

**В. Н. ГУБАРЕВИЧ**, канд.техн.наук, с.н.с. ИЭД НАН Украины;  
**Ю. В. МАРУНЯ**, инж. I кат. ИЭД НАН Украины

### ОДНОФАЗНЫЙ ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ЛМС-ФИЛЬТР НА ВХОДЕ ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ

Введение. Известно, что нагрузки, имеющие на входе выпрямитель с параллельно подключенной батареей электролитических конденсаторов, потребляют из сети питания ток импульсной формы. При этом в сеть генерируются высшие гармоники тока, а коэффициент гармоник тока (THDi) может достигать 100% и более. Самым простым способом снижения THDi является установка на входе выпрямителя линейного дросселя, индуктивность которого выбирается так, чтобы падение напряжения на нем было порядка 3% от номинального при максимальной мощности нагрузки. Более эффективно улучшить качество потребляемой из сети электроэнергии можно за счет установки специальных силовых широкополосных ЛМС-фильтров [1]. На рис. 1 приведена схема

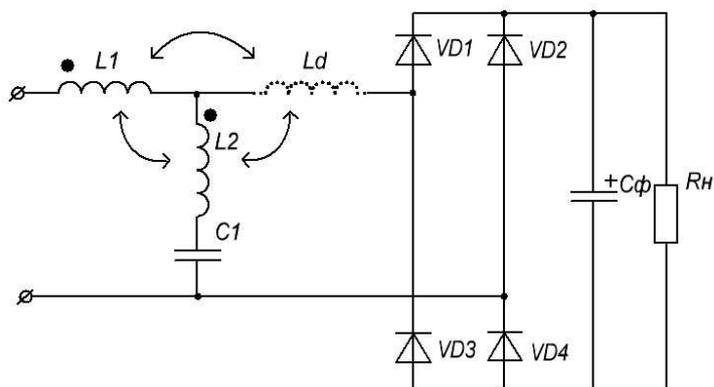


Рис. 1 – Однофазный широкополосный ЛМС-фильтр

ЛМС-фильтра, где  $L1$ ,  $L2$  – индуктивности обмоток дросселя,  $Ld$  – дополнительная обмотка дросселя, которые выполнены на одном сердечнике,  $C1$  – емкость ЛМС-фильтра,  $VD1$ - $VD4$  – диоды выпрямителя,  $C\phi$  – емкость выходного фильтра,  $Rn$  – сопротивление нагрузки. ЛМС-фильтр не только существенно улучшает спектральный состав потребляемого из сети тока, а следовательно и THDi, но и улучшает коэффициент мощности, уменьшает пульсации напряжения нагрузки, улучшает жесткость нагрузочной характеристики, позволяет увеличивать напряжение на нагрузке без применения согласующих трансформаторов [2,3]. Ряд других свойств выявлены при дополнительных исследованиях, описанных ниже.

#### Материалы и результаты исследований.

В таблице 1 приведены параметры, характеризующие три варианта использования однофазных выпрямителей при напряжении питающей сети 220В для активной нагрузки мощностью 10 кВт и напряжением нагрузки  $300В \pm 10\%$ , определенные с помощью математических и физических моделей. Математические модели были реализованы с помощью средств пакетов программ **Micro-Cap v 10.04** и **Omega 15**, что позволяет говорить о достаточной достоверности расчетных результатов.

Таблица 1 – Расчетные и экспериментальные параметры вариантов использования однофазных выпрямителей

Вариант		$U_n$ , В	$I_n$ , А	THDi, %	$I_3$ , %	$I_5$ , %	$I_7$ , %	$I_9$ , %	$\Delta U_n$ , %	PF	$\cos \varphi$
1	экспер.	280	36,7	91,6	71,5	41,2	25,4	12,1	10,7	0,744	0,99
	модель	275	36,24	108,3	84,7	58,7	31,0	9,3	10,2	0,751	0,99
2	экспер.	250	32,0	50,9	49,7	9,0	5,8	1,7	8,0	0,786	0,88
	модель	248,7	32,77	52,4	50,7	9,8	7,2	3,1	7,2	0,791	0,90
3	экспер.	300	39	14,9	14,6	0,9	-	-	6,0	0,956	0,97
	модель	295,7	38,4	12,2	11,24	2,6	2,5	3,0	5,0	0,941	0,97

