

ПОДАВЛЕНИЕ ГАРМОНИК ТОКА ПИТАНИЯ МОЩНЫХ ОДНОФАЗНЫХ НАГРУЗОК

И.В. Волков*, член-корр. НАН Украины, В.П. Стяжкин**, канд.техн.наук, П.П. Подейко***
 Институт электродинамики НАН Украины,
 пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: tems@ukr.net

Описан гибридный фильтр гармоник сетевого тока источника питания электротермической установки по производству базальтового супертонкого волокна (БСТВ) в режиме разогрева фильерной пластины. Фильтр использует комбинированную схему пассивного широкополосного LMC-фильтра, каскадно включенного с транзисторным активным фильтром. Проведено математическое моделирование такого фильтра и экспериментальная проверка эффективности подавления им гармоник сетевого тока. Проведено сравнение экспериментальных спектрограмм и эюр тока с аналогичными результатами моделирования, подтверждена адекватность моделей и возможность их использования при разработке однофазных гибридных фильтров гармоник тока. Библ. 8, рис. 9, табл. 3.

Ключевые слова: коэффициент гармоник тока, THDi, LMC-фильтр, активный фильтр параллельного типа, гибридный фильтр, тиристорный регулятор, трансформатор, компенсация искажений.

Проблема соблюдения норм показателей качества электроэнергии является сейчас одной из наиболее приоритетных при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий. Наибольшие проблемы внесло повсеместное распространение электроприводов переменного тока с частотным управлением, генерирующих в трехфазную сеть гармоники тока, приводящее к искажениям синусоидальности питающего напряжения, отрицательно влияющее на сеть в целом и на другое оборудование, подключенное к этой сети. Подавлению (фильтрации) таких гармоник посвящено огромное количество работ, а технические средства такой фильтрации, выпускаемые десятками зарубежных фирм, широко используются на практике. Между тем в промышленности продолжают использоваться мощные однофазные нагрузки, регулирование мощности (тока) которых средствами силовой полупроводниковой техники приводит к генерированию гармоник тока, еще более отрицательно влияющих на сеть вследствие появляющейся несимметрии токов и напряжений.

Целью настоящей работы является обоснование возможности повышения эффективности подавления гармоник тока питания нелинейных однофазных нагрузок с помощью комбинации пассивных (использующих лишь реактивные элементы L, M, C) и активных (транзисторных) фильтров. Такая комбинация получила в зарубежной литературе название **Hybrid filter** [1].

Типичным примером однофазной нагрузки с несинусоидальным входным током является система резистивного нагрева жаропрочной фильерной пластины при производстве базальтового супертонкого волокна [2]. Такая пластина (т.н. «питатель») формирует непрерывные первичные волокна из базальтового расплава. Ее активное сопротивление существенно зависит от температуры, и выход на номинальный температурный режим (разогрев до температуры 1300–1390 °С) необходимо производить плавным изменением тока источника питания, чтобы исключить деформацию и

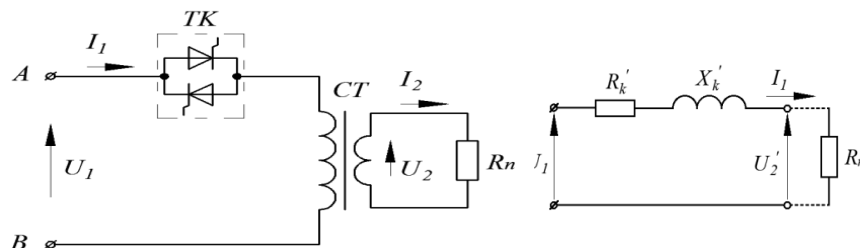


Рис. 1

Рис. 2

выход питателя из строя. Силовая часть такого источника в простейшем случае состоит из специального трансформатора (СТ) с круто падающей внешней (вольт-амперной) характеристикой и парой встречно включенных тиристорных ключей (ТК), углом управления которых регулируется ток вторичной обмотки и нагрузки – нелинейного активного сопротивления R_n (рис. 1, а). Исследуем эту систему на предмет искажения синусоидальной формы тока, потребляемого из двух фаз трехфазной промышленной сети, и возможности их уменьшения. В качестве трансформатора рас-

© Волков И.В., Стяжкин В.П., Подейко П.П., 2019

ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0002-0696-0382> ,**<https://orcid.org/0000-0003-0602-1112>,***<https://orcid.org/0000-0001-9201-102X>

смотрим сварочный трансформатор для контактных сварочных машин **ТВК-75 УХЛ4**, основные паспортные данные которого для номинального режима работы приведены в табл. 1.

