

Конференция "Качество электроснабжения — совместная ответственность производителей, дистрибьюторов, обычных и производящих потребителей"

Ченстохова, 28-29 ноября 2019 года

doi (цифровой идентификатор документа): 10.32016/1.67.06

ФИЛЬТРЫ ГАРМОНИК В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРИВОДНЫХ СИСТЕМАХ**Jarosław CZORNIK, Maciej HALTOF (Ярослав ЧОРНИК, Мацей ХАЛТОФ)**

ELHAND Transformatory Sp. z o.o. (ООО "ELHAND Transformatory")

тел.: 34 3473 132 Адрес электронной почты: j.czornik@elhand.pl

тел.: 34 3473 131 Адрес электронной почты: m.haltof@elhand.pl

Резюме: Мировой рынок преобразовательных приводных систем является одним из самых динамично развивающихся. В настоящее время более половины электроэнергии, потребляемой промышленностью, приходится на приводные системы. Ныне все чаще решающим фактором при покупке таких устройств является тщательный экономический анализ и реальные сроки окупаемости. Целью данной статьи является ознакомление пользователей преобразовательных приводных систем, какое большое влияние на эффективность (коэффициент полезного действия) и энергосбережение всей системы в целом имеют фильтры гармоник. В статье показана зависимость входного тока преобразователя от параметров точки подключения и последовательного реактивного сопротивления. Обсуждено отрицательное влияние деформации прохождения тока на работу магнитных элементов. Представлено влияние фильтра гармоник на параметры и работу преобразовательной приводной системы.

Ключевые слова: фильтры гармоник, гармоники в приводных механизмах, преобразовательные приводные системы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Потребность в регулировании скорости вращения и плавного пуска электродвигателей существует практически с момента их возникновения, т.е. уже свыше 150 лет. За этот период произошло удивительное развитие как двигателей, так и различных методов регулирования скорости. Внедрена стандартизация и параметризация решений, что изменило подход к проектированию и оптимизации электрических машин. В основе революции лежали, прежде всего, численные методы, стремительное развитие аппаратного и программного обеспечения, а также большой прогресс в области активных и изоляционных материалов. На смену регулированию скорости вращения резисторами и регулируемыми дросселями или системами Леонарда пришли полупроводники и современные преобразовательные системы. Современные приводные системы не полностью свободны от дефектов, они все еще находятся в стадии интенсивного развития. Углубляются знания о происходящих в них электромагнитных, механических, тепловых, акустических и других явлениях. Однако ключевой проблемой, как представляется, по-прежнему остается вечный конфликт и в то же время необходимость компромисса между энергоэффективностью и материальностью решения. Дни, когда конструкционные резервы были стандартом, давно прошли. Поэтому сегодня Европейская Комиссия

регулярно готовит и вводит специальные правила и требования для отдельных групп устройств (например, EN 50598-2 или Регламент ЕС 548/2014 - Директива экодизайн). Эти записи в первую очередь определяют минимальные требования к эффективности каждой отдельной машины и устройства. Это делается для того, чтобы предотвратить слишком "экономичное" проектирование оборудования и повысить энергоэффективность системы и промышленности.

2. ЗАВИСИМОСТЬ ВХОДНОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТОЧКИ ПОДКЛЮЧЕНИЯ

Точка общего соединения) может рассматриваться как источник синусоидального напряжения или как силовая сеть с определенным индуктивным внутренним импедансом. Определяющим фактором, напрямую связывающим зависимость входного тока подключенного преобразователя с параметрами в точке подключения, является коэффициент короткого замыкания сети SCR (сокращение от англ. short circuit ratio):

$$k_{SC} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (1)$$

ГДЕ:

I_{sc} — ток короткого замыкания в точке подключения,I_L — ток нагрузки в точке подключения.

