

# Влияние импульсных преобразователей с дозирующим последовательным резонансным контуром на технологическую связь в линиях электропередачи

ПЕТРОСЬЯНЦ В.В.

*Предложены математические модели для определения помех в линиях электропередачи от систем заряда накопительных конденсаторов, построенных на базе преобразователей с дозирующим последовательным резонансным контуром. Показана возможность улучшения электромагнитной совместимости в линиях электропередачи между системами технологической связи и системами питания импульсных электротехнологических установок.*

**Ключевые слова:** линии электропередачи, импульсные преобразователи, резонансный контур, накопительный конденсатор, заряд, электромагнитная совместимость, математические модели

В статье [1] показано, что параметры и режимы работы зарядных преобразователей с дозирующим последовательным резонансным контуром (ДПРК) влияют на качество потребляемой электроэнергии – коэффициент мощности и фазовый сдвиг первой гармоники потребляемого из сети тока. В системах питания импульсных электротехнологических установок мощностью десятки-сотни киловатт, как правило, необходимо обеспечить не только максимально возможные значения КПД, минимальные значения реактивных токов, но и минимальное электромагнитное воздействие на аппаратуру и каналы технологической связи линий электропередачи.

Преобразователи электроэнергии мощных импульсных источников питания инверторного типа являются для линии электропередачи генераторами периодических широкополосных сигналов, спектр которых содержит большой набор пиков на частотах, кратных частоте основного сигнала и частоте инвертирования. Такие преобразователи в большинстве случаев являются источниками помех в диапазоне частот 0–150 кГц [2].

Обобщенная схема зарядных преобразователей с ДПРК инверторного типа [3], питающихся непосредственно от промышленной сети переменного напряжения, приведена на рис. 1. Диаграммы токов и напряжений в исследуемой схеме (рис. 1) при различных режимах работы приведены на рис. 2.

Оценим влияние зарядных преобразователей с ДПРК на гармонический состав тока, потребляемого из питающей сети. Действующее значение тока для гармоники с номером  $n$

*Mathematical models are proposed for determining interference generated in power lines from storage capacitor charging systems constructed on the basis of converters with a dosing series resonance circuit. The possibility of improving electromagnetic compatibility in power lines between process communication systems and systems supplying power to impulse electrical processing installations is shown.*

**Key words:** transmission lines, pulse converters, resonance circuit, storage capacitor, charge, electromagnetic compatibility, mathematical models

$$I_n^* = \sqrt{(A_n^{*2} + B_n^{*2})} / 2, \quad (1)$$

где  $A_n^*$ ,  $B_n^*$  – коэффициенты ряда Фурье;  $I_n^* = I_n r / E_m$ ;  $A_n^* = A_n r / E_m$ ;  $B_n^* = B_n r / E_m$ ;  $r = \sqrt{L_k / C_k}$ .

Рассмотрим гармонический состав токов в генераторном режиме (рис. 2,а).

Коэффициенты ряда Фурье определяются как

$$A_n^* = \frac{\omega}{\epsilon} \frac{2w^*}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} \Big|_{t=0}^N \int_0^{\rho} i_k^*[u, n+1] \cos(y_F[n]) du; \quad (2)$$

$$B_n^* = \frac{\omega}{\epsilon} \frac{2w^*}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} \Big|_{t=0}^N \int_0^{\rho} i_k^*[u, n+1] \sin(y_F[n]) du, \quad (3)$$

