

## О МЕТОДИКЕ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ LC-ФИЛЬТРОВ

**И.В. Волков**, чл.-корр. НАН Украины, **А.И. Чиженко**, докт. техн. наук, **В.П. Кабан**, канд. техн. наук, **В.Ю. Матвеев**, канд. техн. наук

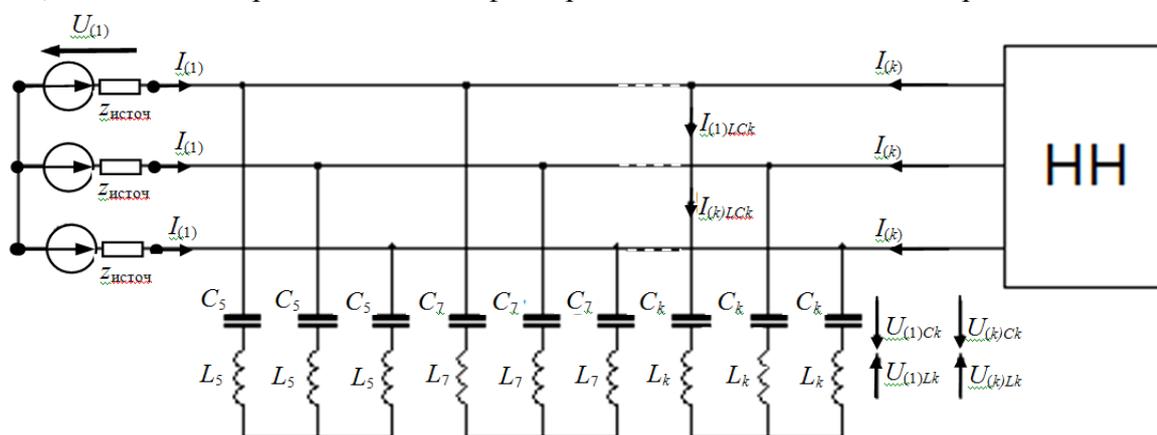
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

*Рассмотрены подходы для определения энергетических показателей последовательных резонансных LC-фильтров высших гармоник, основанные на минимизации установленных мощностей: 1) индуктивных реакторов; 2) конденсаторов. Аналитическими методами получены формулы для оценки установленных мощностей силового оборудования фильтров – индуктивных реакторов и конденсаторных батарей, а также для оценки реактивной мощности, генерируемой LC-фильтрами на первой гармонике. Формулы отличаются простотой, пригодны для инженерных расчетов и наглядно иллюстрируют зависимость энергетических показателей от основных параметров ( $L_k$  и  $C_k$ ) фильтров и от максимальной величины действующих значений токов высших гармоник. Библи. 5, рисунок.*

**Ключевые слова:** последовательные LC-фильтры, высшие гармоники тока, установленная мощность оборудования, реактивная мощность.

При выборе оборудования последовательных резонансных LC-фильтров [1, 3] высших гармоник (ФВГ), обеспечивающих фильтрацию токов высших гармоник (ВГ), генерируемых в сеть нелинейными нагрузками (НН), с целью улучшения электромагнитной совместимости НН с питающей сетью, необходима предварительная оценка ожидаемых энергетических показателей ФВГ: установленных мощностей входящих в ФВГ конденсаторных батарей и индуктивных реакторов, а также реактивных мощностей, выдаваемых этими фильтрами в сеть на первой гармонике тока. Такая оценка важна для последующего более детального расчета оборудования ФВГ при их конструкторской разработке, для определения их массогабаритных показателей и стоимости. При этом возникает потребность в приближенных формулах для расчета энергетических показателей, пригодных для инженерных расчетов, отличающихся простотой использования и непосредственно отражающих связи энергетических показателей с электрическими параметрами фильтров, гармоническим спектром токов ВГ, порождаемых НН.