Коэффициент короткого замыкания в сети также называется RSC (коэффициент короткого замыкания), который определяет жесткость точки подключения по отношению к потребителям, находящимся под напряжением. Вообще говоря, чем выше отношение мощности короткого замыкания в точке подключения к мощности запрашиваемого преобразователя, тем более жесткой является сеть, а ток, забираемый преобразователем из сети, более деформирован, с более высоким действующим значением. На рисунке 1 показана эта взаимосвязь в сети с преобразователем мощностью 250 кВт. Для ограничения деформации THDi и действующего значения входного тока преобразователя необходимо ограничить ток короткого замыкания в точке подключения. Вмешательство в мощность короткого замыкания в точке подключения является дорогостоящим и обычно возможно только на этапе проектирования сети. На практике наиболее распространенным и простым способом ограничения (до некоторой степени) деформации тока является повышение импеданса контура короткого замыкания силовой установки за счет

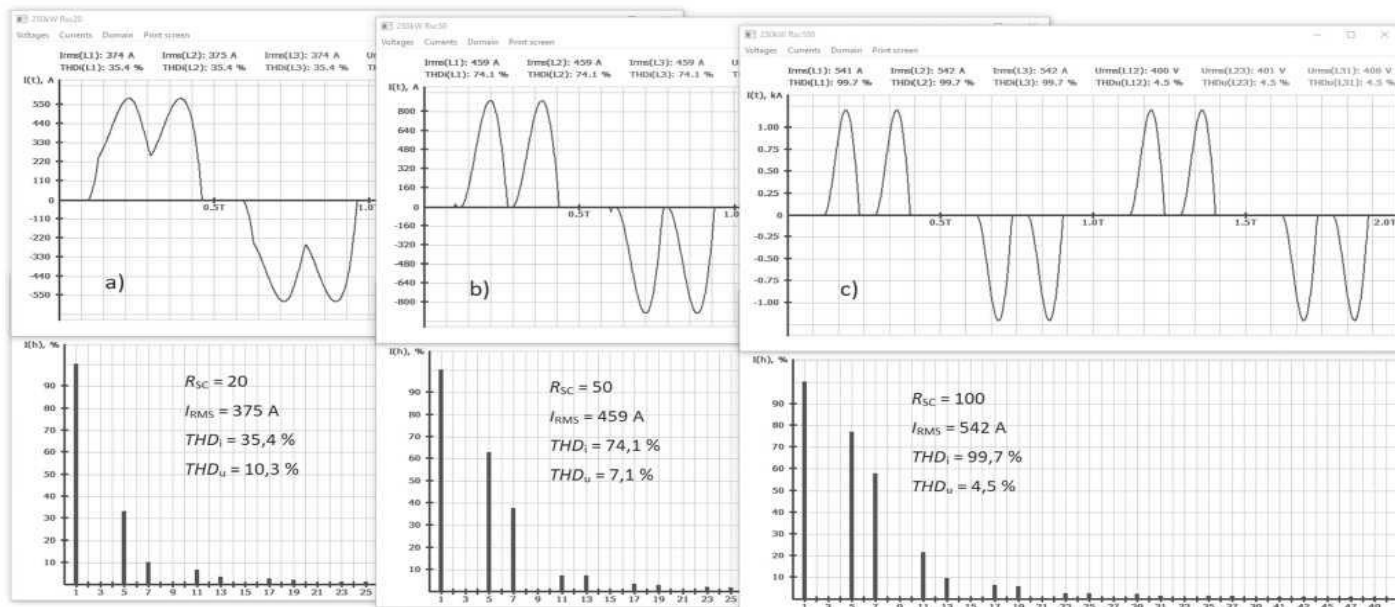


Рис. 1. Временные осциллограммы и спектр входного тока 6-импульсного преобразователя мощностью 250 кВт для различных мощностей короткого замыкания в точке подключения; а) $S_{TR}=315$ кВА, $u_x=6\%$; б) $S_{TR}=1000$ кВА, $u_x=6\%$; в) $S_{TR}=2500$ кВа, $u_x=6\%$

использования дополнительных последовательных реакций на входной стороне преобразователя (например: преобразовательный трансформатор с соответствующим напряжением короткого замыкания или сетевой дроссель с определенной индуктивностью, рис. 2).

Относительный импеданс такой системы составляет:

$$z \cong \frac{I_N \times (X_{TR} + X_D) \times \sqrt{3}}{U_N} \times 100\% \quad (2)$$

где:

I_N , U_N - номинальные ток и напряжение,
 X_{tr} , X_D - реактивное сопротивление трансформатора, дросселя.

