

*Афанасьев А.М.,  
Еремина А.В.*

*(ДонГТУ, г.Алчевск, Украина, alexandr.afanasyev@gmail.com)*

## **ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОТ КОЭФФИЦИЕНТА ПУЛЬСАЦИИ ТОКА**

*Отримані аналітичні вирази для визначення енергетичних показників силових ключів імпульсних перетворювачів для лінійно змінюючихся форм струму з використанням коефіцієнта пульсації струму накопичувальної індуктивності  $K_{RL}$ .*

***Ключові слова:** коефіцієнт пульсації струму, форма струму, енергетичні показники.*

*Получены аналитические выражения для определения энергетических показателей силовых ключей импульсных преобразователей для линейно изменяющихся форм тока с использованием коэффициента пульсации тока накопительной индуктивности  $K_{RL}$ .*

***Ключевые слова:** коэффициент пульсаций тока, форма тока, энергетические показатели.*

**Введение.** При анализе закономерностей изменения энергоэффективности импульсных преобразователей от режимов работы, важно учитывать конкретную форму тока, протекающего через силовые ключи, поскольку кривая изменения тока оказывает влияние как на средние и действующие значения токов силовых ключей, определяющих мощность потерь проводимости, так и на токи, соответствующие моментам переключения, определяющие мощность потерь переключения [1].

Так как на энергетические показатели импульсных преобразователей оказывают влияние размах пульсации тока накопительной индуктивности и его среднее значение [2-3], то их соотношение – коэффициент пульсации  $K_{RL}$  удобно использовать как для определения средних и действующих значений токов силовых ключей схемы, так и для задания режимов работы накопительной индуктивности [5].

**Постановка задачи.** Получить аналитические выражения, определяющие влияние формы тока на энергетические показатели силовых ключей импульсных преобразователей с помощью коэффициента пульсации  $K_{RL}$ .

**Изложение материала и полученные результаты.** При определении энергетических показателей принимаются допущения: мощность потерь во всех элементах схемы равна нулю, накопительная индуктивность является линейным элементом, пульсации напряжения на фильтрующих конденсаторах импульсного преобразователя считаются пренебрежимо малыми.

Работа импульсного преобразователя предполагает периодическое (за время  $T$ ) подключение накопительной индуктивности  $L$  с помощью силовых ключей к источнику ЭДС в течение времени импульса  $t_p$  и к нагрузке в оставшееся время  $(T - t_p)$  [2-4]. При этом, в течение времени  $t_p$  происходит накопление энергии в индуктивности, и с учетом принятых допущений, закон изменения тока в накопительной индуктивности можно считать линейным.

$$\Delta I_L = t_p \cdot \frac{U_L}{L}, \quad (1)$$

где  $\Delta I_L = (I_{Lmax} - I_{Lmin})$  – размах пульсации тока накопительной индуктивности,  $U_L$  – напряжение, прикладываемое к индуктивности в течение времени  $t_p$ .

Изменение тока индуктивности, протекающего через ключ будет определяться соотношением частоты коммутации, параметров нагрузки и значения накопительной индуктивности, и в зависимости от режима работы, будет иметь прямоугольную (рис. 1 а), трапециидальную (рис.1 б) или треугольную форму (рис. 1 в).

Коэффициент пульсации тока накопительной индуктивности  $K_{RL}$ , с помощью которого задается кривая изменения тока, определяется выражением

$$K_{RL} = 0.5 \cdot \Delta I_L / I_{L AV}, \quad (2)$$

где  $I_{L AV} = 0.5 \cdot (I_{Lmax} + I_{Lmin})$  – среднее значение тока накопительной индуктивности.