Чтобы проиллюстрировать вывод подобных формул, рассмотрим упрощенную модель электрической системы для питания трехфазной симметричной НН, схема которой представлена на рисунке, где питающая трехфазная сеть синусоидального напряжения моделируется трехфазной системой синусоидальных ЭДС с внутренними сопротивлениями  $z_{источ}$ ;  $U = U_{(1)}$  – действующее значение синусоидального фазного напряжения сети – напряжение синусоидально, так как все гармоники тока отфильтрованы последовательными резонансными  $L_k C_k$ -



фильтрами (где  $k = 5, 7, 11, 13, \dots, k$  – номер гармоники – в симметричной трехфазной системе третья и кратные трем гармоники тока отсутствуют), т.е. они не создают падений напряжения на внутреннем сопротивлении  $z_{источ}$ ; НН может содержать выполненные по симметричным схемам симметрично управляемые вентильные преобразователи, поэтому спектр и действующие значения  $I_{(k)}$  высших гармоник тока, генерируемых НН, в процессе регулирования могут изменяться.

Ввиду симметрии по фазам цепи, показанной на рисунке, достаточно определить формулы для энергетических показателей ФВГ только в одной ее фазе. Эти формулы будут полностью применимы и к другим фазам системы рисунка.

При определении установленной мощности оборудования резонансных  $L_k C_k$ -фильтров высших гармоник будем полагать, что через фильтр  $k$ -й гармоники ( $k$ -й фильтр) протекают только ток этой гармоники (с действующим значением  $I_{(k)LCk}$ ) и ток первой гармоники, обусловленный напряжением сети  $U = U_{(1)}$ , к которому эти фильтры непосредственно подключены (см. рисунок). Считаем, что токи иных высших гармоник целиком замыкаются через другие аналогичные, параллельные  $k$ -му, фильтры, настроенные на эти гармоники. Таким образом, установленные мощности  $S_{Ck}$  и  $S_{Lk}$ , соответственно конденсаторов  $C_k$  и индуктивных реакторов  $L_k$   $k$ -го резонансного фильтра определяются по формулам

$$\begin{aligned} S_{Lk} &= U_{Lk} I_{Lk} = \sqrt{(U_{(1)Lk}^2 + U_{(k)Lk}^2)(I_{(1)LCk}^2 + I_{(k)\max LCk}^2)}; \\ S_{Ck} &= U_{Ck} I_{Ck} = \sqrt{(U_{(1)Ck}^2 + U_{(k)Ck}^2)(I_{(1)LCk}^2 + I_{(k)\max LCk}^2)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U_{Lk}$  и  $U_{Ck}$  – действующие значения напряжений соответственно на реакторе  $L_k$  и конденсаторе  $C_k$ ;  $I_{Lk}$  и  $I_{Ck}$  – действующие значения тока соответственно через реактор  $L_k$  и конденсатор  $C_k$ ;  $U_{(1)Lk}$  и  $U_{(1)Ck}$  – составляющие сетевого напряжения  $U = U_{(1)}$  соответственно на реакторе  $L_k$  и конденсаторе  $C_k$ ;  $I_{(1)LCk}$  – ток первой гармоники через последовательный резонансный фильтр  $L_k C_k$ ;  $U_{(k)Lk}$  и  $U_{(k)Ck}$  – напряжения  $k$ -й гармоники на индуктивности  $L_k$  и емкости  $C_k$  фильтра  $L_k C_k$ ;  $I_{(k)LCk}$  – ток  $k$ -й гармоники через  $L_k C_k$ -фильтр;  $I_{(k)\max LCk}$  – максимальное в процессе изменения (в силу различных факторов, например, в процесс регулирования тока НН содержащимися в ней управляемыми вентильными преобразователями) значение тока  $I_{(k)LCk}$ .

Между величинами, входящими в подкоренные выражения формул (1), справедливы следующие простые соотношения:

$$\begin{aligned} I_{(1)LCk} &= \frac{U_{(1)}}{\left| \omega L_k - \frac{1}{\omega C_k} \right|} = \frac{U_{(1)}}{\frac{1}{\omega C_k} - \omega L_k} = \frac{U_{(1)}}{x_{(1)\text{эКВ}Ck}} = U_{(1)} \omega C_{(1)\text{эКВ}}; \\ U_{(1)Lk} &= \omega L_k I_{(1)LCk}; \quad U_{(1)Ck} = \frac{1}{\omega C_k} I_{(1)LCk}; \\ U_{(k)Lk} &= k \omega L_k I_{(k)\max LCk}; \quad U_{(k)Ck} = \frac{1}{k \omega C_k} I_{(k)\max LCk}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x_{(1)\text{эКВ}Ck} = 1/\omega C_{(1)\text{эКВ}LCk}$  – эквивалентное реактивное сопротивление фильтра  $L_k C_k$  первой гармонике тока, которое при  $k > 1$  носит емкостный характер;  $C_{(1)\text{эКВ}LCk}$  – эквивалентная по первой гармонике емкость фильтра  $L_k C_k$ .