где ток в контуре преобразования

$$i_k^*[u, n+1] = K_Q \frac{\partial}{\partial t} \left[ (-1)^n \frac{\partial}{\partial t} \left( w^* \frac{\partial}{\partial t} (K_Q^2 - w^{*2}) \cos(y[n]) + \frac{K_Q w^*}{Q} \sin(y[n]) \cos(w^* u) + \frac{\partial}{\partial t} (w^{*2} - K_Q^2) \sin(y[n]) + \frac{K_Q w^*}{Q} \cos(y[n]) \sin(w^* u) - \frac{\partial}{\partial t} \frac{w^* K_Q (K_Q^2 + w^{*2})}{2Q} \cos(y[n]) + \dots \right) \right]$$

$$\begin{aligned}
 & \exp\left\{-\frac{K_Q w^2}{4Q^2} \frac{\ddot{u}}{\dot{u}}\right\} K_Q^4 \sin(y[n]) \exp\left\{-\frac{K_Q w^2}{2Q} \frac{\dot{u}}{u}\right\} / \\
 & \sqrt{(w^2 - K_Q^2)^2 + \frac{K_Q^2 w^2}{Q^2}} (U_{Ck0}[n] - (-1)^{n+1} U_{CH0}[n]) \cdot \\
 & \exp\left\{-\frac{K_Q w^2}{2Q} \frac{\dot{u}}{u}\right\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь

$$\begin{aligned}
 U_{Ck0}[n+1] &= K_Q^2 (-1)^n \exp\left\{K_Q^2 - w^2\right\} \sin(y[n]) - \frac{K_Q w^*}{Q} \cdot \\
 & \cos(y[n]) \cos(w^* p) + \exp\left\{-\frac{K_Q p}{2Q} \frac{\ddot{u}}{\dot{u}}\right\} \exp\left\{K_Q^2 - w^2\right\} \cdot \\
 & \cos(y[n]) + \frac{K_Q w^*}{Q} \sin(y[n]) \sin(w^* p) \frac{\dot{u}}{u} / \\
 & \sqrt{(w^2 - K_Q^2)^2 + \frac{K_Q^2 w^2}{Q^2}} (U_{Ck0}[n] - (-1)^{n+1} U_{CH0}[n]) \cdot \\
 & \exp\left\{-\frac{K_Q p}{2Q} \frac{\ddot{u}}{\dot{u}}\right\} \exp\left\{K_Q^2 - w^2\right\} / 4Q^2 \frac{\ddot{u}}{\dot{u}} + U_{Ck0}[n]; \\
 U_{CH0}[n+1] &= |U_{Ck0}[n+1] - U_{Ck0}[n]| / K_{HK} - (-1)^{n+1} U_{CH0}[n]; \\
 y[0] &= \arcsin(U_{CH0}[0]); \quad y[n] = y[0] + p w^* w_{и}^* n; \\
 K_Q &= 2Q / \sqrt{4Q^2 - 1}; \quad Q = r / R - \text{добротность зарядно-} \\
 & \text{го контура}; \quad R - \text{суммарное сопротивление, эквива-} \\
 & \text{лентное всем активным потерям в контуре преоб-} \\
 & \text{разования энергии}; \quad u = w_0^* t - \text{текущий фазовый} \\
 & \text{угол}; \quad w_0 = 1 / \sqrt{L_K C_K}; \quad d = R / 2L_K; \quad w_0^* = \sqrt{w_0^2 - d^2} - \\
 & \text{резонансная частота ДПРК (частота преобразова-} \\
 & \text{ния)}; \quad w^* = w / w_0^* - \text{приведенная частота преоб-} \\
 & \text{разования}; \quad w_{и}^* = w_0^* / w_{и} - \text{приведенная частота инвер-} \\
 & \text{тирования}; \quad K_{HK} = K_{TB}^2 C_H / C_K - \text{коэффициент на-} \\
 & \text{грузки}; \quad K_{TB} - \text{коэффициент трансформации высо-} \\
 & \text{ковольтного трансформатора } T_B; \\
 U_{Ck0}[n] &= U_{Ck0}[n] / E_m - \text{начальное напряжение на} \\
 C_K \text{ в интервале } n; \quad U_{CH0}[0] &= U_{Ck0}[0] / E_m - \text{начальное} \\
 & \text{напряжение на } C_H; \quad y_F[n] = y[n] + w^* u - \text{текущий фа-} \\
 & \text{зовый угол } n\text{-го импульса}; \quad N - \text{число импульсов за} \\
 & \text{цикл преобразования энергии.}
 \end{aligned}$$