Под вариантом №1 подразумевается непосредственное включение выпрямителя с емкостной нагрузкой в сеть, вариант №2 представляет собой такое же включение, но с установкой на входе выпрямителя линейного «3%-го» дросселя, имеющего индуктивность 2,24 мГн, а вариант №3 – включение с применением ЛМС-фильтра с двумя обмотками ( $L1=5,3$  мГн;  $L2=1,23$  мГн) вместо «3%-го» дросселя на входе выпрямителя с емкостной нагрузкой. Остальные параметры схемы, изображенной на рис.1, являются такими: емкость выходного фильтра  $C\phi=10000$ мкФ, емкость ЛМС-фильтра  $C1=170$  мкФ.

Также в таблице приведены:  $U_n$  – напряжение нагрузки;  $I_n$  – ток нагрузки; THDi – коэффициент гармоник тока (Total Harmonic Distortion);  $I_3$ -  $I_9$  – гармоники входного тока в процентном соотношении относительно первой гармоники входного тока;  $\Delta U_n$  – размах пульсаций напряжения «peak-to-peak» на нагрузке; PF – коэффициент мощности (Power Factor) как отношение активной мощности к полной, потребляемой схемой из сети;  $\cos \varphi$  – сдвиг фаз между напряжением сети и первой гармоникой тока.

© В.Н. Губаревич, Ю.В. Маруня, 2015

Приведенные в таблице результаты наглядно демонстрируют существенные улучшения показателей качества потребляемой электроэнергии при применении LMC-фильтров по сравнению с дросселем на входе выпрямителя. Некоторое несоответствие данных, полученных экспериментальным путем и с помощью математических моделей, можно объяснить колебаниями действующего значения входного напряжения (до 4,6%) и наличием коэффициента гармоник по питающему напряжению свыше 4% во время постановки экспериментов.

Подобные результаты имеют место и при сравнении с вариантом установки фильтрующего дросселя в цепи постоянного тока выпрямителя.

Следует также отметить, что существует возможность путем выбора параметров элементов LMC-фильтра изменять характер зависимости THDi в функции от мощности нагрузки (рис. 2). Можно получать приемлемые значения THDi в широком диапазоне изменения нагрузки (кривая 1), либо только для максимального её значения (кривая 2), причем это значение будет существенно меньше THDi, получаемого при минимизации его для широкого диапазона.

Рассматриваемые LMC-фильтры с успехом могут применяться в качестве пассивной составляющей гибридных фильтров, содержащих активные корректоры формы тока (АКФТ), которые в последнее время находят все более широкое применение.

Суть работы АКФТ заключается в том, что на его выходе формируется ток, который является разницей между синусоидальной составляющей первой гармоники тока нагрузки и его мгновенным значением (рис. 3). Суммирование тока корректора ( $I_k$ ) с током нагрузки ( $I_n$ ) обеспечивает потребление из сети питания ток ( $I_{nc}$ ) синусоидальной формы, по фазе совпадающей с напряжением сети ( $U_c$ ).

Применение для улучшения электромагнитной совместимости выпрямителя и сети только АКФТ требует рассчитывать его элементы на большую установленную мощность, поскольку необходимо корректировать ток на величину отклонения амплитуды импульсного тока выпрямителя от амплитуды первой гармоники тока ( $\Delta I$ ).

В гибридных же фильтрах пассивный фильтр частично сглаживает импульсный ток выпрямителя, а уже с помощью АКФТ получаем желаемый THDi.

Но при применении LMC-фильтра на входе выпрямителя, на кривой потребляемого тока возникают коммутационные всплески (рис. 4) в моменты, когда выпрямитель начинает потреблять ток из сети, и параметры этого всплеска существенно влияют на параметры корректора тока.

Так, от амплитуды всплеска, который характеризует значение максимального отклонения от формы первой гармоники входного тока потребления из сети питания, зависит установленная мощность элементов корректора, а от крутизны нарастания и спада всплеска зависит THDi, а также частота работы инвертора корректора. Исследуем один из вариантов воздействия на параметры коммутационного всплеска, который заключается в том, что между продольной обмоткой LMC-фильтра и входом выпрямителя включается еще одна обмотка  $L_d$  (рис. 1 пунктиром).