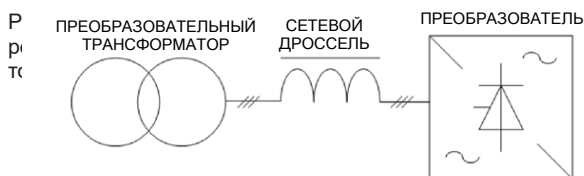
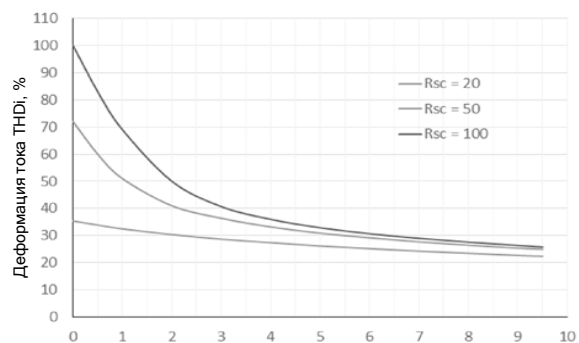


Рис. 2. Преобразовательная система с дополнительными последовательными реактивными сопротивлениями [1]

Важность последовательного импеданса контура огромна. Влияние дополнительных реактивных сопротивлений в токовой линии питания преобразователя показано на рисунке 3. Правильно подобранный трансформатор и последовательные

дроссели в некоторой степени снижают воздействие трансформатора на сеть и других потребителей, но это лишь необходимый минимум. Даже использование 5-6% дополнительного последовательного реактивного сопротивления ограничит общий коэффициент деформации тока THD_i только примерно до 35%. С другой стороны, использование более высоких последовательных импедансов не практикуется из-за высоких падений напряжения и, как следствие, снижения мощности системы привода [1].

3. ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРОХОЖДЕНИЯ ВХОДНОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА РАБОТУ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Искажение входного тока преобразователя оказывает очень негативное влияние на работу всех магнитных элементов, питающих его и другие приемники, питающиеся от одной и той же сети. Количественное увеличение энергетических потерь в трансформаторах и дросселях в зависимости от содержания гармоник в токе нагрузки можно рассчитать, определив коэффициенты дополнительных потерь и суммарные потери [2, 3, 4]:

а) коэффициент дополнительных потерь от увеличения эффективной текущей стоимости

$$F_i^2 = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 = \left(\frac{I_{NRMS}}{I_1}\right)^2 \quad (3)$$

где:

I_h — значение тока гармоник порядка h ,
 I_1 — эффективное значение основной гармоники, h — номер гармоники.

б) коэффициент потерь на вихревые токи в обмотках (К-фактор):

$$F_w = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^2 \quad (4)$$

с) коэффициент потерь на вихревые токи в соединениях и конструкционных деталях (анг. stray losses — потери на рассеяние):

$$F_p = F_k = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^{0,8} \quad (5)$$

Суммарные потери нагрузки в трансформаторе P_c при потоке в обмотках деформированного тока составляют:

$$P_c = P_p \times F_i^2 + P_w \times F_w + P_{dk} \times F_k + P_{do} \times F_p \quad (6)$$

где:

P_p — основные потери, P_w — потери на вихревые токи в обмотках, P_{dk} — дополнительные потери в конструкционных деталях, P_{do} — дополнительные потери в стоках.

В случае дросселей суммарные потери P_c необходимо дополнить еще одной очень важной составляющей дополнительных потерь PFF (анг. fringing flux — краевой поток), которая представляет собой потери в обмотке, связанные с потоком рассеяния вокруг немагнитных щелей в дроссельном сердечнике. Значение этой составляющей можно минимизировать, используя многослойные сердечники или вставляя в щель магнитный материал с очень низкой проницаемостью мкр.

Деформация тока нагрузки приводит к тому, что дополнительные потери в магнитных элементах могут увеличиться даже в несколько раз (табл. 1).

Таблица 1. Влияние деформации тока на дополнительные потери в магнитных элементах

	Rsc 100	Rsc 50	Rsc 20	Пассивный фильтр
THDi	99,7%	74,2%	35,4%	5%
F_i^2	1,99	1,55	1,12	1,01
F_w (К-фактор)	43,9	20,8	5,53	1,19
$F_p = F_k$	5,23	3,21	1,49	1,01