Как правило, преобразователи с ДПРК работа- ют в диапазоне собственных резонансных частот

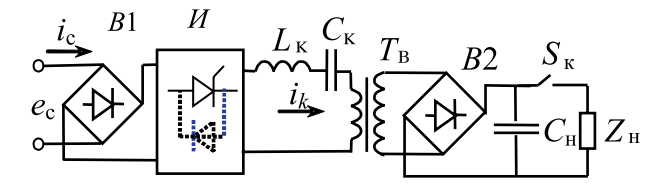


Рис. 1. Обобщенная схема зарядных преобразователей с ДПРК инверторного типа: B1 – сетевой выпрямитель; B2 – высоковольтный выпрямитель; И – инвертор; Тв – высоковольтный трансформатор; Cк – коммутирующий конденсатор; Lк – коммутирующий дроссель; Ск – накопительный конденсатор; Zн – сопротивление нагрузки; eс = Em sin(wt) – напряжение питающей сети

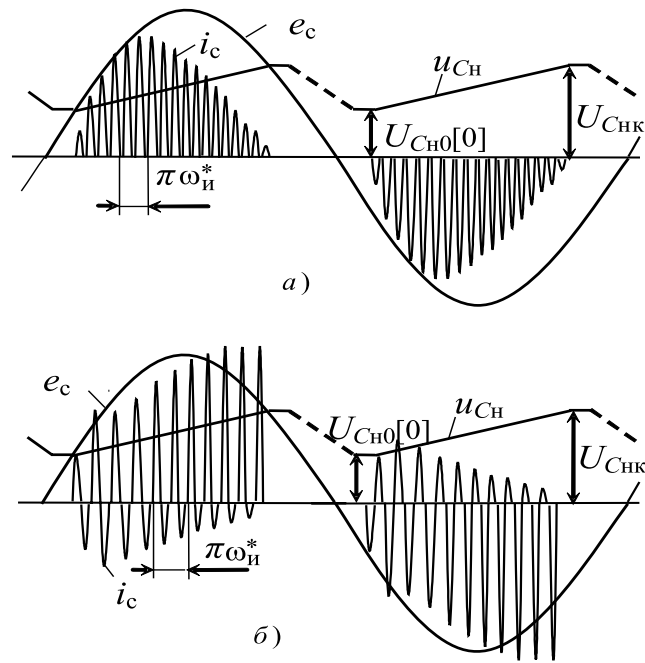


Рис. 2. Диаграммы напряжения eс и тока iс питающей сети, напряжения uсн на накопительном конденсаторе: а – в генераторном режиме (без обратных диодов); б – в режиме с рекуперацией энергии (с обратными диодами)

0,5–20 кГц, что при частоте питающей сети 50 Гц соответствует диапазону приведенной частоты преобразования 0,0025 £ w\* £ 0,1. При заданных режимах работы (Uсн0\*[0], wи\*) и параметрах преобразователя (Q, KHK) относительные значения гармонических составляющих тока в питающей сети Iп\* определяются выбором приведенной частоты преобразования w\*.

На рис. 3 приведены графики зависимости относительных значений гармонических составляющих тока Iп\* от номера гармоники n, рассчитанные по формулам (1)–(4) для режима полного использования накопительного конденсатора (Uсн0\*[0]=0) и граничной (максимальной) частоте инвертирова-

ния ( $w_{и}^* = 1$ ) при  $Q = 10$ ,  $K_{нк} = 500$  и значениях частоты преобразования  $w^*$ , равных 0,1, 0,05, 0,025.