Простейшая схема замещения такого трансформатора (без учета малого тока намагничивания) и нагрузки показана на рис. 2 [3]. Здесь R'_k и X'_k – приведенные к первичной обмотке активное и реактивное (индуктивное) сопротивления короткого замыкания, R'_H – приведенное

активное сопротивление нагрузки, причем $R'_0 + R'_H = R_0 K_{TP}^2 + R_H$ и $X'_k = X'_0 = X_0 K_{TP}^2$, где R_0 и X_0 – паспортные значения активного и индуктивного сопротивлений обмоток, а эквивалентное сопротивление потерь $R_H = P_H / I_1^2$, где P_H – паспортное значение потерь короткого замыкания.

Для дальнейшего исследования необходимо определить еще ряд величин. Полное сопротивление цепи (рис. 1, б) $Z = U_1 / I_1$. С другой стороны, $Z^2 = (R'_k + R'_H)^2 + (X'_k)^2$. Из последних двух выражений определяется приведенное сопротивление нагрузки R'_H . Потребляемая из сети активная мощность $P_1 = I_1^2 (R'_H + R'_0) + P_H$, а реактивная – $Q_1 = (S_1^2 - P_1^2)^{1/2}$. Угол между векторами питающего напряжения и тока: $\varphi = \arccos(P_1 / S_1)$

Вычисления по приведенным выше формулам с использованием паспортных данных трансформатора **ТВК-75 УХЛ4** дают следующие значения параметров, необходимых для дальнейших исследований: $R'_H = 2.09$ Ом, $R'_0 = 0.185$ Ом, $R'_H = 0.183$ Ом, $X'_k = 0.192$ Ом (соответствующая ему индуктивность $L'_k = 0.611$ мГн), $P_1 = 53.8$ кВт, $Q_1 = 4.2$ кВАр, $\varphi = 5$ град.

В номинальном режиме, когда тиристоры работают как диоды (угол управления $\alpha = 0$), первичный ток синусоидален и практически совпадает по фазе с напряжением сети. Но при регулировании тока вниз от номинального (путем увеличения угла α) резко изменяется форма кривой потребляемого из сети тока и появляются его гармоники широкого спектра частот, существенно ухудшающие качество электроэнергии сети. Для исследования этого явления авторы моделировали установившиеся процессы в схеме рис. 1, используя приведенные выше данные с помощью специализированной программы OMEGA 2010, разработанной в ИЭД НАН Украины.

Моделирование показало, что снижение тока от наибольшего значения в 2 раза, до 74 А (г.м.с.) обеспечивается при угле управления тиристорами $\alpha = 114^\circ$, причем ток носит импульсный характер. Амплитуда этого импульса $I_{MAX} = 180$ А в 1.7 раза больше амплитуды синусоидального тока с таким же г.м.с., что вызывает увеличение падения напряжения в питающей линии электропередачи и снижение напряжения на клеммах других потребителей. Коэффициент гармоник тока $THDi = 89.7\%$ недопустимо высок, превышая европейские нормы [4] почти в 18 раз. Ситуация усугубляется тем, что эти гармоники еще больше увеличивают несимметрию токов и напряжений, вызываемую подключением мощной однофазной нагрузки к трехфазной сети. Ясно, что без фильтрации гармоник тока практическое применение подобных регуляторов тока невозможно. Рассмотрим три возможные альтернативы решения этой задачи: использование пассивных широкополосных фильтров, активных фильтров и гибридных фильтров.