Увеличение потерь приводит к увеличению тепловыделения и повышению рабочей температуры устройств, что приводит к сокращению срока службы или даже к их разрушению. В результате этого магнитные элементы для взаимодействия с деформированными токами должны быть термически увеличены в размерах в зависимости от степени деформации тока (большее сечение сердечника, обмоточной проволоки или обмоточной ленты, использование переплетов обмотки и т.д.), либо их номинальная мощность должна быть ограничена. Оценку увеличенной мощности можно сделать на основе коэффициента К-фактора (рис. 4), который имеет наибольшую долю с точки зрения дополнительных потерь. Однако следует помнить, что это не приведет к снижению как первичных, так и вторичных потерь электроэнергии. Мы противодействуем только их последствиям благодаря более крупному и дорогостоящему устройству. Только ограничение высших гармоник в спектре тока до достаточно низкого уровня приведет к снижению дополнительных потерь. Это, в свою очередь, приводит к повышению эффективности всей системы.

4. МЕТОДЫ УСТРАНЕНИЯ И ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ ЭМИССИИ ГАРМОНИК ТОКА

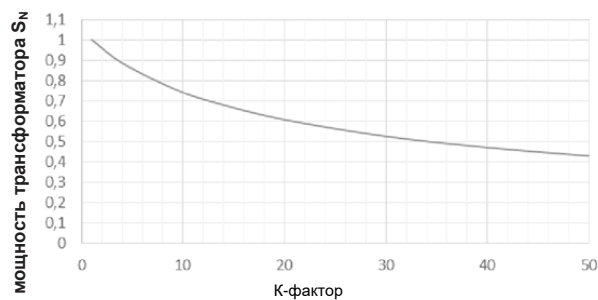


Рис. 4. Степень повышения номинальной мощности трансформатора в зависимости от К-фактора

Существует множество методов устранения и ограничения гармоник во входном токе преобразователей. Начиная от простых дросселей переменного и постоянного тока, многоимпульсных систем, пассивных фильтров и заканчивая сложными активными системами. Каждая из техник фильтрации характеризуется различной эффективностью подавления гармоник, различными потерями, разными затратами на приобретение и эксплуатацию (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение эффективности и относительных затрат различных методов устранения гармоник тока.

Метод ограничения гармоник тока	Деформация тока (THDI)	Относительная стоимость
Системы без фильтрации	60 - 120 %	1
2% дроссели перемен. или постоянн. тока	30 - 60 %	2
4% дроссели перемен. или постоянн. тока	25 - 45 %	3
12-импульсные системы	10 - 15 %	4
Пассивные фильтры	5 - 8 %	4
18-импульсные системы	4 - 6 %	5
Активные фильтры	3 - 5 %	5

Дроссели переменного и постоянного тока являются самым дешевым методом ограничения эффективного значения сетевого тока и некоторого уменьшения гармоник в токе питания (в зависимости от реактивного сопротивления дросселя) — к сожалению, на сегодняшний день это недостаточный минимум, который не соответствует действующим стандартам.

В многоимпульсных системах, благодаря фазовым сдвигам между вторичными обмотками трансформатора (две вторичные обмотки в случае 12-импульсной системы, три вторичные обмотки в случае 18-импульсной системы) и использованию соответствующего количества выпрямителей, мы устраняем гармоники 5 h и 7 h (в 12-импульсной системе) и дополнительно 11 h и 13 h (в 18-импульсной системе). Основным недостатком многоимпульсных систем является их восприимчивость к асимметрии нагрузки и несбалансированному или деформированному напряжению питания. Тогда невозможно эффективно ограничить гармоники (5, 7, а также 11 и 13). Это приводит к тому, что THDi тока возрастает выше задаваемых значений, что во многих случаях может привести к невыполнению задаваемых параметров.

Таблица 3. Допустимые пределы деформации гармоник тока для всех устройств в точке подключения в зависимости от I_{sc} / I_L согласно IEEE 519-2014

I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq 50$	THD _i
< 20	4%	2%	1,5%	0,6%	0,3%	5%
20 < 50	7%	3,5%	2,5%	1%	0,5%	8%
50 < 100	10%	4,5%	4%	1,5%	0,7%	12%
100 < 1000	12%	5,5%	5%	2%	1%	15%
> 1000	15%	7%	6%	2,5%	1,4%	20%

Таблица 4. Допустимые пределы гармоник напряжения в точке подключения по IEEE 519-2014

Напряжение в точке ПСС	Индивидуальные гармоники	THD _u
$U \leq 1$ кВ	5,0%	8,0%
1 кВ < $U \leq 69$ кВ	3,0%	5,0%
69 кВ < $U \leq 161$ кВ	1,5%	2,5%
161 кВ < U	1,0%	1,5%

Как пассивные, так и активные фильтры частично устойчивы к асимметрии питающего напряжения, а их свойства подавления позволяют им соответствовать ограничительным нормам по напряжению и току в точке подключения. Преимуществом активных фильтров является поддержание низкого уровня тока THDI во всем диапазоне нагрузок, но это напрямую отражается на цене покупки такого устройства.

