Ярослав Чорник, Мирослав Лукевски
ООО «ELHAND TRANSFORMATORY», Люблинец

ФИЛЬТРЫ ГАРМОНИК – ГАРАНТИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ И ВЫСОКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕРТОРНЫХ ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ.

Краткое содержание: В статье представлены риски и потери, связанные с возникновением гармоник тока, питающего приводные системы с 6-пульсным диодным мостом на входе. Статья показывает эффективный и экономичный способ их ограничения при помощи соответствующего подбора фильтров гармоник ElhandHF, обеспечивающих совместимость всей приводной системы в соответствии с нормами IEEE 519 и EN 61000. Описанные фильтры были спроектированы, изготовлены и прошли тестирование в условиях производства, а результатом этих работ является линейка фильтров, предназначенных для типовых приводных систем. Эти фильтры позволяют сохранить высокое качество напряжения питающей сети, снижают потери мощности, и, тем самым, затраты на эксплуатацию, а также повышают надежность и эффективность инверторных приводных систем. В статье представлены также преимущества применения в фильтрах многощелевых сердечников, выполненных по инновационной и низко затратной технологии ElhandCutCore.

Ключевые слова: *фильтры гармоник, сетевые дроссели, электромагнитная совместимость, высшие гармоники, многощелевые сердечники, преобразователи частоты, инверторы*

1. Введение

Качество электрической энергии – очень широкое понятие, охватывающее много технических аспектов. Тематика качества энергии – это важный вопрос, а его значение постоянно растет, так как расходы из-за плохого качества энергии несем все мы. Низкое качество электроснабжения приносит потери как в энергетике и промышленности, так и индивидуальным потребителям. На это существенно влияет динамичное развитие преобразовательной техники и повсеместное использование преобразователей мощности, преобразователей частоты, источников бесперебойного питания, иных нелинейных приемников с 6-пульсным диодным мостом на входе. Все большую группу потребителей электроэнергии представляют собой приводные системы, где функцию регулируемого источника питания выполняет преобразователь частоты с трехфазным диодным мостом на входе. В настоящее время это наиболее простое и наиболее часто встречающееся схемное решение, которое, тем не менее, вызывает множество помех и нарушений электромагнитного поля. Одной из проблем являются высшие гармоники токов потребляемых трехфазным шестипульсным диодным мостом, так как именно они вызывают большинство негативных последствий в системе электроснабжения. Поэтому используя технические решения, в которых присутствуют преобразователи частоты, следует обращать особое внимание на их электромагнитную совместимость для того чтобы, избежать незапланированных неполадок, увеличенных расходов на электроэнергию или создание потерь в электросети и других приемниках. Надеемся, данная работа поможет сделать оптимальный выбор магнитных элементов, а также увеличить эффективности всей приводной системы.

2. Допустимые уровни эмиссии гармонических составляющих тока.

Все чаще среди требований для инверторных приводных систем появляются ограничения уровня эмиссии гармоник в месте их подключения. Стандартные положения и действующие директивы в этой области касаются, прежде всего, предельных значений гармоник напряжения и общего коэффициента искажений напряжения THD в месте присоединения (EN 61000-2-2, EN 61000-2-4). Однако, следует помнить, что именно искаженная синусоида тока, который течет из электрической сети к нелинейному потребителю приводит к искажению напряжения в точке присоединения этого потребителя, что негативно виляет на работу всей системы электроснабжения и иных электроприемников подключенных к ней. Поэтому растущие требования, касающиеся качества электрической энергии и электромагнитной совместимости устройств, привели к тому, что все чаще можно встретить стандартные требования, которые ограничивают уровень эмиссии гармонических составляющих тока и коэффициент искажений тока THDi, потребляемого из сети электроснабжения (EN 61000-3-2, EN 61000-3-12). В настоящее время наиболее строгие требования в этом объеме содержатся в рекомендациях IEEE 519, действующих в США (*Таблица 1.*), и введение обязательства таких ограничений в иных Европейских странах – это только вопрос времени. Ужесточение правил, определяющих уровень искажений напряжения и тока в месте присоединения потребителя электроэнергии, на сегодняшний день является объективно необходимым. Только таким образом, при растущем количестве нелинейных приемников, можно поддержать качество электрической энергии на соответствующем уровне и ограничить ненужные потери активной мощности, которые непосредственно влияют на цену электроэнергии, а тем самым - на расходы производства.