Поскольку элементы  $k$ -го фильтра настроены в резонанс на  $k$ -й гармонике, то  $k^2 \omega^2 L_k C_k = 1$ . Используя это соотношение из формул (2), получаем

$$\begin{aligned}
x_{(1)ЭКВСк} &= \frac{1}{\omega C_k} - \omega L_k = \frac{1}{\omega C_k} - \frac{1}{k^2 \omega C_k} = \frac{1}{\omega C_k} \frac{k^2 - 1}{k^2} = k^2 \omega L_k - \omega L_k = \omega L_k (k^2 - 1); \\
I_{(1)LCk} &= \frac{U_{(1)}}{\frac{1}{\omega C_k} - \omega L_k} = U_{(1)} \omega C_k \frac{k^2}{k^2 - 1} = \frac{U_{(1)}}{\omega L_k} \frac{1}{k^2 - 1}; \\
U_{(1)Ck} &= \frac{1}{\omega C_k} I_{(1)LCk} = U_{(1)} \frac{k^2}{k^2 - 1}; \quad U_{(1)Lk} = \omega L_k I_{(1)LCk} = U_{(1)} \frac{1}{k^2 - 1}; \\
U_{(1)Ck}^2 + U_{(k)Ck}^2 &= U_{(1)}^2 \frac{k^4}{(k^2 - 1)^2} + \frac{1}{k^2 \omega^2 C_k^2} I_{(k)\max LCk}^2; \\
U_{(1)Lk}^2 + U_{(k)Lk}^2 &= U_{(1)}^2 \frac{1}{(k^2 - 1)^2} + k^2 \omega^2 L_k^2 I_{(k)\max LCk}^2; \\
I_{(1)LCk}^2 + I_{(k)\max LCk}^2 &= U_{(1)}^2 \omega^2 C_k^2 \frac{k^4}{(k^2 - 1)^2} + I_{(k)\max LCk}^2 = \frac{U_{(1)}^2}{\omega^2 L_k^2} \frac{1}{(k^2 - 1)^2} + I_{(k)\max LCk}^2.
\end{aligned} \tag{3}$$

Несмотря на то, что в резонансных фильтрах значения  $L_k$  и  $C_k$  жестко связаны между собой, наборы их различных взаимосвязанных значений теоретически бесконечны. На практике для их определения исходят из неких целевых критериев, например: 1) из минимума установленной мощности реакторов (наиболее дорогостоящего и в изготовлении технологически трудоемкого узла); 2) из минимума установленной мощности конденсаторов (ассортимент которых существенно сужается с увеличением допустимого напряжения, прикладываемого к их обкладкам); 3) из минимума стоимости фильтра.

Рассмотрим эти критерии в отдельности.

1. В ФВГ минимизируется величина суммарной по трем фазам установленной мощности индуктивных реакторов  $S_L = 3 \sum_k S_{Lk}$ .

Рассматривая во второй формуле (1) установленную мощность  $S_{Lk}$  индуктивного реактора фильтра, как функцию индуктивности  $L_k$ , учитывая последние два соотношения (3), видим, что непрерывная функция  $S_{Lk}(L_k)$  является произведением двух сомножителей, один из которых – напряжение – возрастает с увеличением величины  $L_k$ , а другой – ток, наоборот, убывает с увеличением  $L_k$ . Очевидно, что при определенном значении  $L_k$  у этой функции будет наблюдаться экстремум. Нетрудно убедиться, что этот экстремум – минимум функции. Следовательно, можно выбрать такое значение  $L_k = L_{k\text{ЭКСТ}}$ , при котором установленная мощность индуктивного реактора  $S_{Lk}$  будет минимальной.