Сегодня нет необходимости кого-либо убеждать в том, что ограничение или устранение гармоник является необходимостью. Тем не менее, остаются сомнения относительно того, какой метод выбрать и каким стандартам необходимо соответствовать, чтобы избежать ненужных проблем и затрат. Действующие нормативные предписания и правила в области эмиссии гармоник относятся, главным образом, к гармоникам напряжения в точке подключения (EN 50160, EN 61000-2-2, EN 61000-2-4) и реже в токе (EN 61000-3-2, EN 61000-3-12) [5]. Однако следует помнить, что искажение напряжения вызвано гармониками в токе, генерируемом нелинейными приемниками. Поэтому все чаще выдвигаются требования по ограничению уровня эмиссии гармоник как тока, так и напряжения в точке подключения в соответствии со стандартом IEEE 519-2014 [6]. Это стандарт, охватывающий все сети, уровни напряжений и токов в точке подключения (табл. 3, табл. 4). Применение допустимых пределов деформации гармоник тока и

напряжения уже на ранней стадии проектирования систем электроснабжения и нелинейных нагрузок позволяет обеспечить стабильную и предсказуемую работу системы в течение всего срока эксплуатации.

5. ФИЛЬТРЫ ГАРМОНИК - ЭФФЕКТИВНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИВОДНОЙ СИСТЕМЫ

Эффективность электрической машины — это отношение мощности, отдаваемой данной машиной (P_{out}), к мощности, потребляемой ею (P_{in}). Таким образом, можно определить общую потерю мощности машины. Аналогично и в случае определения эффективности и потерь преобразовательных приводных систем. Однако здесь вопрос усложняется, так как эти системы обычно состоят из нескольких машин и устройств, которые дополнительно зависят друг от друга. Например, эффективность системы, показанной на рисунке 5, можно определить следующим образом:

$$\eta_{System}^{Drive} = \frac{P_{Out}}{P_{In}} = \frac{P_{Out}}{P_{Out} + dP_{Total}^{Losses}} \quad (7)$$

где:

$$dP_{Total}^{Losses} = dP_{Tr} + dP_{HF} + dP_{FC} + dP_M \quad (8)$$

или в виде эффективности:

$$\eta_{System}^{Drive} = \eta_{Tr} \times \eta_{HF} \times \eta_{FC} \times \eta_M \quad (9)$$

Общая эффективность приводной системы является результатом эффективности отдельных ее компонентов, начиная с точки подключения (ПСС) или расчетной точки. Однако на практике вопрос эффективности системы преобразовательного привода часто рассматривается некорректно, без учета влияния преобразователя на трансформатор, сеть и других потребителей. Это снижает