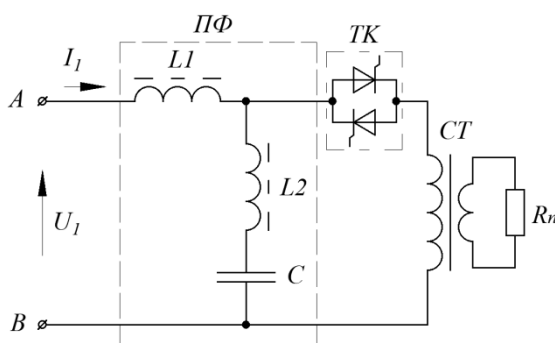


Рис. 3

Пассивный фильтр. Среди пассивных широкополосных ЛМС-фильтров наилучшими характеристиками обладают фильтры по патентам [5,6], серийно выпускаемые в настоящее время (в трехфазном варианте) фирмами MIRUS (Канада), ABB (Швейцария), DANFOSS (Франция), ELHAND (Польша), АРНАДИ (Россия) и др. В однофазном варианте такой фильтр, включенный на входе неуправляемого мостового выпрямителя со сглаживающим конденсатором способен подавить гармоники до уровня $THDi = 12-15\%$. Но спектральный состав тока управляемых тиристорных регуля-

торов много хуже. На рис. 3 показано включение такого фильтра на входе рассматриваемого регулятора тока, а на рис. 4, а, б – полученные в результате моделирования эпюры тока, напряжения и спектральный состав входного тока этого регулятора. Наилучший результат, который удастся получить с таким фильтром, составляет лишь $THDi=39.9\%$ при $L_1=4$ мН, $L_2=20$ мН, $C=200$ мкФ. Дело в том, что увеличение этих параметров, прежде всего L_1 , приводящее к улучшению $THDi$, вступает в противоречие с возможностью получения номинального тока (при $\alpha=0$) из-за большого падения напряжения на индуктивности L_1 при любых сочетаниях параметров фильтра, как показали результаты моделирования. Так что эффективное применение пассивных фильтров в регуляторах такого типа при диапазоне регулирования тока $d \geq (1:2)$ принципиально невозможно.

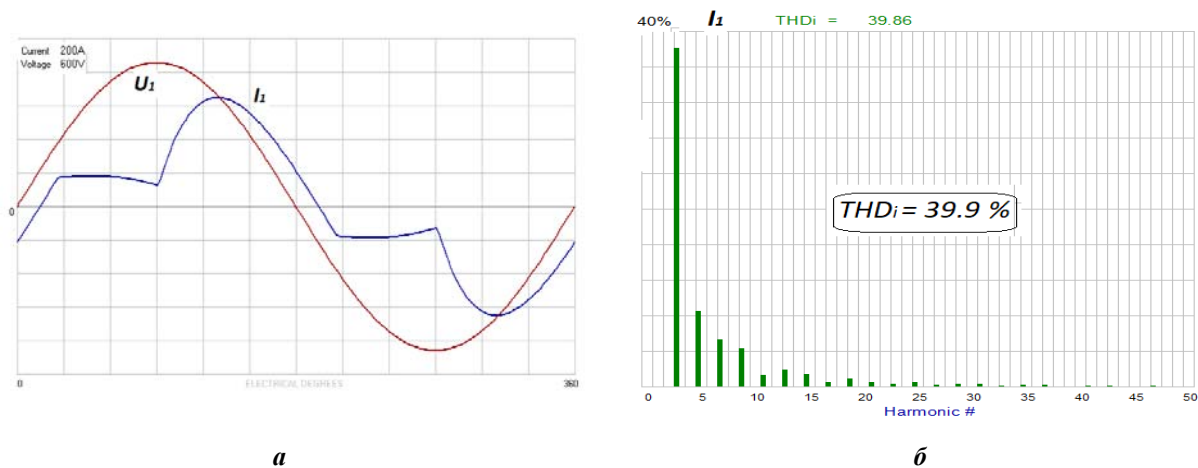


Рис. 4

Активный фильтр. Активные фильтры [1], получившие в последнее время достаточное распространение, обладают уникальными возможностями фильтрации гармоник тока. Основной их недостаток заключается в дороговизне, вызванной не только стоимостью элементной базы, но и сложностью обеспечения должного быстродействия при минимальных динамических потерях в транзисторах. Одним из лучших активных фильтров является фильтр параллельного типа с оригинальной системой управления, предложенный докт.техн.наук Н.С. Комаровым, разработанный и испытанный при участии авторов настоящей статьи, силовая часть которого (АФ) показана на рис. 5.

