

Влияние фильтров гармоник на улучшение параметров электрической энергии в точке подключения

Резюме. В настоящее время наиболее распространенным решением в приводных системах являются преобразователи с 6-импульсным входом. В статье показана зависимость входного тока 6-импульсного преобразователя от параметров точки подключения и последовательных реактивных сопротивлений. 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 системах, преобразовательные приводные системы.

Введение

Мировой рынок преобразовательных приводных систем является одним из самых динамично развивающихся. В настоящее время более половины электроэнергии, потребляемой промышленностью, приходится на приводные системы. В настоящее время все чаще фактором, определяющим приобретение этих устройств, является тщательный экономический анализ, охватывающий реальное время окупаемости инвестиций, а также анализ влияния всей системы на сеть электроснабжения и других потребителей [1]. Современные решения приводных систем не лишены недостатков, поэтому они постоянно находятся в процессе усовершенствования. 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 материалозкономностью данного 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 по экодизайну). 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.

Влияние параметров точки подключения на деформацию входного тока преобразователя

Точка подключения (*PCC* - англ. Point of Common Coupling, то есть точка общего соединения) может рассматриваться как источник синусоидального напряжения или как электроэнергетическая сеть с определенным внутренним импедансом, имеющим реактивный характер. Определяющим фактором, напрямую связывающим зависимость входного тока подключенного преобразователя от параметров в точке подключения, является коэффициент короткого замыкания сети *SCR* (сокращение от англ. short circuit ratio):

$$(1) \quad SCR = \frac{I_{sc}}{I_L}$$

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

Коэффициент короткого замыкания сети определяет жесткость точки подключения по отношению к запитываемым потребителям. Вообще говоря, чем выше отношение мощности короткого замыкания в точке подключения к мощности запитываемого

преобразователя, тем более жесткой является сеть, а ток, забираемый преобразователем из сети, более деформирован, с более высоким действующим значением. 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 деформации прохождения тока является повышение импеданса петли короткого замыкания приводной системы. Это может быть сделано в определенной степени путем включения дополнительных последовательных реактивных сопротивлений на входной стороне преобразователя (например: преобразовательный трансформатор с соответствующим напряжением короткого замыкания или сетевой дроссель с определенной индуктивностью). Влияние дополнительных реактивных сопротивлений в токовой линии питания преобразователя показано на рисунке 1.

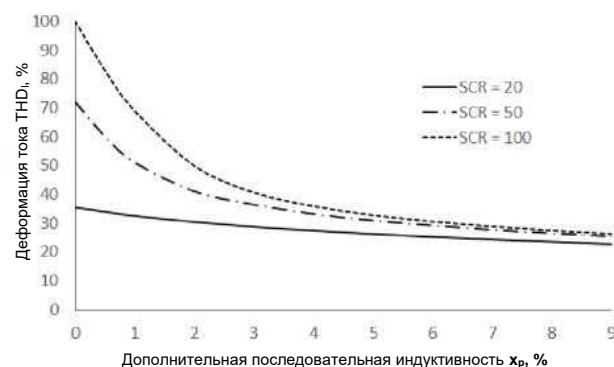


Рис. 1. Влияние дополнительного последовательного реактивного сопротивления на деформацию входного тока преобразователя [1].

Эта характеристика показывает зависимость деформации входного тока преобразователя, имеющего номинальную мощность 250 кВт, от мощности короткого замыкания в точке подключения и дополнительных последовательных реактивных сопротивлений. Однако эта зависимость носит универсальный характер. Были рассмотрены три случая питающих трансформаторов с напряжением короткого замыкания $u_x=6\%$, различающиеся номинальной мощностью: $Str = 315$ кВА ($SCR = 20$), $Str = 1000$ кВА ($SCR = 50$), $Str = 2500$ кВА ($SCR = 100$). Анализ показывает, что преобразовательный трансформатор и последовательные дроссели в некоторой степени снижают воздействие преобразователя на сеть и других потребителей, что является лишь необходимым минимумом. Даже введение в последовательность 5-6% дополнительного реактивного сопротивления снижает

общий коэффициент деформации тока $THDi$ только до 30-35%. В то же время использование более высоких последовательных импедансов не практикуется из-за высоких падений напряжения и, как следствие, снижение мощности приводной системы [2]. Пассивные фильтры гармоник являются более эффективным решением для ограничения гармоник тока преобразователя. Разница во входном токе преобразовательной системы без фильтра и с фильтром показана в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость действующих значений токов 6-импульсного преобразователя мощностью 250 кВт от параметра SCR в точке подключения.

Параметры ПСС		THDi %	I _{rms} , A	I _h (RMS), A				
SCR	Фильтр			1 час	5 часов	7 часов	11 час	13 часов
20	Нет	35,4	375	353	116,6	34,7	22,8	11,6
	Да	4,9	354	353	8,9	12,3	7,0	2,9
50	Нет	74,2	459	369	232,1	138,9	25,6	26,3
	Да	5,6	356	355	10,4	14,1	7,7	3,1
100	Нет	99,9	541	383	295,0	222,7	82,9	37,1
	Да	5,8	357	356	10,9	14,7	7,9	3,2

В системе с пассивным фильтром гармоник, независимо от параметров короткого замыкания в точке подключения, было получено $thDi$ в пределах 5-6%, и, таким образом, меньшее действующее значение входного тока преобразователя.