3. Значение последовательных импедансов при питании 6-пульсых систем.

Величина токов высших гармоник (5h, 7h, 11h, 13h, …) при питании 6-пульсных систем зависит от импеданса короткого замыкания в месте присоединения и индуктивных элементов, присутствующих в пути протекания токов.

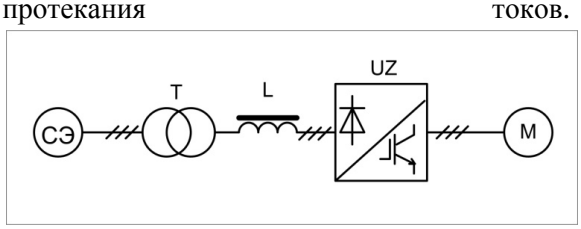

Рис. 1. Схема типовой инверторной системы.

Где СЭ – сеть электроснабжения; T – силовой трансформатор; L – индуктивность сетевого дросселя; UZ— двухзвенный преобразователь частоты; M—асинхронный двигатель.

Относительный импеданс такой системы составляет:

Таблица 1. Допустимые лимиты искажения гармоник тока для всех устройств в месте присоединения, в зависимости от I_{SC}, согласно IEEE 519

I_{SC}/I_L	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	THDi
< 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%**
I_{SC} –макс. Ток короткого замыкания в месте соединения; I_L – макс. токнагрузки в месте соединения						

$$Z[\%] \cong \frac{I_N \times (X_{TR} + X_D) \times \sqrt{3}}{U_N} \times 100 \qquad (1),$$

где:
I_N, U_N – номинальный ток и напряжение
X_{TR} – реактанс трансформатора
X_D – реактанс дросселя

Именно от суммарного импеданса всей цепи протекания тока зависят значения отдельных гармоник тока и общий коэффициент искажений THDi.
Во многих случаях мощность питающего трансформатора многократно превышает мощность питаемого приемника, а это означает, что импеданс трансформатора пропорционально многократно ниже для этой нагрузки.

Пример: Трансформатор 1000кВА с относительным импедансом короткого замыкания 6%, для нагрузки 100кВА составит только 0,6% импеданса. Дополнительно, если бы этой нагрузкой являлся, например, инвертор, работающий не на полную мощность, то реальный эффективный импеданс короткого замыкания, «видимый» этим инвертором, будет еще ниже, а ограничение гармоник небольшим (*Табл. 2*).

Как показано в приведенном примере и таблице 2, реальный импеданс цепи имеет огромное значение, а правильный анализ содержания гармоник во входном токе инвертора имеет особое значение при подборе и тепловом измерении взаимодействующих с ним магнитных элементов. Часто среди пользователей таких систем бытует убеждение, что каждый преобразующий трансформатор или входной дроссель решит все проблемы, связанные с возникновением гармоник, однако, к сожалению, как показывает практика, это не так. Правильно подобранный понижающий трансформатор или сетевой дроссель в определенной степени ограничивает негативные последствия работы инвертора на сеть и другие приемники, но это только необходимый минимум. Даже при 5%-ном импедансе общий коэффициент искажения тока THDi составит 35%. Большие импедансы на практике не используются из-за высокого падения напряжения на нем, а в результате – падения к.п.д. системы.

4. Влияние протекания искаженных токов на работу магнитных элементов трансформаторов и дросселей

Протекание искаженных высшими гармониками токов крайне неблагоприятно виляет на работу как трансформаторов, так и дросселей. Это наиболее заметно по росту потерь мощности, которые непосредственно влияют на тепловые условия работы и срок бесперебойной работы этих устройств. Масштаб

Таблица 2. Гармонические искажения тока на входе 6-пульсной системы в зависимости от эффективного импеданса короткого замыкания цепи (значения определены в среде SIMULINK)