Результаты моделирования процессов в такой схеме представлены на рис. 6, а, б: эпюры входного тока I_1 и тока нагрузки I_n , а также спектральный состав входного тока. Как видно, форма потребляемого из сети тока мало отличается от синусоиды, а $THDi$ снижен до 5%, что удовлетворяет всем международным нормам. Более того, есть возможность практически полного подавления всех высших гармоник. Объясняется это следующим образом. Генерируемый инвертором активного фильтра несинусоидальный ток i_A можно представить рядом Фурье как сумму гармоник различной амплитуды и фазы $i_A = \sum_k^n I_k \sin(k\omega t + \varphi_k) i_A$, где k – нечетные числа натурального ряда начиная с 3 и кончая n , а амплитуда k -ой гармоники I_k и ее фазовый угол φ_k вычисляются по известным формулам [7]. Заменяя при моделировании активный фильтр параллельным соединением n источников тока приведенного выше вида и перебирая по определенному алгоритму I_k и φ_k таким образом, чтобы минимизировать каждую гармонику входного тока I_1 , можно минимизировать суммарный $THDi$ на любом заданном уровне.

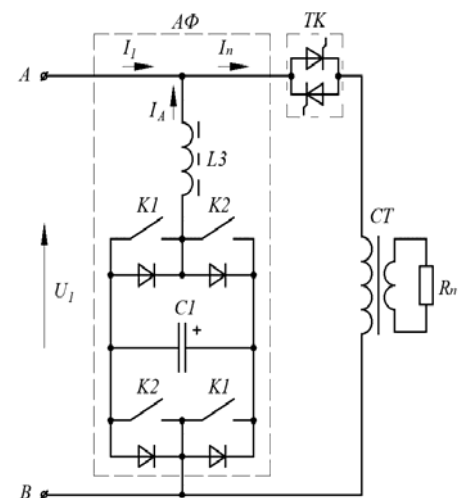


Рис. 5

В нашем случае мы ограничились уровнем 5%, для чего было достаточно учесть 9 гармоник с параметрами, приведенными в табл. 2. При этом действующее значение тока, генерируемого активным фильтром, составило $I_A = 48.0$ А.

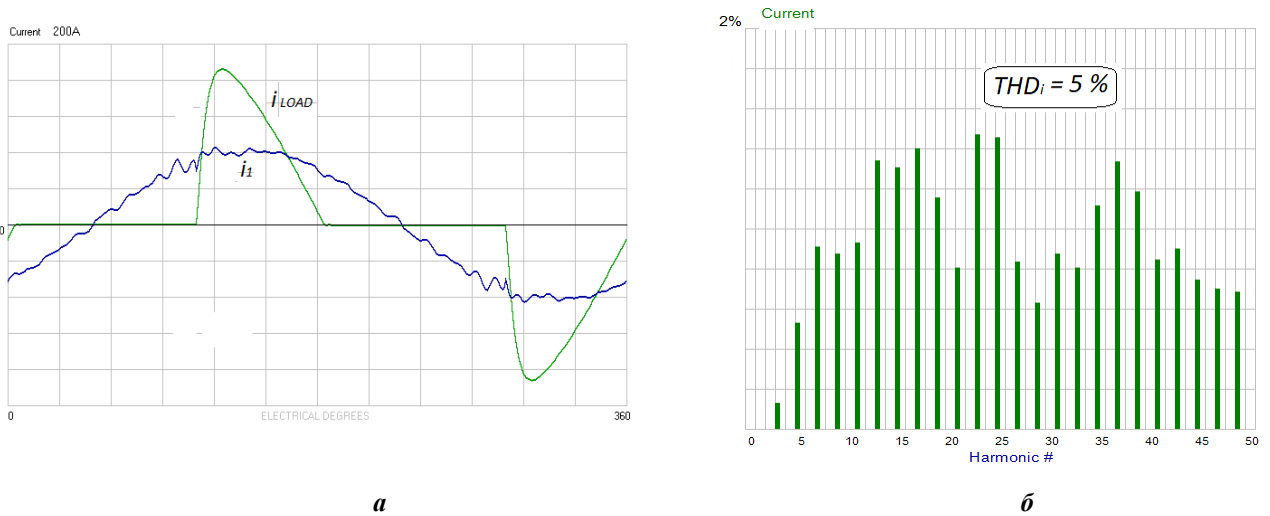


Рис. 6

k	3	5	7	9	11	13	15	17	19
I_k , А	57	26	14	12.5	7	6	4.5	2.8	3
φ_k , град	36	138	-75	50	0	-40	90	150	0