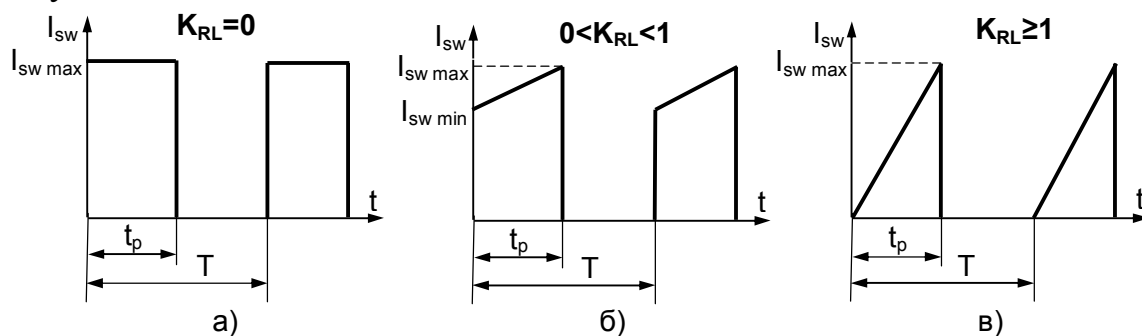


Рисунок 1 – Основные формы импульсов тока

### Определение токов, соответствующих моментам переключения.

Токи, протекающие через силовые ключи, определяются током накопительной индуктивности. При этом, моменту включения соответствует минимальное значение тока  $I_{sw\min}=I_{L\min}$ , моменту выключения – максимальное значение  $I_{sw\max}=I_{L\max}$ , которые с учетом выражения (2) определяются выражениями (3), (4) при  $0 < K_{RL} \leq 1$  и (5), (6) при  $K_{RL} > 1$ :

$$I_{sw\min} = I_{LAV} \cdot (1 - K_{RL}); \quad (3)$$

$$I_{sw\max} = I_{LAV} \cdot (1 + K_{RL}); \quad (4)$$

$$I_{sw\min} = 0; \quad (5)$$

$$I_{sw\max} = 2 \cdot I_{LAV} \cdot K_{RL}. \quad (6)$$

### Определение среднего значения тока силового ключа.

Среднее значение тока ключа  $I_{swAV}$  определяется выражением

$$I_{swAV} = T^{-1} \cdot \int_0^{t_p} [i(t)] dt = T^{-1} \cdot \int_0^{t_p} [I_{sw\min} + (I_{sw\max} - I_{sw\min}) \frac{t}{t_p}] dt. \quad (7)$$

После преобразований получим:

$$I_{swAV} = [I_{sw\min} + 0.5 \cdot (I_{sw\max} - I_{sw\min})] \cdot D. \quad (8)$$

С учетом выражений (2), (4) и равенства минимальных и максимальных значений токов ключа и накопительной индуктивности, ( $I_{sw\min}=I_{L\min}$ ,  $I_{sw\max}=I_{L\max}$ ), среднее значение тока ключа  $I_{swAV}$  для  $0 < K_{RL} \leq 1$  примет вид

$$I_{swAV} = I_{sw\max} \cdot \frac{D}{1 + K_{RL}} = I_{LAV} \cdot D, \quad (9)$$

где  $D = t_p \cdot T^{-1}$  – относительная длительность проводящего состояния ключа.

Для  $K_{RL} > 1$ , когда  $I_{sw\min}=0$  с учетом выражений (2), (6) среднее значение тока ключа  $I_{swAV}$  примет вид

$$I_{swAV} = 0.5 \cdot I_{sw\max} \cdot D = I_{LAV} \cdot D \cdot K_{RL}. \quad (10)$$

### Определение действующего значения тока силового ключа.

Действующее значение тока ключа  $I_{swRMS}$  определяется выражением

$$I_{swRMS} = \sqrt{T^{-1} \cdot \int_0^{t_p} [i(t)]^2 dt} = \sqrt{T^{-1} \cdot \int_0^{t_p} [I_{sw\min} + (I_{sw\max} - I_{sw\min}) \cdot \frac{t}{t_p}]^2 dt}. \quad (11)$$

После преобразований получим:

$$I_{swRMS} = \sqrt{\frac{D}{3} \cdot (I_{sw\max}^2 + I_{sw\max} I_{sw\min} + I_{sw\min}^2)}. \quad (12)$$

С учетом выражения (2), (4) действующее значение тока ключа  $I_{swRMS}$  для  $0 < K_{RL} \leq 1$  примет вид

$$I_{swRMS} = I_{sw\max} \sqrt{\frac{D \cdot (K_{RL}^2 + 3)}{3 \cdot (K_{RL} + 1)^2}} = I_{LAV} \sqrt{\frac{D \cdot (K_{RL}^2 + 3)}{3}}. \quad (13)$$