Номер гармоники	**Процентное значение эффективного импеданса**						
	0,5%	**1%**	**1,5%**	**2%**	**3%**	**4%**	**5%**
5h	78%	60%	51%	46%	39%	35%	32%
7h	58%	36%	28%	23%	17,5%	14,5%	12,5%
11h	18%	13%	11%	9%	7,5%	6,5%	6%
13h	10%	8%	6,5%	6%	5%	4,3%	4%
17h	7,5%	5%	4%	3,6%	3%	2,5%	2,3%
19h	6%	4%	3,3%	3%	2,3%	2%	1,8%
23h	5%	3%	2,6%	2%	1,5%	1,3%	1,1%
25h	2,3%	2%	1,6%	1,3%	1,1%	1%	0,9%
THDi	**100%**	**72%**	**60%**	**55%**	**44%**	**39%**	**35%**

опасности прекрасно описан в материалах [3,4,6], где в количественном выражении представлен рост нагрузочных потерь в трансформаторах в зависимости от содержания гармоник в токе нагрузки:

a) Коэффициент дополнительных потерь от роста действующего значения тока:

$$F_i^2 = \sum_1^h \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 = \left(\frac{I_{N_{RMS}}}{I_1}\right)^2 \qquad (2),$$

где:
I_h – значение тока h-ой гармоники ряда,
I_1 – действующее значение основной гармоники
h – номер гармоники

b) коэффициент дополнительных потерь в обмотках (K-factor):

$$F_w = \sum_1^h \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^2 \qquad (3)$$

c) коэффициент дополнительных потерь в соединениях и в элементах конструкции:

$$F_p = F_k = \sum_1^h \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^{0,8} \qquad (4)$$

Общие нагрузочные потери в трансформаторе P_C, при протекании в обмотках искаженного тока составляют:

$$P_C = P_p \times F_i^2 + P_w \times F_w + P_{dk} \times F_k + \\ + P_{do} \times F_p \quad (5),$$

Таблица 3.Влияние искажения тока на дополнительные потери в магнитных элементах.

Входная цепь	Импеданс 1%	Импеданс 5%	**Фильтр HF**
THDi	**72%**	**35%**	**5%**
F_i^2	1,51	1,12	**1,01**
F_w	21,5	5,42	**1,42**
$F_p = F_k$	3,14	1,49	**1,03**

где:
P_p– основные потери, P_w – дополнительные потери в обмотках, P_{dk} – дополнительные потери в элементах конструкции, P_{do} – дополнительные потери в соединениях и в элементах конструкции.

Приведенные выше уравнения применимы также для дросселей. Следует, однако, учесть еще одну очень существенную составляющую дополнительных потерь: от потока рассеивания через воздушный зазор P_{Ff} (Fringingflux), описанной в разделе 6 настоящей статьи.

Слишком большое искажение тока приводит к тому, что дополнительные потери в магнитных элементах могут возрасти даже в несколько раз (*Таблица 3*). Это означает повышенное выделение тепла и рост рабочей температуры изделий, а в результате - сокращение срока их службы или даже выход из строя. Поэтому, для взаимодействия с искаженными токами, размеры магнитных элементов должны быть пересмотрены в зависимости от степени искажения тока, или их номинальная мощность должна быть ограничена. Ориентировочный перерасчет мощности можно произвести на основании значения K-factor (*Таб. 4*), который оказывает наибольшее значение с точки зрения дополнительных потерь. Однако, следует помнить, что таким образом мы не ограничиваем ни основных, ни дополнительных потерь мощности, а только предотвращаем их негативный эффект за счет увеличения массогабаритных показателей и стоимости устройства. Только ограничение гармоник тока до соответствующего низкого уровня (*Таб. 1*) позволит избежать увеличения размеров магнитных элементов и улучшит эффективность всей системы.