Для определения значения  $L_{k\text{ЭКСТ}}$  приравняем производную  $dS_{Lk}/dL_k$  нулю. Получаем уравнение относительно  $L_k$ :

$$\frac{(I_{(1)LCk}^2 + I_{(k)\max LCk}^2) \frac{d}{dL_k} (U_{(1)Lk}^2 + U_{(k)Lk}^2) + (U_{(1)Lk}^2 + U_{(k)Lk}^2) \frac{d}{dL_k} (I_{(1)LCk}^2 + I_{(k)\max LCk}^2)}{2\sqrt{(U_{(1)Lk}^2 + U_{(k)Lk}^2)(I_{(1)LCk}^2 + I_{(k)\max LCk}^2)}} = 0. \tag{4}$$

Используя два последних соотношения (3), находим производные:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dL_k} (U_{(1)Lk}^2 + U_{(k)Lk}^2) &= 2k^2 \omega^2 L_k I_{(k)\max LCk}^2; \\
\frac{d}{dL_k} (I_{(1)LCk}^2 + I_{(k)\max LCk}^2) &= -2 \frac{U_{(1)}^2}{\omega^2 L_k^3} \frac{1}{(k^2 - 1)^2}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Так как знаменатель выражения в правой части уравнения (4) величина положительная, то нулю, очевидно, равен числитель этого выражения. Подставляя в правой части уравнения (4)

значения производных из соотношений (5), а значения сумм квадратов токов и напряжений из последних двух соотношений (3), приходим к уравнению

$$2k^2\omega^2L_kI_{(k)\max LCk}^2\left(\frac{U_{(1)}^2}{\omega^2L_k^2(k^2-1)^2}+I_{(k)\max LCk}^2\right)=\frac{2U_{(1)}^2}{\omega^2L_k^3(k^2-1)^2}\left(U_{(1)}^2\frac{1}{(k^2-1)^2}+k^2\omega^2L_kI_{(k)\max LCk}^2\right). \quad (6)$$

Раскрывая в правой и левой частях уравнения (6) скобки, приводя подобные и решая получившееся уравнение относительно  $L_k$ , для искомого значения  $L_{k\text{экст}}$  находим

$$L_{k\text{экст}}=\frac{U_{(1)}}{I_{(k)\max LCk}}\frac{1}{\omega(k^2-1)\sqrt{k}}. \quad (7)$$

Принимая во внимание, что в резонансном последовательном фильтре  $k$ -й гармоники индуктивность и емкость фильтра жестко связаны зависимостью  $k^2\omega^2L_kC_k=1$ , для отвечающего значению индуктивности  $L_{k\text{экст}}$  значения емкости  $C_{k\text{экст}}$  находим

$$C_{k\text{экст}}=\frac{I_{(k)\max LCk}}{U_{(1)}}\frac{(k^2-1)\sqrt{k}}{k^2\omega}. \quad (8)$$

Используя выражения (7) и (8) для эквивалентного сопротивления первой гармоники  $k$ -го фильтра, находим

$$x_{(1)\text{экв}Ck}=\frac{1}{\omega C_k}-\omega L=\frac{U_{(1)}}{I_{(k)\max LCk}}\frac{1}{\sqrt{k}}. \quad (9)$$

Таким образом, реактивная (емкостная) мощность  $Q_{(1)LCk}$ , выдаваемая фильтром  $k$ -й гармоники в сеть, составляет

$$Q_{(1)LCk}=\frac{U_{(1)}^2}{x_{(1)\text{экв}Ck}}=U_{(1)}I_{(k)\max LCk}\sqrt{k}. \quad (10)$$

Подставляя выражение для  $x_{(1)\text{экв}Ck}$  из (9) в выражение после второго знака равенства в первом соотношении (2), приходим к следующим условиям минимума мощности  $S_{Lk}$ :

$$I_{(1)LCk}=\frac{U_{(1)}}{x_{(1)\text{экв}Ck}}=I_{(k)\max LCk}\sqrt{k}; \quad Q_{(1)Lk}=Q_{(k)Lk}, \quad (11)$$

где с учетом первого условия (11)  $Q_{(1)Lk}=\omega L_k I_{(1)LCk}^2=k\omega L_k I_{(k)\max LCk}^2$ ;  $Q_{(k)Lk}=x_{(k)Lk}I_{(k)\max LCk}^2=k\omega L_k I_{(k)\max LCk}^2$ . Таким образом, для того чтобы в последовательном резонансном фильтре  $k$ -й гармоники тока установленная мощность индуктивного реактора фильтра была минимальной, необходимо и достаточно, чтобы ток первой гармоники через этот фильтр превышал ток  $k$ -й гармоники в  $\sqrt{k}$  раз.