Эта составляющая ПФ помимо параллельного содержит и последовательное L-звено ($L1$ на рис. 7). Это звено играет решающую роль в улучшении режима работы активной части такого фильтра, позволяя в значительной степени освободить ее от фильтрации высших гармоник спектра – эту функцию выполняет пассивная составляющая. На рис. 8 показаны эпюры токов (а) и спектральная характеристика гибридного фильтра (б), питающего ту же нагрузку, что и в предыдущем случае, а в табл. 3 приведены величины амплитуд токов активной части фильтра и их фазовых углов. Результирующий ток активной части составляет 23.9 А (г.м.с.), т.е. практически в 2 раза меньше, чем при отсутствии пассивной части фильтра, что существенно снижает стоимость гибридного фильтра в целом. Фактически это преимущество оказывается еще большим благодаря следующим обстоятельствам. Фирмы, производящие активные фильтры с использованием IGBT транзисторов, дают рекомендации по ограничению допустимых токов высших гармоник, генерируемых фильтром (в противофазе с генерируемыми нелинейной нагрузкой) в связи с перегревом транзисторов из-за динамических потерь на повышенных частотах (т.н. *derating*).

Например, фирма DANFOSS рекомендует уровень 3-й гармоники снизить до 85% от необходимого (расчетного), уровень 5-ой – до 70%, 7-ой – до 50% и т.д. Естественно, это привело бы к увеличению $THDi$ фильтра, на что потребитель пойти не может и вынужден приобретать фильтр с пропорционально завышенным номиналом тока. Так, для рассмотренного выше варианта активного фильтра с расчетным номинальным током $I_A = 48.0$ А необходимо завязать допустимые уровни амплитуд 3-ей гармоники до $I_3 = 57/0.85 = 67$ А, 5-ой – до $I_5 = 26/0.7 = 37$ А и 7-ой – до $I_7 = 14/0.5 = 28$ А (в

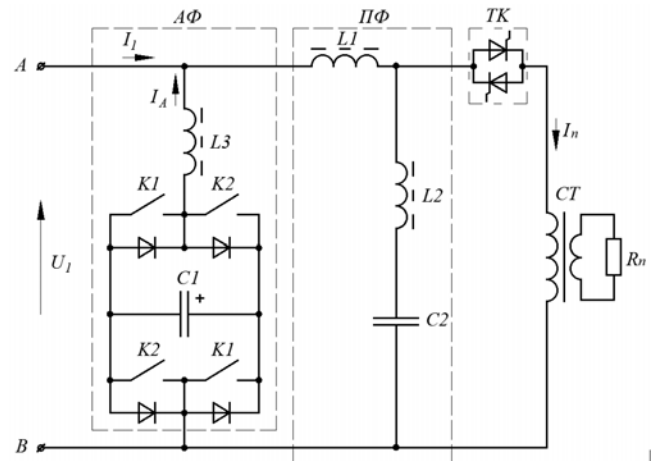


Рис. 7

k	3	5	7	9	11	13	15	17	19
I_k, A	34	3.6	5.9	0.4	1.5	0.2	0.2	0.3	0.3
$\varphi_k, \text{град}$	30	60	-150	-50	100	-60	-20	-150	-60

соответствии с данными табл. 2), что означает завышение номинального тока активного фильтра с 48 до 58 А, т.е. в 1.2 раза.