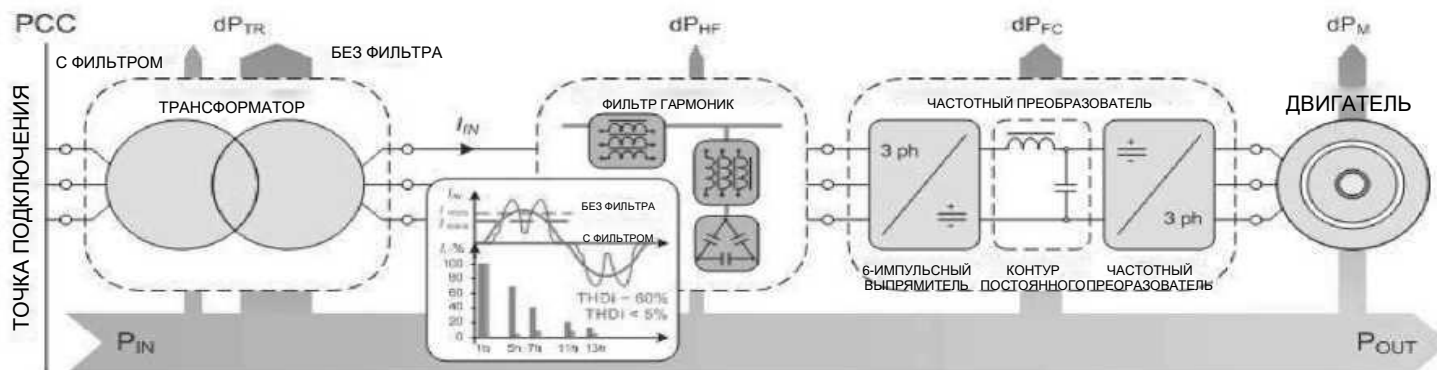


Рис. 5. Распределение потерь мощности в типичной преобразовательной приводной системе с фильтром гармоник и без него [7].

качество электроснабжения и энергоэффективность всей системы. Чтобы избежать этого, каждый преобразователь должен быть отделен и оснащен устройством, ограничивающим эмиссии гармоник к питающей сети.

Благодаря высокому подавлению и эффективности пассивные фильтры гармоник являются оптимальной альтернативой (эффективность фильтрации к стоимости применения) по сравнению с другими методами устранения гармоник во входном токе преобразовательных систем (табл. 2). Эффективность фильтрации пассивных фильтров гармоник близка к эффективности 18-импульсных систем, а зависимость подавления — от уровня нагрузки и дисбаланса напряжения питания ниже, чем в многоимпульсных системах. Существующие пассивные фильтры больше не являются просто комбинацией дросселя и конденсатора, настроенных на одну гармонику. Все чаще это усовершенствованное сочетание набора дросселей и конденсаторов для подавления определенного спектра гармоник. Компактные многоточечные решения, выполненные на общем ферромагнитном сердечнике, становятся стандартом (рис. 6) [7].

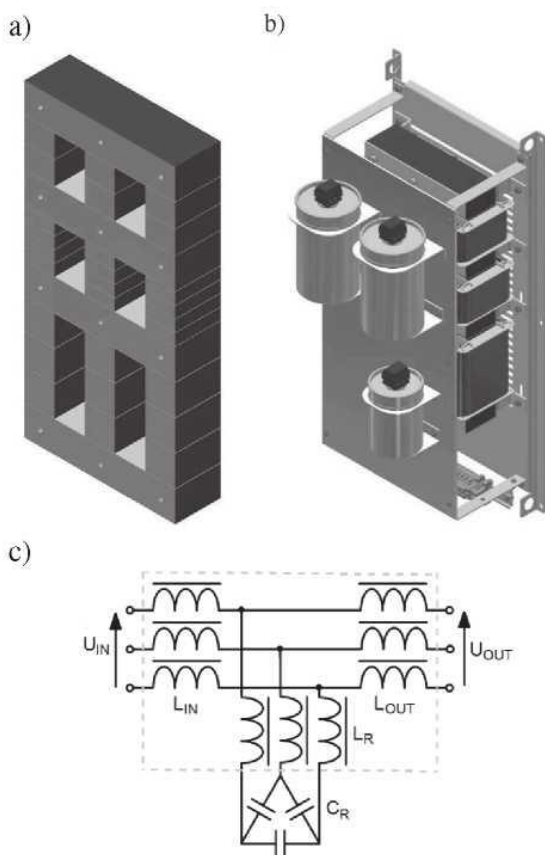


Рис. 6. Фильтр гармоник EF3N 55 кВт: а) строение многодроссельного сердечника с общими хомутами; б) компактная конструкция фильтра гармоник; в) принципиальная схема фильтра [7]

Конструкция общего магнитного сердечника (общие хомуты) в многодроссельном фильтре способствует ограничению габаритов и веса устройства. Индуктивности отдельных дросселей позволяют соответствующим образом формировать характеристики затухания фильтра (рис. 7). Параллельный дроссель вместе с батареей конденсаторов образует резонансную ловушку на определенную гармонику. Последовательные дроссели (входные и выходные) влияют на ширину полосы подавления и начальное ограничение гармоник более высокого порядка. Индуктивности дросселей и

емкости конденсаторов выбираются таким образом, чтобы фильтр достигал соответствующее подавление в широком диапазоне нагрузок. Кроме того, важным параметром также является потребление емкостного тока при отсутствии нагрузки или при низких нагрузках.