При минимизации мощностей  $S_{Lk}$  совокупности всех реакторов фильтров, используя соотношения (1), (2), (9)..(11), приходим к следующим выражениям:

$$\begin{aligned} S_C &= 3\sum_k S_{Ck} = 3\omega\sum_k k(k+1)\sqrt{k(k-1)+1}L_{k\text{экст}}I_{(k)\max LCk}^2; \\ S_L &= 3\sum_k S_{Lk} = 3\omega\sum_k (k+1)\sqrt{k}L_{k\text{экст}}I_{(k)\max LCk}^2; \\ Q_{(1)LC} &= 3\sum_k Q_{(1)LCk} = 3U_{(1)}\sum_k I_{(k)\max LCk}\sqrt{k}, \end{aligned} \quad (12)$$

где число значений  $k$  ограничивается практической целесообразностью.

2. В ФВГ минимизируется величина суммарной по трем фазам установленной мощности конденсаторов  $S_C = 3 \sum_k S_{Ck}$ .

Повторяя при выводе формул логическую цепочку, аналогичную приведенной для случая минимизации мощности  $S_L$ , вычисляем производную  $dS_{Ck}/dC_k$  и приравняем ее числитель нулю. Осуществляя тождественные преобразования с использованием соотношений (2), приходим к уравнению для определения значения емкости  $C_{k\text{ЭКСТ}}$  конденсатора фильтра, при котором значение мощности  $S_{Ck}$  минимально:

$$\begin{aligned} 2 \frac{I_{(k)\text{max}LCk}^2}{k^2 \omega^2 C_k^3} \left( U_{(1)}^2 \omega^2 C_k^2 \frac{k^4}{(k^2 - 1)^2} + I_{(k)\text{max}LCk}^2 \right) = \\ = 2 \omega^2 U_{(1)}^2 C_k \frac{k^4}{(k^2 - 1)^2} \left( U_{(1)}^2 \frac{k^4}{(k^2 - 1)^2} + \frac{I_{(k)\text{max}LCk}^2}{k^2 \omega^2 C_k^2} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Решая это уравнение относительно  $C_k$  для искомого значения  $C_{k\text{ЭКСТ}}$ , находим

$$C_{k\text{ЭКСТ}} = \frac{I_{(k)\text{max}LCk}}{U_{(1)}} \frac{(k^2 - 1)}{\omega k^2 \sqrt{k}}. \quad (14)$$

Для отвечающего этому значению параметра  $L_{k\text{ЭКСТ}}$  можем записать

$$L_{k\text{ЭКСТ}} = \frac{U_{(1)}}{I_{(k)\text{max}LCk}} \frac{\sqrt{k}}{\omega(k^2 - 1)}. \quad (15)$$

Используя формулы (14) и (15), для параметров фильтра получаем

$$\begin{aligned} x_{(1)\text{ЭКВ}Ck} &= \frac{1}{\omega C_k} - \omega L = \frac{U_{(1)} \sqrt{k}}{I_{(k)\text{max}LCk}}; \\ Q_{(1)LCk} &= \frac{U_{(1)}^2}{x_{(1)\text{ЭКВ}Ck}} = U_{(1)} I_{(k)\text{max}LCk} \frac{1}{\sqrt{k}}; \\ I_{(1)LCk} &= \frac{U_{(1)}}{x_{(1)\text{ЭКВ}Ck}} = I_{(k)\text{max}LCk} \frac{1}{\sqrt{k}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Последнее соотношение (16) позволяет записать условия минимума мощности  $S_{Ck}$  в следующем виде:

$$I_{(1)LCk} = \frac{1}{\sqrt{k}} I_{(k)\text{max}LCk}; \quad Q_{(1)Ck} = Q_{(k)Ck}, \quad (17)$$

где с учетом первого условия (17)  $Q_{(1)Ck} = x_{Ck} I_{(1)LCk}^2 = I_{(1)LCk}^2 / \omega C_k = I_{(k)\text{max}LCk}^2 / k \omega C_k$ ;  
 $Q_{(k)Ck} = x_{(k)Ck} I_{(k)\text{max}LCk}^2 = L_k I_{(k)\text{max}LCk}^2 / k \omega C_k$ .