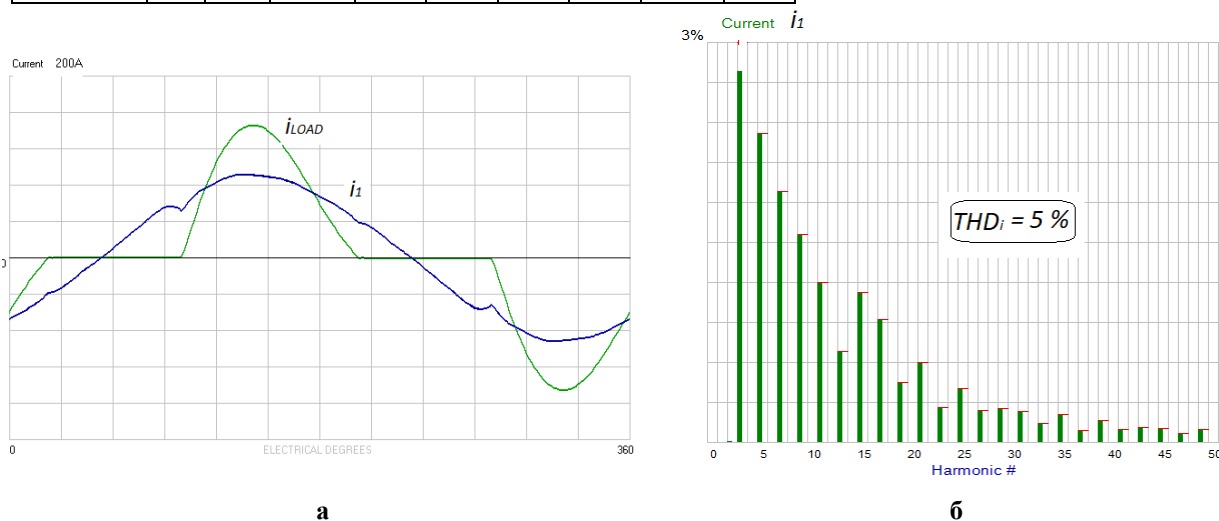


Рис. 8

Действительно, при учете только этих трех наиболее значимых гармоник действующее значение этого тока $I_A = [(I_3^2 + I_5^2 + I_7^2) / 2]^{1/2} = 58 \text{ А}$. Конечно, аналогичное вынужденное завышение номинального тока имеет место и для активной части гибридного фильтра, но оно, как показывают расчеты, в процентном отношении гораздо меньше. Следует отметить, что приведенный набор – один из множества допустимых, он лишь демонстрирует возможность, как уменьшить минимум вдвое номинальный ток и установленную мощность активного фильтра. Оптимизация этих параметров (которая здесь не рассматривается) позволит, по-видимому, существенно улучшить этот показатель. Такие оптимизированные параметры, прежде всего, можно использовать как стартовые при разработке программ управления активной частью гибридных фильтров, работающих по принципу компенсации гармоник искажения питающего (сетевое) тока гармониками в противофазе. При использовании же активной части гибридных фильтров, работающих по принципу сравнения реальных временных сигналов с эталонными так, как это делается в рассматриваемых здесь активных фильтрах Н.С. Комарова, такая компенсация искажений происходит автоматически (при соответствующем масштабировании сигналов, пропорциональных питающему напряжению и сетевому току).

Возможность использования примененной методики математического моделирования гибридных фильтров проверялась на экспериментальной установке по схеме рис. 7, содержащей активный фильтр с номинальным током 15 А, пассивный фильтр с $THD_i=23\%$ ($L_1=10 \text{ мН}$, $L_2=112 \text{ мН}$, $C=10 \text{ мкФ}$), трансформатор с коэффициентом трансформации 4:1 и с повышенным рассеянием магнитного потока (для обеспечения падающей внешней характеристики) и активную нагрузку мощностью 2 кВт. В качестве тиристорного коммутатора применялся регулятор серии «РЕНАП» фирмы ООО ТЭМС. Результаты экспериментов показаны на рис 9: а – без фильтров, б – только с пассивным фильтром, в – только с активным фильтром, г – с обоими фильтрами и с дополнительным конденсатором $C_d=200 \text{ мкФ}$, подключенным параллельно выходу пассивного фильтра.

Без использования фильтров ток сети I_l , равный току нагрузки (рис. 9, а), составлял 15.6 А при $THD_i=46\%$ (рис. 9, а).

При использовании пассивного фильтра, как видно из рис. 9, б, ток сети при той же нагрузке снижался до 10.3 А, отставая по фазе от сетевого напряжения почти на 90 градусов, а THD_i снижался до 23%.