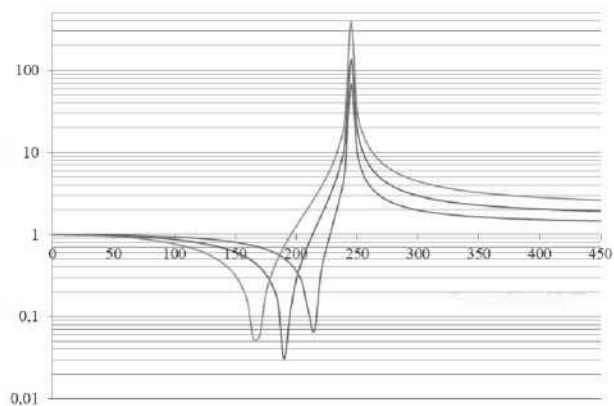


Рис. 7. Примеры характеристик подавления многодроссельного фильтра

Конструкция и оптимизация параметров многокорпусных фильтров позволяет снизить емкостной ток даже ниже $IC < 15\%IN$ номинального тока.

На основе типовых мощностей преобразовательных систем создаются соответствующие им семейства фильтров гармоник, которые удовлетворяют требованиям подавления согласно стандарту IEEE 519-20144, независимо от параметров точки подключения.

На рисунке 8 приведены результаты измерений содержания гармоник во входном токе преобразователя 55 кВт в системе без фильтра и в системе с многодроссельным фильтром гармоник EF3N- 55 кВт 380-415 В±10% T40F. Использование фильтра гармоник в системе электроснабжения насосной станции позволило снизить значение THDi в токе с 40% до уровня ниже 4,5%, тем самым устранив негативное влияние деформированного тока на других потребителей в сети.

6. ПОДВЕДЕНИЕ ИТОГОВ

Влияние преобразовательных систем на сеть — это очень обширная, все еще актуальная и растущая проблема. Это вынуждает законодателей вводить нормативные акты, которые помогают поддерживать качество электроэнергии в точке подключения. Преобразовательные трансформаторы или последовательные дроссели не решают всех проблем и не в состоянии ограничить эмиссии гармоник тока до достаточно низкого уровня. Правильный анализ содержания гармоник во входном токе преобразователя имеет особое значение при выборе и термической балансировке взаимодействующих с ним магнитных элементов. Трансформаторы больших размеров — это пустая трата энергии — более разумно уменьшать гармоники, чем противодействовать их последствиям. Растущая осведомленность клиентов и спрос на оборудование для снижения гармоник приводит к тому, что пассивные фильтры гармоник продолжают сильно развиваться и оптимизироваться, что повышает их конкурентоспособность. Использование фильтров гармоник приводит не только к снижению затрат на электроэнергию, но и к значительному повышению эффективности и надежности преобразовательной приводной системы.