Таким образом, для того чтобы в последовательном резонансном фильтре  $k$ -й гармоники тока установленная мощность конденсатора была минимальной, необходимо и достаточно, чтобы ток первой гармоники через этот фильтр был в  $\sqrt{k}$  раз меньше тока  $k$ -й гармоники.

Из соотношений (1), (2) и (16) приходим к формулам, которые альтернативны формулам (12):

$$\begin{aligned}
S_C &= 3 \sum_k S_{Ck} = 3 \sum_k \frac{I_{(k)\max LCk}^2 (k+1)}{\omega C_{k\text{ЭКСТ}} k \sqrt{k}}; \\
S_L &= 3 \sum_k S_{Lk} = 3 \sum_k \frac{I_{(k)\max LCk}^2 (k+1)}{\omega C_{k\text{ЭКСТ}} k^3} \sqrt{k(k-1)+1}; \\
Q_{(1)LC} &= 3 \sum_k Q_{(1)LCk} = 3 U_{(1)} \sum_k \frac{I_{(k)\max LCk}}{\sqrt{k}}.
\end{aligned} \tag{18}$$

3. Из экономических критериев отметим подход, основанный на нахождении минимума функции  $S_L \Pi_L + S_C \Pi_C$ , где  $\Pi_L$  и  $\Pi_C$  – стоимости 1 квар соответственно индуктивного и емкостного элементов фильтра применительно к типу используемого в них оборудования и на текущий момент развития технологий его изготовления. Аналитическое решение этой задачи связано с чрезвычайно громоздкими выкладками, требует самостоятельного рассмотрения и поэтому выходит за рамки этой статьи.

Определим теперь как соотносятся между собой величины  $S_{Lk}$  и  $S_{Ck}$  из формул (12) с соответствующими величинами из формул (18). Подставляя в правых частях соотношений (12) вместо  $L_k$  и  $C_k$  их выражения из равенств (7) и (8), получаем

$$\begin{aligned}
S_{Ck} &= \frac{\sqrt{k[k(k-1)+1]}}{k-1} U_{(1)} I_{(k)\max LCk}; \\
S_{Lk\min} &= \frac{1}{k-1} U_{(1)} I_{(k)\max LCk}.
\end{aligned} \tag{19}$$

Аналогично, подставляя в правых частях формул (18)  $L_k$  и  $C_k$  из их выражения (14) и (15), находим

$$\begin{aligned}
S_{Ck\min} &= \frac{k}{k-1} U_{(1)} I_{(k)\max LCk}; \\
S_{Lk} &= \frac{\sqrt{k(k-1)+1}}{\sqrt{k}(k-1)} U_{(1)} I_{(k)\max LCk}.
\end{aligned} \tag{20}$$

Применительно к принятым в формулах (19) и (20) обозначениям имеют место следующие соотношения между установленными мощностями реакторов и конденсаторов для двух рассмотренных выше случаев ( $S_{Lk} = S_{Lk\min}$  и  $S_{Ck} = S_{Ck\min}$ ):

$$1 < \frac{S_{Ck}}{S_{Ck\min}} = \frac{S_{Lk}}{S_{Lk\min}} = \sqrt{\frac{k(k-1)+1}{k}} < \sqrt{k}, \tag{21}$$

где  $k \geq 5$ .

Из соотношения (21) видно, что установленные мощности конденсаторов и реакторов для фильтра  $LC_k$  ( $k$ -го фильтра) для двух рассмотренных случаев ( $S_{Lk} = S_{Lk\min}$  и  $S_{Ck} = S_{Ck\min}$ ) отличаются менее чем в  $\sqrt{k}$  раз. При этом, как следует из последних формул (12) и (18), реактивная мощность  $Q_{(1)LCk}$ , генерируемая этим фильтром для случая  $S_{Ck} = S_{Ck\min}$ , уменьшается в  $k$  раз.

Очевидно, что на практике установленные мощности  $S_{Lk}$  и  $S_{Ck}$  выше, чем определяемые в формулах (12) и (18), потому как число ( $k$ )  $L_k C_k$ -фильтров ограничивается обычно четырьмя ( $k = 5, 7, 11, 13$ ) и токи гармоник выше  $k = 13$  помимо сети также замыкаются и через указанные четыре фильтра (с  $k \leq 13$ ), превышая тем самым установленные мощности их оборудования.