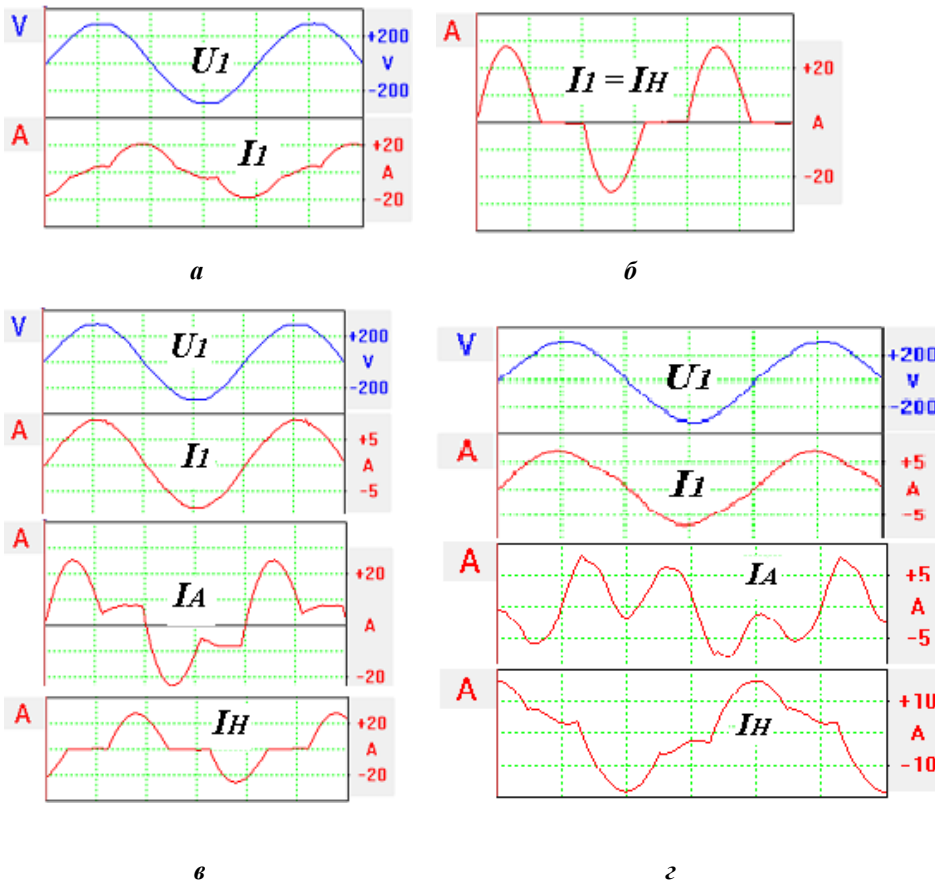


Рис. 9

При подключении только активного фильтра (рис. 9, б) THDi снижался до 1–2% (практически идеальная фильтрация) при полном совпадении по фазе входных тока и напряжения ($\cos\varphi=1$). При этом ток активного фильтра составлял значительную величину – 16 А, поскольку этот фильтр имманентно выполняет функцию компенсатора реактивной мощности. Если эту функцию переложить на дополнительный конденсатор $C_d=200$ мкФ, подключенный параллельно выходу гибридного фильтра (на рис. 7 не показан), ток активного фильтра снизился до 4 А, т.е. почти в 4 раза (рис. 9, г).

Изложенные результаты проведенных экспериментов хорошо коррелируют с резуль-

татами математического моделирования рассмотренных фильтров: расхождение в значениях токов, напряжений и THDi не превышает +/- 5% во всем диапазоне изменения этих величин.

Выводы.

Пассивные широкополосные LMC-фильтры не эффективны для подавления гармоник тока, питающего мощные однофазные нагрузки даже при сравнительно нешироком диапазоне регулирования этого тока $d = (1:2)$ с помощью тиристорных коммутаторов.

Активные фильтры с использованием современных IGBT транзисторов позволяют достичь сколь угодно малого коэффициента гармоник (THDi) питающего тока, в том числе при широком диапазоне его регулирования, однако достигается это за счет неоправданно завышенного значения номинальных токов транзисторов фильтра.

Наиболее целесообразными для использования с мощными однофазными нагрузками являются гибридные фильтры, состоящие из каскадного соединения параллельного активного и последовательно-параллельного пассивного фильтра.

Для активно-индуктивных нагрузок радикальное снижение тока активной составляющей гибридного фильтра дает подключение к выходу его пассивной части дополнительного конденсатора необходимой емкости.

Оптимизация соотношения между активной и пассивной составляющими гибридного фильтра, дающего максимальный технический и экономический эффект, должна быть предметом дальнейшего рассмотрения.