Частота преобразования  $w_0^*(w^*)$  практически не влияет на гармонический состав в области нижних частот ( $n = 1, \dots, 20$ ). В этом диапазоне присутствуют гармоники, кратные основной частоте (частоте питающей сети). Гармоники высшего порядка (с номерами  $n > 20$ ) формируются за счет токов резонансной частоты преобразователя. Эти гармоники соответствуют частотам с номерами  $n = 2k / w^*$ , где  $k = 1, 2, 3, \dots$  – номер группы высших гармоник. С уменьшением  $w^*$  гармоники высшего порядка перемещаются в область более высоких частот, а расстояние между гармониками, в котором практически отсутствуют гармонические составляющие потребляемого тока, увеличивается.

Например, как следует из графика на рис. 3, для двухпроводных телефонных цепей, работающих в диапазоне тональных частот 300–3400 Гц (соответствует диапазону гармоник 6 £ n £ 68), влияние высших гармоник, кратных резонансной частоте  $w_0^*$ , практически отсутствует для приведенных частот преобразования  $w^* £ 0,025$ .

Для повышения коммутационной устойчивости приведенную частоту инвертирования выбирают из условия  $w_{и}^* > 1$ . Увеличение значения  $w_{и}^*$  (уменьшение частоты инвертирования  $w_{и}$ ) приводит к смещению спектра частот тока  $I_n^*(n)$  в сторону уменьшения прямо пропорционально частоте  $w_{и}^*$ .

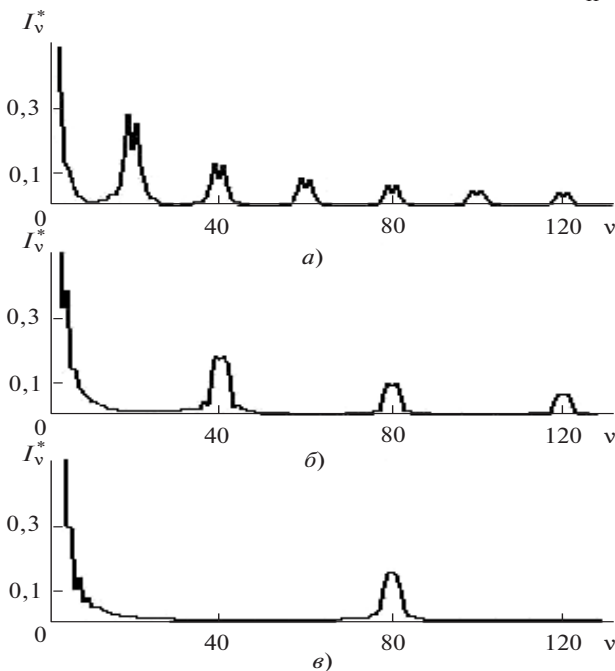


Рис. 3. Гармонический состав потребляемого тока в генераторном режиме: а –  $w^* = 0,1$ ; б –  $w^* = 0,05$ ; в –  $w^* = 0,025$

Далее рассмотрим режим с рекуперацией энергии (рис. 2,б). В этом случае мгновенные значения тока  $i_k^*(u, n+1)$  в формулах (2)–(3) определяются по формуле (4) при учете в ней следующих изменений: коэффициенты  $(-1)^n$  заменяются на  $\sqrt{2} \sin(\rho n / 2 + \rho / 4)$ , а коэффициенты  $(-1)^{n+1}$  умножаются на  $\sqrt{2} \sin(\rho n / 2 + \rho / 4)$ ; фазовый угол  $y[n]$  определяется как

$$y[n] = y[0] + |\sin(\rho(n+1)/2)|(\rho w^* + \rho w^* w_{и}^* n / 2) + |\cos(\rho(n+1)/2)|\rho w^* w_{и}^* (n+1) / 2. \quad (5)$$

На рис. 4 приведены графики зависимости  $I_n^*(n)$  для тех же параметров и режимов работы, что и для генераторного, но при условии  $w_{и}^* = 2$ , характерном для граничного режима работы с рекуперацией энергии. В этом режиме по сравнению с генераторным наблюдается снижение уровня гармоник в области нижних частот.