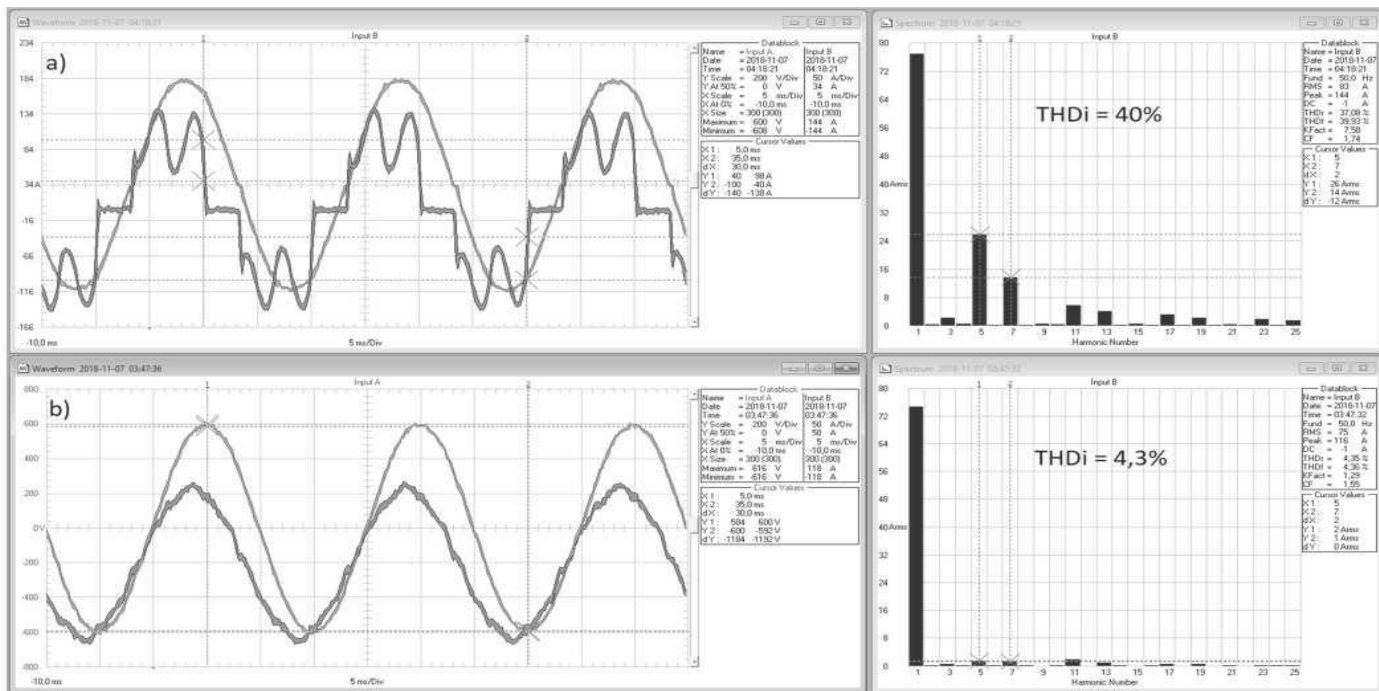


Рис. 8. Результаты измерения гармоник входного тока преобразователя 55 кВт; а) в системе без фильтра гармоник; б) в системе с трехдроссельным фильтром на общих хомутах EF3H-55 кВт 380-415 В±10% T40F [7].

7. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Czornik J., Łukiewski M. (Чорник Я., Лукевски М.): Filtry harmoniczných gwarancją kompatybilności elektromagnetycznej oraz wysokiej sprawności przekształtnikowych układów napędowych (Чорник Я., Лукевски М., Фильтры гармоник как гарантия электромагнитной совместимости и высокого КПД приводных систем преобразователей) - *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* (Электрические машины - Проблемные документы), № 2/2015, стр. 51-58.
2. Wolnik P., Sobota J. (Вольник П., Собота Ю.): Wpływ występowania wyższych harmoniczných w prądzie obciążenia transformatora dystrybucyjnego na sposób jego eksploatacji (Влияние присутствия высших гармоник в токе нагрузки распределительного трансформатора на способ его эксплуатации). Konferencja - Zarządzanie eksploatacją transformatorów, Wisła - Jawornik 2012r., s. 99-107. (Конференция - Управление эксплуатацией трансформаторов, Висла - Яворник 2012 г., стр. 99-107.)
3. Rak Я., Gala M., Jagła K., Kempinski M.: Analizy nałozki i potery w przekształtnikowych transformatorach napędowych. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* (Электрические машины - Проблемные документы), № 89/2011, стр. 139-147.
4. PN-EN 61378-1:2000 „Transformatory przekształtnikowe (Преобразовательные трансформаторы). Transformatory do zastosowań przemysłowych” (Трансформаторы для промышленных применений).

5. Pozowski A. (Позовский А.): Новые тенденции в области защиты электросетей от высших гармоник тока и напряжения при питании от преобразователей частоты. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* (Электрические машины - Проблемные документы), № 79/2008, стр. 57-62.
6. IEEE 519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (Рекомендуемая IEEE практика и требования по контролю гармоник в электроэнергетических системах).
7. Материалы и собственные исследования - ООО "Elhand Transformatory", Люблинец.

Дополнительные сведения:

Статья опубликована в рамках RPO WSL (Региональная рабочая программа Силезского воеводства) на 2014-2020 годы:

"Nowoczesne, energooszczędne układy przetwarzania energii elektrycznej wolne od harmoniczných generowanych przez przekształtniki mocy" (Современные энергоэффективные системы преобразования электроэнергии, не содержащие гармоник, производимых силовыми преобразователями) - WND-RPSL.01.02.00-24-0548/17.