1. Muhammad H. Rashid. Power Electronics Handbook. N.-Y.: Academic Press, 2001. 876 p.
2. Стяжкин В.П., Подейко П.П. Оптимальное управление электротехнологической установкой по производству базальтового супертонкого волокна. *Вестник НТУ ХПИ*. Тем. выпуск: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. 2015. № 12 (1121). С. 124-127.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 839 с.

4. IEC 61000-3-12:2011. Electromagnetic compatibility. Part 3-2: Limits. Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current $>16A$ and $\leq 75A$ per phase.
5. Levin M., Volkov I. Universal Harmonic Mitigating System. Patent USA No 6127743, 2000.
6. Levin M., Volkov I. Harmonic mitigating device with magnetic shunt. Patent USA No 2006/0197385b A1, 2006.
7. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974, 832 с.
8. Колб А.А. Гибридные фильтры в устройствах управления качеством электроэнергии. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. № 3(19). С. 250-253.

УДК 621.314: 621.317: 621.313.3

ПРИДУШЕННЯ ГАРМОНІК СТРУМУ ЖИВЛЕННЯ ПОТУЖНИХ ОДНОФАЗНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

І.В. Волков, член-корр. НАН України, **В.П. Стяжкін**, канд.техн.наук, **П.П. Подейко**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: tems@ukr.net

Описано гібридний фільтр гармонік мережевого струму джерела живлення електротермічної установки з виробництва базальтового супертонкого волокна (БСТВ) у режимі розігріву фільтрної пластини. Фільтр використовує комбіновану схему пасивного широкопasmового ЛМС-фільтра, каскадно включеного з транзисторним активним фільтром. Проведено математичне моделювання такого фільтра і експериментальна перевірка ефективності придушення ним гармонік струму мережі. Проведено порівняння експериментальних спектрограм і етор струму з аналогічними результатами моделювання, підтверджена адекватність моделей і можливість їхнього використання у разі розробки однофазних гібридних фільтрів гармонік струму. Бібл. 8, рис. 9, табл. 3.

Ключові слова: коефіцієнт гармонік струму, THDi, ЛМС-фільтр, активний фільтр паралельного типу, гібридний фільтр, тиристорний регулятор, трансформатор, компенсація спотворень.

SUPPRESSION OF CURRENT HARMONICS FEEDING POWERFUL SINGLE-PHASE LOADS

I.V. Volkov, V.P. Styazhkin, P.P. Podeiko
The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,
e-mail: tems@ukr.net

The hybrid filter of harmonics of the mains current of the power source of the electrothermal installation for the production of basalt super thin fiber (BSTF) in the heating mode of the draw plate is described. The filter uses a combined circuit of a passive broadband LMC filter cascaded with a transistor active filter. Mathematical modeling of such a filter and experimental verification of the effectiveness of harmonic suppression of the mains current are carried out. Experimental spectrograms and current diagrams were compared with similar simulation results, the models were confirmed to be adequate and can be used in the development of single-phase hybrid current-harmonic filters. References 8, figures 9, tables 3.

Key words: current harmonic factor, THDi, LMC-filter, active filter of parallel type, hybrid filter, thyristor controller, transformer, distortion compensation.

1. Muhammad H. Rashid. Power Electronics Handbook. N.-Y.: Academic Press, 2001, 876 p.
2. Styazhkin V.P., Podeiko P.P. Optimal control of the electro-technological unit for the production of basalt super-thin fiber. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu KhPI*. Tematychnyi vypusk: Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriia i praktika. 2015. No 12 (1121). Pp. 124-127. (Rus)
3. Voldek A.I. Electrical machinery. Leningrad: Energiia, 1974. 839 p. (Rus)
4. IEC 61000-3-12:2011. Electromagnetic compatibility. Part 3-2: Limits. Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current $>16A$ and $\leq 75A$ per phase.
5. Levin M., Volkov I. Universal Harmonic Mitigating System. Patent USA No 6127743, 2000.
6. Levin M., Volkov I. Harmonic mitigating device with magnetic shunt. Patent USA No 2006/0197385b A1, 2006.
7. Korn G. and Korn T. Handbook of mathematics for scientists and engineers. Moskva: Nauka, 1974. 832 p. (Rus)
8. Kolb A.A. Hybrid filters in power quality control devices. *Elektromekhanichni i enerhozberigayuchi systemy*. 2012. No 3(19). Pp. 250-253. (Rus)

Надійшла 01.02.2019
Остаточний варіант 08.02.2019