Для  $K_{RL} > 1$ , когда  $I_{sw\min} = 0$  с учетом выражений (2), (6) действующее значение тока ключа  $I_{swRMS}$  примет вид

$$I_{swRMS} = I_{sw\max} \cdot \sqrt{\frac{D}{3}} = I_{LAV} \cdot K_{RL} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot D}{3}}. \quad (14)$$

Определить коэффициенты пересчета значений, с учетом коэффициента  $K_{RL}$  можно из выражений (15) и (16) для  $0 < K_{RL} \leq 1$

Коэффициент амплитуды тока

$$K_A = \frac{I_{sw\max}}{I_{swRMS}} = \sqrt{\frac{3 \cdot (K_{RL} + 1)^2}{D \cdot (K_{RL}^2 + 3)}}. \quad (15)$$

Коэффициент формы тока

$$K_F = \frac{I_{swRMS}}{I_{swAV}} = \sqrt{\frac{K_{RL}^2 + 3}{3 \cdot D}}. \quad (16)$$

Аналогично получены выражения коэффициентов пересчета значений для  $K_{RL} > 1$

$$K_A = \sqrt{\frac{3}{D}}; \quad (17)$$

$$K_F = \sqrt{\frac{4}{3 \cdot D}}. \quad (18)$$

В таблицу 1 сведены аналитические выражения для определения минимальных и максимальных, средних и действующих значений тока ключа с учетом введенного коэффициента  $K_{RL}$ , а также зависимости коэффициентов пересчета (коэффициента амплитуды и коэффициента формы тока) от  $K_{RL}$ .

Таблица 1 – Зависимости минимальных, максимальных, средних и действующих значений токов силовых ключей, а также коэффициентов пересчета токов от коэффициента  $K_{RL}$

	$K_{RL}=[0..1]$	$K_{RL}=[1..\infty]$
Энергетические показатели	$I_{sw\ min} = I_{LAV} \cdot (1 - K_{RL})$	$I_{sw\ min} = 0$
	$I_{sw\ max} = I_{LAV} \cdot (1 + K_{RL})$	$I_{sw\ max} = 2 \cdot I_{LAV} \cdot K_{RL}$
	$I_{swAV} = I_{LAV} \cdot D$	$I_{swAV} = I_{LAV} \cdot D \cdot K_{RL}$
	$I_{swRMS} = I_{LAV} \sqrt{\frac{D \cdot (K_{RL}^2 + 3)}{3}}$	$I_{swRMS} = I_{LAV} \cdot K_{RL} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot D}{3}}$
	$K_A = \sqrt{\frac{3 \cdot (K_{RL} + 1)^2}{D \cdot (K_{RL}^2 + 3)}}$	$K_A = \sqrt{\frac{3}{D}}$
	$K_F = \sqrt{\frac{(K_{RL}^2 + 3)}{3 \cdot D}}$	$K_F = \sqrt{\frac{4}{3 \cdot D}}$

### Выводы.

Определены зависимости энергетических показателей силовых ключей импульсных преобразователей от коэффициента пульсации тока накопительной индуктивности  $K_{RL}$ . Полученные аналитические выражения могут быть использованы для исследования закономерностей изменения энергетических показателей силовых полупроводниковых ключей импульсных преобразователей при изменении режимов протекания тока накопительной индуктивности.

### **Библиографический список**

1. Колпаков А.И. Программа SemiSel 3.1 — новые возможности, новые перспективы [Текст]/ А.И. Колпаков // Силовая электроника. — № 3.— 2008.— С.26-30.

2. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи / В.С.Моин. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 376.

3. Севернс Р. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания/ Р. Севернс, Г. Блум. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 294с: ил.

4. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника/ В.И. Мелешин. — Москва: Техносфера, 2005. — 632 с.

5. Афанасьев А.М. Метод анализа режимов импульсных преобразователей напряжения с применением коэффициента пульсаций тока в накопительной индуктивности [Текст] / А.М. Афанасьев, А.А. Щерба, А.Н. Баранов // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. Част. 4. — 2012. — С.62-67.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. Заблудским Н.Н.*