Таблица 4. Степень изменения номинальной мощности в зависимости от коэффициента K-factor[3]

K-factor (F_w)	K4	K9	K13	K20	K30	K40	K50
Sn x	0,886	0,761	0,692	0,606	0,524	0,469	0,428

5. Фильтры гармоник

Существует много методов исключения и ограничения гармоник во входящем токе инверторов. Однако, начиная с простых сетевых дросселей и заканчивая сложными активными устройствами, каждая из техник фильтрации может иметь различную стоимость, потери мощности и разную эффективность погашения гармоник. К устройствам, которые характеризуются очень высокой эффективностью погашения гармоник и очень высокой функциональностью, с уверенностью можно отнести пассивные фильтры ElhandHF. Эти фильтры появились благодаря интегрированному соединению линейной индуктивности и параллельной резонансной ветви (*Рис. 2*). Оптимальная структура фильтра и соответствующая подборка отдельных параметров его элементов, позволяет эффективно ограничить гармоники, источниками которых являются выпрямители преобразователей частоты, независимо от структуры и параметров сети электроснабжения в месте их подключения. Параллельная ветвь фильтра – это электрическая цепь, обладающая низким результирующим импедансом для определенной гармонической составляющей. Линейная индуктивность улучшает эффективность фильтрации и ограничивает влияние помех и угроз, возникающих со стороны сети (перенапряжения, перекос фаз). Коэффициент ослабления фильтра подобран таким образом, что даже в случае низкого импеданса сети нет необходимости применения дополнительных сетевых дросселей. Фильтр ограничивает значение коэффициента THDi на входе выпрямителя преобразователя частоты до уровня менее 5% при полной нагрузке. Потери мощности в фильтре не превышают 1% относительно мощности приводной системы. Эти фильтры превосходят другие пассивные устройства фильтрации не только с точки зрения очень высокой эффективности, но и с точки зрения поддержания низкого коэффициента THDi в широком диапазоне изменений нагрузки, а также при несимметричности напряжения питания. Высокая эффективность и постоянство параметров, вне зависимости от нагрузки, получены благодаря уникальной конструкции многощелевых сердечников, которая позволила создать целую семью высокоэффективных фильтров гармоник ElhandHF.

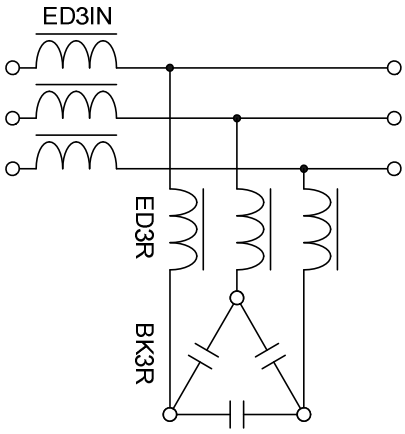

Рис. 2. Схема фильтра гармоник ElhandHF

Рис. 3. Входной фильтр гармоник ElhandHF (400кВт)

6. Многощелевые сердечники

Протекание переменного тока в обмотках магнитных элементов приводит к формированию переменного магнитного потока. Основная часть потока замыкается в магнитном сердечнике, а оставшаяся часть – в виде потоков рассеивания замыкается через обмотки и другие элементы конструкции, приводя к дополнительным потерям мощности. Определение этих потерь является сложной задачей, которая еще больше усложняется в случае, если мы имеем дело с прерыванием сердечника в виде немагнитного зазора. Вблизи зазора образуется очень большое рассеивание магнитного потока. (*Рис. 4*), а распределение поля рассеивания зависит, прежде всего, от размера зазора и плотности основного потока (*Рис. 5*). Суммарный воздушный зазор в больших дросселях или фильтрах достигает нескольких, а в некоторых случаях даже более десяти сантиметров. Все зависит от требуемой линейности магнитной характеристики. Для резонансных фильтров этот параметр имеет ключевое значение, так как только неизменная величина индуктивности во всем диапазоне токовой нагрузки позволяет поддерживать постоянную резонансную частоту, а значит – определенное подавление гармоник. Линейность индуктивности в широком диапазоне токов связана с необходимостью введения большого результирующего немагнитного зазора. А это значительно усложняет проектирование оптимального дросселя с ограниченными потерями мощности, ограниченным шумом и концентрацией внешнего магнитного поля. Большие зазоры ведут к увеличению потерь мощности вблизи зазоров, как в сердечнике, так и в обмотках P_{Ff}. Искаженный ток, а, следовательно, искаженный магнитный поток, только усугубляют неблагоприятные явления. В некоторых случаях потери от рассеивания потока вблизи зазора могут значительно превышать основные потери и привести к локальному перегреву устройства. Точный расчет потерь P_{Ff} и анализ распределения магнитного поля в сердечнике и на обмотках требует применения сложных методов расчета, и являются очень затратными по времени. Но только такой скрупулезный подход к этому вопросу позволил создать уникальную технологию производства многощелевых сердечников ElhandCutCore™ (*Рис. 6.*). В этих сердечниках путем соответствующего расположения и точного определения ширины отдельных немагнитных зазоров достигается равномерное распределение индукций и ограничение до минимума нежелательных потерь мощности P_{Ff}.

