin \omega t_i.$$

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

$$U_{Lni} = E - i_{ni}(t_i)R_n = \text{const}. \quad (2)$$

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, *a* в скобках) и становится равным

$$U_{Lci} = -i_{ni}(t_i)R_n = -U_{mн} \sin \omega t_i = \text{const}. \quad (3)$$

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

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

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):

$$i_{Lni}(t) = I_{Lni}(0) + \frac{U_{Lni}}{L}t = I_{Lni}(0) + \frac{E - U_{mн} \sin \omega t_i}{L}t,$$

$$i_{Lci}(t) = I_{Lci}(0) + \frac{U_{Lci}}{L}t = I_{Lci}(0) - \frac{U_{mн} \sin \omega t_i}{L}t.$$

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

$$I_{L_{hi}}(0) = i_2(t_i) = -\frac{\Delta I_L}{2} + I_{m_{н}} \sin \omega t_i,$$

$$I_{L_{ci}}(0) = i_1(t_i) = \frac{\Delta I_L}{2} + I_{m_{н}} \sin \omega t_i.$$

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

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

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

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

$$t_{ci} = \frac{\Delta I_L L}{| -U_{m_{н}} | \sin \omega t_i} = \frac{K_{пл} \tau}{\sin \omega t_i},$$

$$T_{ki} = t_{hi} + t_{ci} = \frac{K_{пл} \tau}{\sin \omega t_i - U^* \sin^2 \omega t_i},$$

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

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

$$t_{hi}^* = \frac{t_{hi}}{T} = \frac{K_{пл} \cdot U^*}{\delta \cdot (1 - U^* \sin \omega t_i)}, \quad (6)$$

$$t_{ci}^* = \frac{t_{ci}}{T} = \frac{K_{пл}}{\delta \cdot \sin \omega t_i}, \quad (7)$$

$$T_{ki}^* = \frac{T_{ki}}{T} = \frac{K_{пл}}{\delta \cdot (\sin \omega t_i - U^* \sin^2 \omega t_i)}, \quad (8)$$

$$f_{ki}^* = \frac{f_{ki}}{f} = \frac{\delta (\sin \omega t_i - U^* \sin^2 \omega t_i)}{K_{пл}}. \quad (9)$$

Наиболее важными для практики являются сведения о локальной частоте переключения ключа f_k^* 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 $U^* \leq 0,5$ 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 $\omega t = v$ и приравняв результат к нулю, найдем корни полученного уравнения, соответствующие искомым экстремумам:

$$v_1 = \pi/2; \quad (10)$$

$$v_2 = \arcsin(1/2U^*); \quad (11)$$

$$v_3 = \pi - \arcsin(1/2U^*). \quad (12)$$

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 $0 \leq U^* \leq 0,5$.

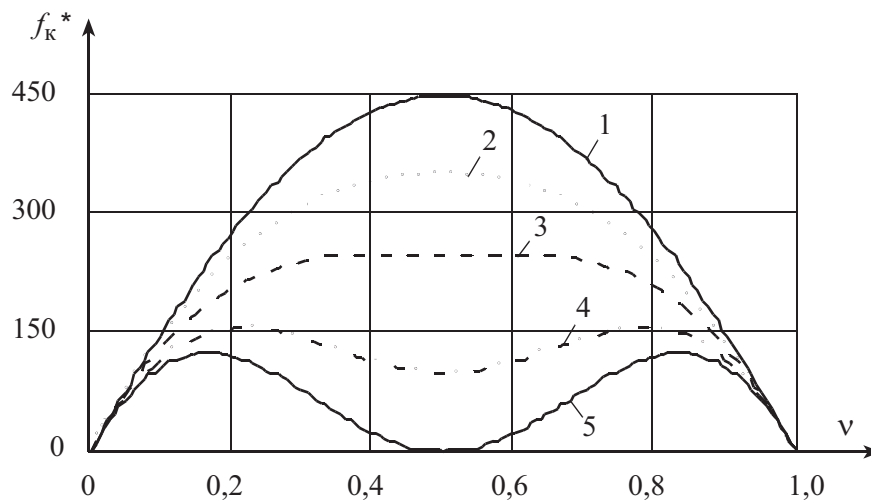


Рис. 2. Зависимости относительной локальной частоты переключения ключа от относительной текущей фазы при $K_{пл} = 0,2$, $\delta = 100$ и различных U^* : 1 – $U^* = 0,1$; 2 – $U^* = 0,3$; 3 – $U^* = 0,5$; 4 – $U^* = 0,8$; 5 – $U^* = 1,0$

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:

$$f_{k \max 1}^* = \frac{f_{k \max 1}}{f} = \frac{f_{k \max 2}}{f} = \frac{\delta}{4U^* K_{пл}}, \quad (13)$$

а выражение для локального минимума имеет вид:

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

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

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

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 $f_{k \min}^* = f_{k \max}^*$.

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.
- 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

- Гребенников В.В. Индуктивно-ключевой формирователь асимметричного квазисинусоидального тока для электрохимических технологий: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2006. – 169 с.
- 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.
- Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
- Попов В.П. Основы теории цепей. – Изд. 3-е, испр. – М.: Высшая школа, 2000. – 575 с.

Поступила 24.08.2012 г.