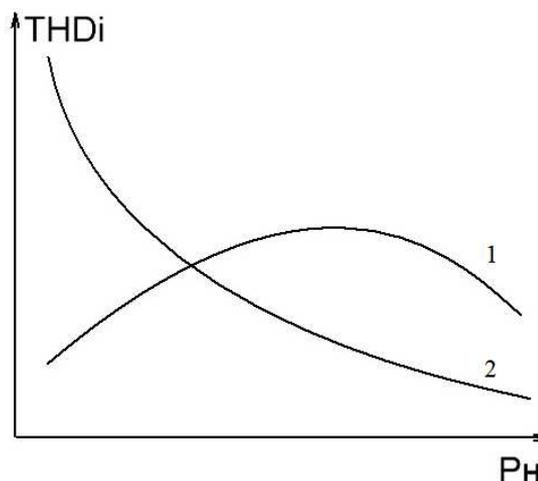


Рис.2 Характер зависимости THDi в функции от мощности нагрузки

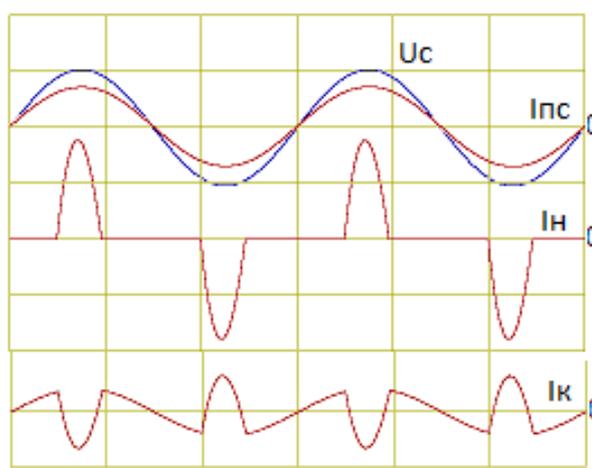


Рис.3 Эпюры к принципу работы АКФТ.



Рис.4 Напряжение сети ( $U_c$ ) и входной ток ( $I_{nc}$ ) LMC-фильтра

Включение ее согласно или встречно имеет различное влияние на форму входного тока и характеристики LMC-фильтра.

В случае применения LMC-фильтра в составе гибридного изменяются требования к его проектированию.

Это легко объяснить следующим образом: на рис.5 приведены эпюры потребляемого из сети тока ( $I_{пс}$ ), тока первой гармоники ( $I_1$ ) и тока корректора ( $I_к$ ). Из приведенных эпюр видно, что ток  $I_к$  существенно меньше тока  $I_{пс}$  так, как он определяется не значением тока потребителя, а только его отклонением от синусоидального значения тока первой гармоники. Теперь, помимо улучшения THDi, необходимо еще и обеспечить во входном токе сети минимум максимального отклонения от синусоидальной формы его первой гармоники. С этой целью в LMC-фильтр и введена дополнительная обмотка  $L_d$ . Величина индуктивности  $L_d=0,8$  мГн и была выбрана из соображений минимального влияния на нагрузочную характеристику LMC-фильтра и максимального снижения амплитуды коммутационного всплеска.

Были проведены исследования на математических моделях с целью определения основных параметров качества потребляемой электроэнергии для 3 вариантов исполнения LMC-фильтров.

Для моделирования использовались значения параметров без изменений их величин, которые приведены после таблицы 1 для схемы, изображенной на рис.1. Результаты исследования приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные параметры вариантов использования LMC-фильтров

Вариант исполнения	$U_n, В$	$I_n, А$	$\Delta I, А$	THDi, %	$I_3, \%$	$I_5, \%$	$I_7, \%$	$I_9, \%$	$\Delta U_n, \%$	$\cos \varphi$
1	295,7	38,4	14,86	12,2	11,24	2,6	2,5	3,0	5	0,97
2	282,6	36,8	18,45	26,2	18,3	13,8	10,5	1,8	4,95	0,89
3	290,6	37,9	9,63	14,04	13,75	2,7	1,9	1,2	4,8	0,99

Под вариантом №1 следует понимать вариант исполнения двухобмоточного (с  $L_1, L_2$ ) LMC-фильтра, в варианте №2 используется LMC-фильтр с введением дополнительной обмотки  $L_d$ , включенной встречно по отношению к обмотке  $L_1$ .