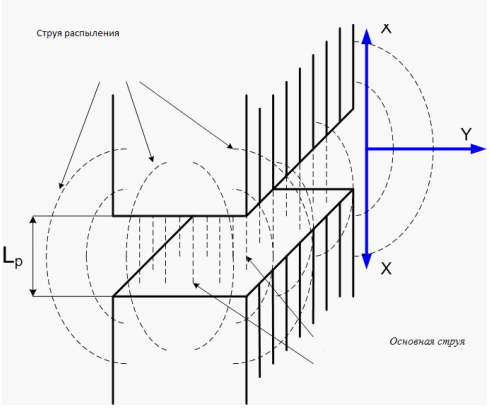

Рис.4. Основной магнитный поток и рассеивание вблизи немагнитного зазора

7. Исследование эффективности гашения фильтров гармоник

Авторы статьи в течение многих лет ведут работу по усовершенствованию и оптимизации индуктивных элементов. Результатом этих усилий является, среди прочего, разработанное семейство фильтров гармоник с высокой эффективностью на базе многощелевых сердечников. Одним из наиболее важных вопросов при подборе и проектировании индуктивных элементов, взаимодействующих с преобразователями, является правильное определение формы входного тока, поскольку, как было показано ранее, он имеет существенное значение для тепловых условий работы и исправности магнитного элемента. Поэтому, предметом исследований было определение уровня эмиссии гармоник инверторной системы с 6- пульсным входом (160кВт, 400В, 50Гц) для разных эффективных импедансов входной цепи:

a) без сетевого дросселя (эффективный импеданс сети в месте соединения для исследуемого инвертора составлял примерно 1%),
b) с сетевым дросселем с импедансом 4% (суммарный импеданс с учетом импеданса

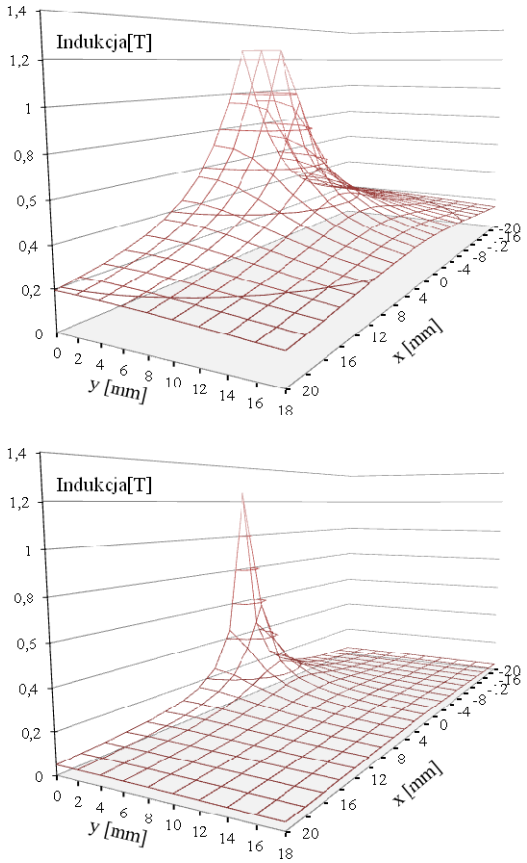

Рис.5. Плотность потока рассеивания вблизи зазора для разной ширины немагнитного зазора: a) зазор 10[мм], b) зазор 2,5[мм]

Рис.6. Многощелевой сердечник по технологии ElhandCutCore™

сети составил 5%), с) с фильтром гармоник типа ElhandHF. Исследования и анализ содержания гармоник в протекании входного тока инвертора для каждого из приведенных выше случаев (Рис. 8) показали, что полученные результаты измерений совпадают со значениями гармоник, определенными в результате математического моделирования (Таб. 2)