В случае несимметрии в системе на рисунке нагрузки или сети, т.е. когда величины  $U_{(1)}$  и  $I_{(k)\max LCk}$  в разных фазах отличаются, при наличии нулевого провода все приведенные выше (для одной фазы) формулы остаются справедливыми.

Авторы использовали эти формулы для сопоставления установленных мощностей оборудования новых тиристорных компенсаторов реактивной мощности (ТКРМ) с традици-

онными (по схеме Худякова–Чванова [4, 5]). Сопоставление проводилось с целью обоснования предпочтительности (по установленной мощности оборудования) первых. В рассматриваемых ТКРМ подавление высших гармоник достигается специально разработанным способом регулирования [2], а в СТК  $L_k C_k$ –фильтры являются неотъемлемой частью оборудования тиристорного компенсатора. Для СТК в исполнении для трехфазной сети, где теоретически отсутствуют четные и кратные трем гармоники в формулах (12) и (18), чаще всего ограничиваются всего четырьмя значениями параметра  $k$ , а именно  $k = 5, 7, 11, 13$ .

**Выводы.** Полученные формулы позволяют приближенно (на стадии, предвещающей конструкторскую разработку фильтров) оценить энергетические показатели последовательных резонансных  $LC$ -фильтров высших гармоник при условии минимизации установленных мощностей: 1) индуктивных реакторов, 2) конденсаторов. Эти формулы пригодны для инженерных расчетов и наглядно иллюстрируют зависимость энергетических показателей от основных параметров ( $L_k$  и  $C_k$ ) фильтров и от максимальной величины действующих значений токов высших гармоник.

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: Учеб. пособие. – 7-е изд. Стереотипное. – СПб.: Изд-во «Лань», 2009. – 592 с.
2. Волков И.В., Чиженко А.И. Способ плавного регулирования реактивной мощности с коррекцией качества входного тока ТКРМ // Электронное моделирование. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 77–84.
3. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. – Ч.II. Теория цепей переменного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 444 с.
4. Худяков В.А., Чванов В.А. Управляемый статический источник реактивной мощности // Электричество. – 1969. – № 1. – С. 29–35.
5. А.с. 231662 СССР, МКИ Н 02 J 3/18. Вентильный компенсатор реактивной мощности / В.В. Худяков, В.А. Чванов; Опубл. 10.09.69, Бюл. № 28.

УДК 620.9

**І.В. Волков**, чл.-кор. НАН України, **О.І. Чиженко**, докт. техн. наук, **В.П. Кабан**, канд. техн. наук, **В.Ю. Матвеев**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

#### **Про методику оцінки енергетичних показників послідовних $LC$ -фільтрів**

*Розглянуто підходи для визначення енергетичних показників послідовних резонансних  $LC$ -фільтрів вищих гармонік, засновані на мінімізації встановлених потужностей: 1) індуктивних реакторів; 2) конденсаторів. Аналітичними методами отримано формули для оцінки встановлених потужностей силового обладнання фільтрів – індуктивних реакторів і конденсаторних батарей, а також для оцінки реактивної потужності, генерованої  $LC$ -фільтрами на першій гармоніці. Формули відрізняються простотою, придатні для інженерних розрахунків і наочно ілюструють залежність енергетичних показників від основних параметрів ( $L_k$  і  $C_k$ ) фільтрів і максимальної величини діючих значень струмів вищих гармонік. Бібл. 5, рисунок.*

**Ключові слова:** послідовні  $LC$ -фільтри, вищі гармоніки струму, встановлена потужність обладнання, реактивна потужність.

**I.V. Volkov, O.I. Chyzenko, V.P. Kaban, V.Yu. Matveyev**

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,  
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **About energy data evaluation procedure of $LC$ -filters**

*Approaches to determine the energy performance of series resonant  $LC$  – harmonic filter based on the minimization of installed capacity of inductive reactors and capacitors are described. Formulas for estimating the installed capacities of power equipment of filters - inductive reactors and capacitor banks, as well as evaluating the fundamental frequency reactive power generated by  $LC$  filters are analytically derived. The formulas are easy, suitable for engineering calculations and clearly illustrate the dependence of the energy performance on the basic parameters ( $L_k$  and  $C_k$ ) and the RMS harmonic currents maximum value. References 5, figure.*

**Key words:** series  $LC$ -filters, high current harmonics, installed power of equipment, reactive power.

Надійшла 26.06.2013

Received 26.06.2013