Вариант №3 иллюстрирует параметры LMC-фильтра с введением дополнительной обмотки  $L_d$ , включенной согласно по отношению к  $L_1$ .

Анализ результатов моделирования показал, что введение дополнительной обмотки существенно влияет на работу LMC-фильтра.

Из таблицы 2 видно, что согласное включение дополнительной обмотки имеет ряд преимуществ: уменьшается  $\Delta I$ , практически не влияя на параметры нагрузки и существенно не ухудшая THDi. В то же время указанные параметры при встречном включении дополнительной обмотки LMC-фильтр значительно ухудшаются. Степень влияния вариантов исполнения LMC-фильтра на его нагрузочную характеристику приведена на рис. 6, из которого видно, что номинальные мощности (10 кВт) для всех трех вариантов практически одинаковы.

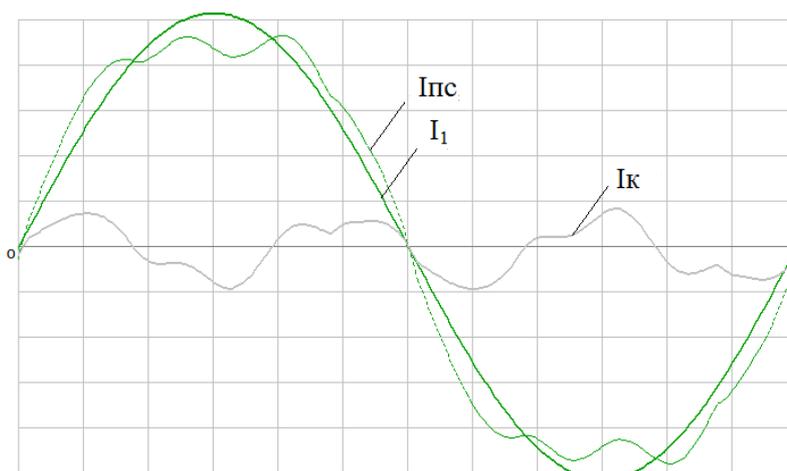


Рис.5 Эпюра токов  $I_{пс}$ ,  $I_1$ ,  $I_к$  для гибридного фильтра.

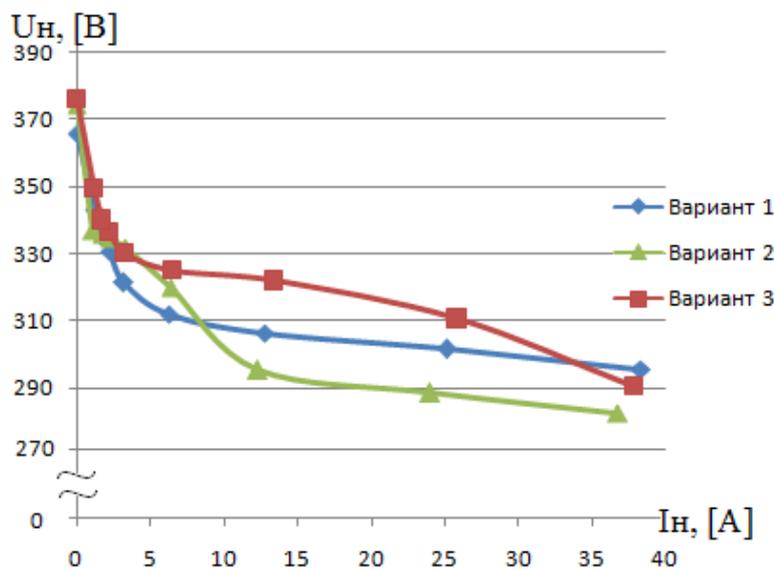


Рис.6 Нагрузочные характеристики 3 вариантов исполнения LMC-фильтров.