Влияние деформации прохождения тока на работу пассивных магнитных элементов

Поток тока, деформируемого магнитными элементами, отрицательно влияет на их работу, вызывая количественное увеличение выделяемых потерь мощности. В зависимости от содержания гармоник в спектре тока можно приблизительно вычислить эти потери в пассивных магнитных элементах, определив коэффициенты дополнительных потерь и суммарные потери [3, 4, 5]:

а) коэффициент дополнительных потерь от увеличения действующего значения тока

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

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

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

$$(3) \quad F_w = \sum_{h=1}^n \left(\frac{i_h}{I_1}\right)^2 h^2$$

в) коэффициент потерь на вихревые токи в соединениях и конструктивных деталях (англ. stray losses — потери на рассеяние):

$$(4) \quad F_p = F_k = \sum_{h=1}^n \left(\frac{i_h}{I_1}\right)^2 h^{0,8}$$

Суммарные потери нагрузки в трансформаторе P_c вследствие потока в обмотках деформированного тока составляют:

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

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

В случае дросселей суммарные потери P_c необходимо дополнить составляющей дополнительных потерь P_{ff} (англ. fringing flux — краевой поток), которая представляет собой потери в обмотке, связанные с

потоком рассеяния вокруг щелей. Значение этой составляющей можно ограничить, используя многощелевой сердечник или используя на месте воздушного зазора магнитный материал с очень низкой проницаемостью μ_r . С другой стороны, основные потери в сердечнике дросселя необходимо увеличить на потери P_g в щели, которые являются зависимостью [6]:

$$(6) \quad P_g = K_g \frac{n_g^2 g w}{\rho} f B^2$$

где: K_g — эмпирический коэффициент, зависящий от конструкции сердечника, n_g — количество воздушных щелей, g — длина щелей, w — ширина полосы, ρ — удельное электрическое сопротивление материала сердечника, f — частота, B — амплитуда индукции.

Деформация тока нагрузки приводит к тому, что дополнительные потери в магнитных элементах могут возрасти даже в несколько раз (табл. 2). Вследствие повышенного тепловыделения и непосредственного повышения температуры срок службы устройств сокращается, в экстремальных случаях вызывая их повреждение. В результате этого магнитные элементы для взаимодействия с деформированными токами должны быть термически превышены по размерам в зависимости от степени деформации тока (пониженная индукция в сердечнике, увеличенное сечение обмоточного материала, использование переплетов обмотки и т.д.), либо их номинальная мощность должна быть ограничена.

Таблица 2. Влияние деформации тока на дополнительные потери в магнитных элементах на примере преобразователя мощностью 250 кВт.

	SCR= 100	SCR= 50	SCR= 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

Оценочный номинал мощности можно рассчитать на основе К-фактора (рис. 2), который выражается в сумме последовательных квадратов произведения действующего значения и порядка гармоники. Однако следует подчеркнуть, что этим способом мы не ограничим 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.

Методы устранения и допустимые уровни эмиссии гармоник тока

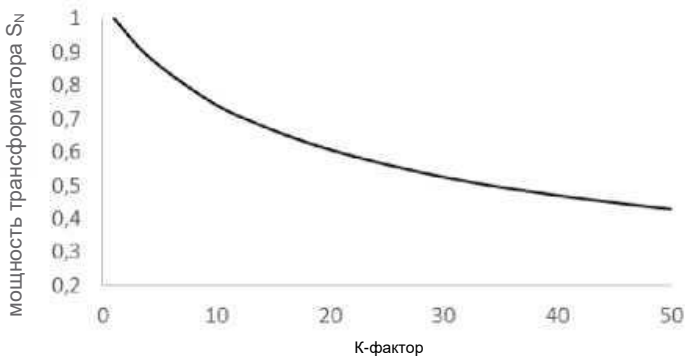


Рис. 2. Степень повышения номинальной мощности трансформатора в зависимости от коэффициента К-фактор [1].

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, различными затратами на приобретение и эксплуатацию (табл. 3).

Дроссели переменного и постоянного напряжения являются самым дешевым методом ограничения гармоник в токе питания, а, следовательно, и среднеквадратического значения этого тока. К сожалению, в настоящее время это недостаточный минимум, который не соответствует действующим стандартам.

Таблица 3. 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

В многоимпульсных системах, благодаря фазовым сдвигам между вторичными обмотками трансформатора существует возможность устранения отдельных гармоник (в 12-импульсной системе устраняем 5 и 7 гармоники, а в 18-импульсной системе — дополнительно 11 и 13). Основным недостатком многоимпульсных систем является их восприимчивость к асимметрии нагрузки и дисбаланс или деформация напряжения питания. Тогда невозможно эффективно уменьшить 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.