Гармоники высшего порядка соответствуют частотам  $n = k / w^*$ , где  $k = 1, 3, 5, \dots$  – номер группы гармоник. Отсутствие четных групп гармоник приводит к увеличению вдвое диапазона частот, свободного от помех. С ростом  $w^*$  высшие гармоники сдвигаются в область более высоких частот и расстояние между группами увеличивается.

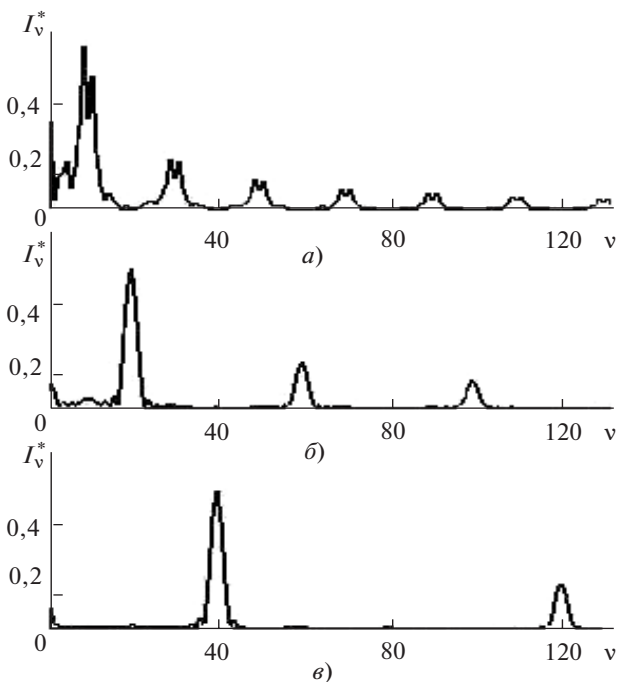


Рис. 4. Гармонический состав потребляемого тока в режиме с рекуперацией энергии: а –  $w^* = 0,1$ ; б –  $w^* = 0,05$ ; в –  $w^* = 0,025$

В заключение отметим, что в заданном диапазоне технической связи необходимо выбирать резонансную частоту преобразователя  $w_0^*(w^*)$  таким образом, чтобы независимо от режима работы ( $w_{и}^* = 1$  – генерация или  $w_{и}^* = 2$  – рекуперация) полоса спектра передаваемого сигнала оказалась между соседними группами высших гармоник потребляемого тока:

$$w^* < 2Dw_c^*, (6)$$

где  $Dw_c^* = w/Dw_c$ ;  $Dw_c$  – ширина полосы спектра сигнала связи.

**Выводы.** 1. Предложенные математические модели, основанные на точных описаниях процессов в зарядных преобразователях с ДПРК инверторного типа, позволяют в полной мере исследовать влияние параметров и режимов работы этих преобразователей на гармонический состав потребляемого из сети тока.

2. При правильном выборе собственной резонансной частоты ДПРК (приведенной частоты преобразования  $w^*$ ) можно добиться существенного снижения помех на линиях электропередачи в заданном диапазоне технической связи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петросьянц В.В.** Исследование влияния режимов работы импульсных преобразователей с дозирующим последовательным резонансным контуром на качество электроэнергии. – Электричество, 2010, № 10.

2. **Володина Н.А., Карякин Р.Н., Куликова Л.В. и др.** Основы электромагнитной совместимости. – Барнаул: ОАО «Алтайский полиграфический комбинат», 2007.

3. **Петросьянц В.В.** Теория и методики расчета полупроводниковых преобразователей с дозирующим последовательным резонансным контуром: Монография. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008.

[09.11.10]

*А в т о р: Петросьянц Виктор Владимирович окончил в 1976 г. факультет радиоэлектроники и приборостроения Дальневосточного политехнического института. В 1984 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию «Разработка, анализ и экспериментальное исследование преобразователей с дозирующим последовательным резонансным контуром и рекуперацией энергии». Директор института радиоэлектроники, информатики и электротехники Дальневосточного государственного технического университета.*