На рис. 7 приведены напряжение сети и входной ток (I<sub>пс</sub>) LMC-фильтра с согласным включением дополнительной обмотки, как лучшего варианта по параметру ΔI. При сравнении рис.4 с рис. 7 видно отсутствие коммутационного всплеска большой амплитуды и с крутым фронтом. Это позволяет снизить частоту работы АКФТ, а, значит, повысить коэффициент полезного действия, и уменьшить установленные мощности его элементов.

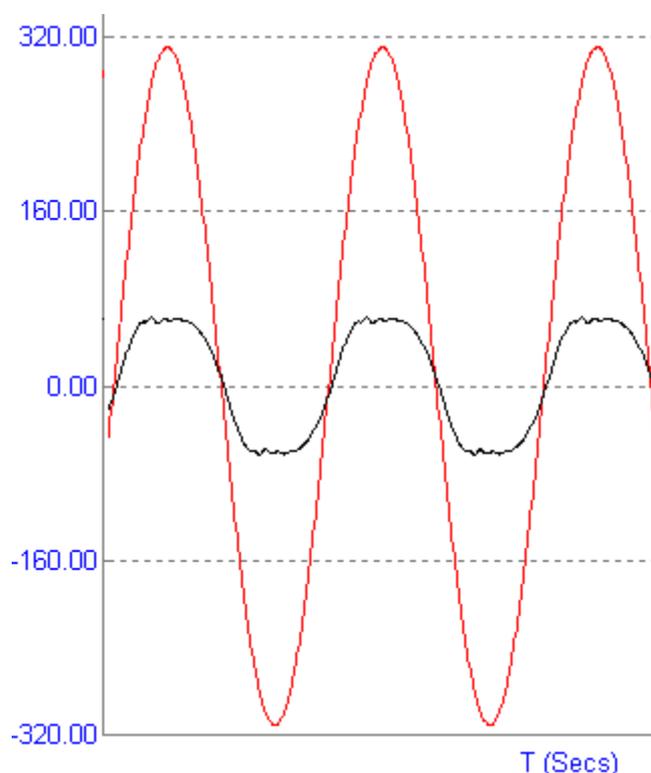


Рис.7 Напряжение сети (Uc) и входной ток (I<sub>пс</sub>) LMC-фильтра с дополнительной обмоткой, подключенной согласно

#### Выводы.

1. Применение LMC-фильтров в однофазных выпрямителях с емкостным фильтром на выходе кардинально улучшают показатели качества потребляемой из сети электроэнергии.
2. Введение во входной LMC-фильтр дополнительной согласно включенной обмотки позволяет избавиться от коммутационного всплеска в токе потребления выпрямительной установки.
3. Вариант исполнения LMC-фильтра с дополнительной обмоткой, включенной согласно, позволяет рекомендовать использовать его в качестве пассивного узла в составе гибридного фильтра.

**Список литературы:** 1. Волков И.В. Новая концепция построения силовых цепей частотно-регулируемых электроприводов / Волков И.В. // – Техн.электродинамика. – 1999г. – 4. – 21-26с. 2. Волков И.В. Сравнительный анализ способов фильтрации токов, потребляемых выпрямительными установками / Волков И.В., Акинин К.П., Исаков Г.В. // Техн.электродинамика. – 1999г. – 6. –23-27с. 3. Губаревич В.М. Вхідний широкополій LMC-фільтр для однофазної випрямної установки / Губаревич В.М., Спірін В.М., Салко С.В., Гребенюк В.Г. // Техн.электродинамика. – 2005г. – 3. –42-43с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Volkov I.V. Novaya kontseptsiya postroeniya silovyih tsepey chastotno-reguliruemyih elektroprivodov// Tehn.elektrodinamika. – 1999g. – 4. – S.21-26. 2. Volkov I.V., Akinin K.P., Isakov G.V. Sravnitelnyiy analiz sposobov filtratsii tokov, potrebyaemyih vyipryamitelnyimi ustanovkami // Tehn.elektrodinamika. – 1999g. – 6. – S.23-27. 3. Gubarevich V.M., SpIrIn V.M., Salko S.V. Grebenyuk V.G. VhIdniy shirokopoliy LMC-filtr dlya odnofaznoYi vipryamnoYi ustanovki// Tehn.elektrodinamika. – 2005g. – 3. – S.42-43.

Поступила (received) 25.08.2015