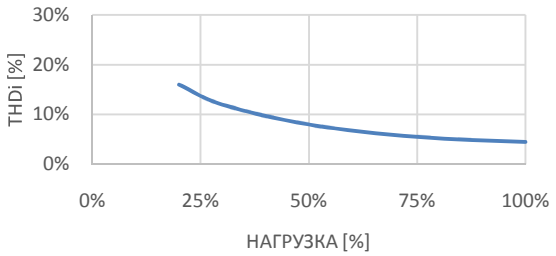

Рис. 7. THDi входного тока для фильтра 160 кВт в функции нагрузки

8. Итоги

Негативные последствия и затраты, связанные с появлением высших гармоник входного тока инверторов безусловно является проблемой пользователей преобразовательных приводных систем. Необходимость пересмотра размеров магнитных элементов, взаимодействующих с преобразователем, дополнительные потери мощности, помехи и растущие требования к эмиссии гармоник в месте соединения вынуждают искать решения, которые не только исключат последствия возникновения гармоник, но и эффективно ограничат их в месте возникновения. Решению о выборе соответствующего варианта должен предшествовать тщательный анализ всей приводной системы, как с точки зрения электромагнитной совместимости, так и эффективности всех устройств. Руководствование только критериями закупочной стоимости очень часто приводит к получению дополнительных потерь активной мощности, а мнимая экономия с лихвой перейдет энергоснабжающей организации в виде оплаты за активную энергию. Поэтому рациональное распоряжение электроэнергией - это все чаще выбор устройств с наибольшей эффективностью, так как ничто настолько не убеждает пользователя, как общие и реальные затраты, которые он понесет используя иверторную приводную систему.

9. Литература

[1]. Я. Пшибыльски [J. Przybylski],З. Шульц [Z. Szulc] «Влияние структуры исходной цепи преобразователя частоты на энергетическую эффективность приводной системы» Электрические машины–Журналы проблем №-73/2005.

[2]. А. Позовски [A. Pozowski]«Новые направления защиты сетей питания от высших гармоник тока и напряжения при питании от преобразователей частоты». Электрические машины – Журналы проблем №-79/2008.

[3]. П. Вольник [P. Wolnik], Я. Собота [J. Sobota] «Влияние возникновения высших гармоник тока нагрузки распределительного трансформатора на способ его эксплуатации». Конференция – «Управление эксплуатацией трансформаторов» Висла - Яворник 2012г.

[4].Я. Рак[J. Rak], М. Гала [M. Gała], КЯгела [K. Jagieła], М. Кэмпиньски [M. Kępiński] «Анализ нагрузки и потерь в преобразовательных трансформаторах приводных систем» Электрические машины – Журналы проблем №-89/2011.

[5]. Алекс Ванден Босше [Alex Van den Bossche], Венчислав Чеков Вальчев [Vencislav Cekov Valchev] „Improved calculation of Winding losses in

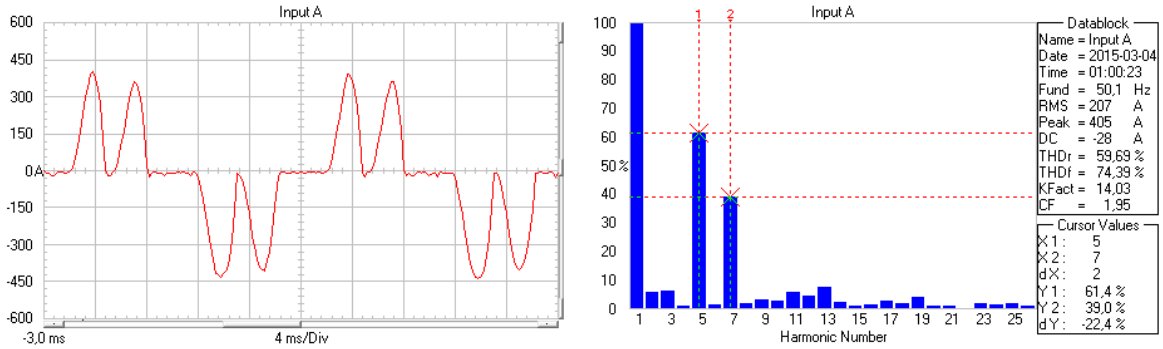

Рис. 8.a. Осциллограммы входного тока преобразователя при эффективном импедансе 1%

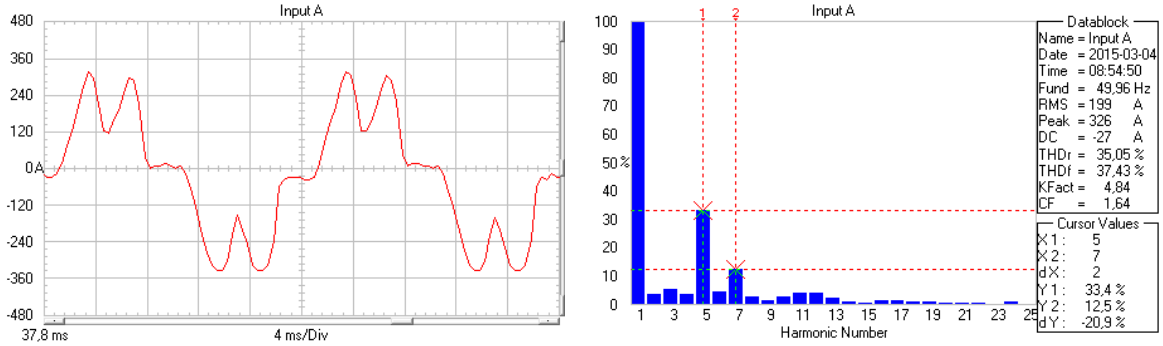

Рис. 8.b. Осциллограммы входного тока преобразователя при эффективном импедансе 5%

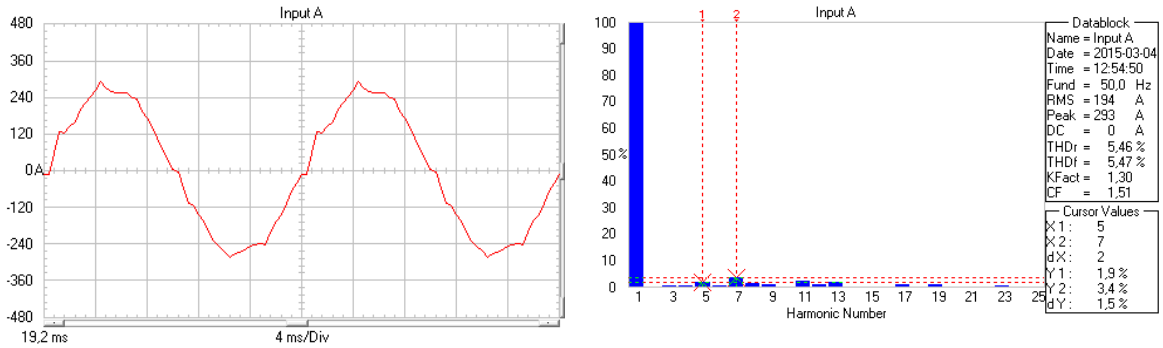

Рис. 8.c. Осциллограммы входного тока преобразователя с фильтром гармоник

gapped inductors" Journal Of Applied Physics 97.
[6]. PN-EN 61378-1:2000 „Преобразовательные трансформаторы. Трансформаторы для промышленного применения»
[7]. М. Лукевич [M. Łukiewski], Я. Чорник [J. Czornik] «Многощелевые дроссели по технологии ElhandCutCore»
[8]. Собственные материалы и разработки компании ElhandTransformatorySp. zo.o.,Люблинец

j.czornik@elhand.pl
магистр, инж. Мирослав Лукевски [Mirosław Łukiewski]
тел. +48 34 3473131
m.lukiewski@elhand.pl
Elhand Transformatory Sp. z o.o.
ул. Клёнова 60, 42-700 Люблинец

Авторы:

магистр, инж. Ярослав Чорник
[JarosławCzornik]
тел. +48 34 3473132