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 *THDI* тока во всем диапазоне нагрузки, 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 реге в токе (EN 61000-3-2, EN 61000-3-12) [7]. Однако следует помнить, что искажение напряжения вызывается, собственно говоря, гармониками в токе, генерируемом нелинейными потребителями. 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 [8]. Это стандарт, охватывающий все сети, уровни напряжений и токов в точке подключения (табл. 4, табл. 5). Он также различает требования допустимого *THD* тока и отдельных гармоник в зависимости от жесткости сети и мощности, установленной в точке подключения.

Таблица 4. Допустимые пределы деформации гармоник тока для всех устройств в точке подключения в зависимости от *Isc/Il* согласно IEEE 519-2014

<i>Isc/Il</i>	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < 50$	<i>THD_i</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 5. Допустимые пределы гармоник напряжения в точке подключения согласно IEEE 519-2014

Напряжение в точке PCC	Индивидуальные гармоники	<i>THDu</i>
$U \leq 1$ 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%

Влияние фильтров гармоник на эффективность и надежность приводной системы

Эффективность электрической машины — это отношение мощности, отдаваемой данной машиной (*P_{out}*), к мощности, потребляемой ею (*P_{in}*). Это позволяет определить суммарные потери машины. Аналогично и в случае определения эффективности и потерь преобразовательных приводных систем. Однако здесь проблема усложняется тем, что 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:

$$(7) \quad \eta_{\text{Drive System}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + \Delta P_{\text{Total Losses}}}$$

где: ΔP_{Total} — сумма потерь составляющих приводной системы.

Это равняется произведению эффективностей (коэффициентов полезного действия) каждого

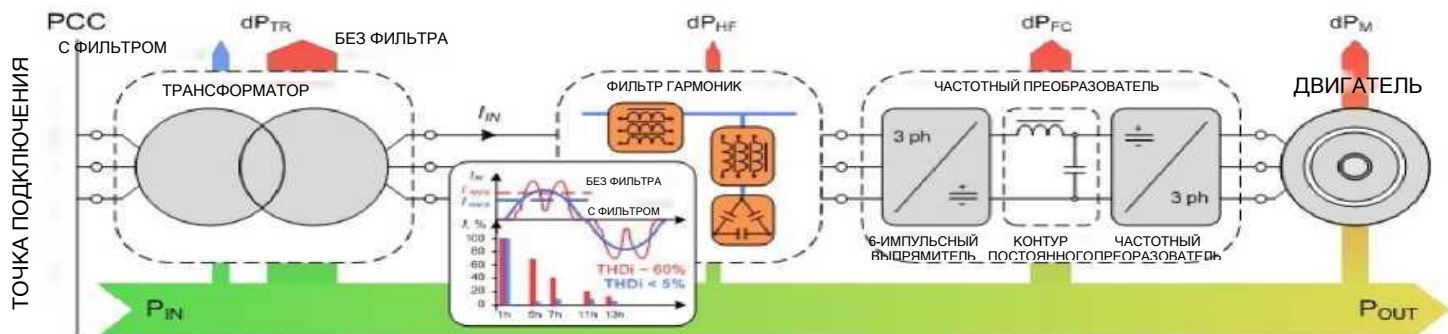


Рис. 3. Распределение потерь мощности в типичной преобразовательной приводной системе с фильтром гармоник и без него [9].

образом, к гармоникам напряжения в точке подключения (EN 50160, EN 61000-2-2, EN 61000-2-4) и реге в токе (EN 61000-3-2,

отдельного составляющего элемента приводной системы, начиная с точки подключения (PCC):

$$(8) \quad \eta_{System}^{Drive} = \eta_{Tr} \cdot \eta_{HF} \cdot \eta_{FC} \cdot \eta_M$$

Однако на практике вопрос эффективности системы преобразовательного привода часто рассматривается некорректно, без учета влияния преобразователя на трансформатор, сеть и других потребителей. Это снижает качество питания и энергоэффективность всей системы. Во избежание этого, каждый преобразователь должен быть отделен и оснащен устройством, ограничивающим эмиссию гармоник в питающую сеть.

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 (таблица 3). Эффективность фильтрации пассивных фильтров гармоник приближена 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. Становятся стандартом компактные многодроссельные решения, выполненные на общем ферромагнитном сердечнике (рис. 4) [9].

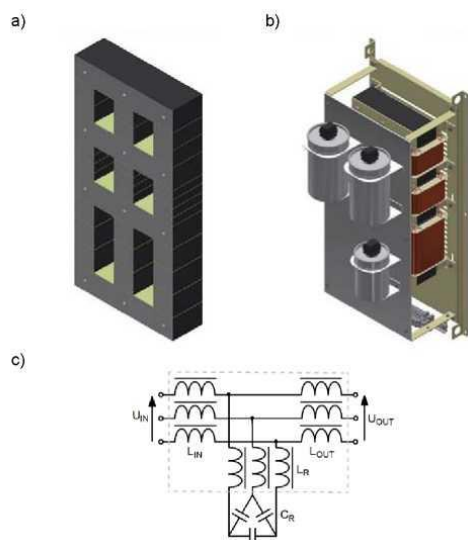


Рис. 4. Фильтр гармоник EF3N мощностью 55 кВт: а) строение многодроссельного сердечника с общими хомутами, б) компактная конструкция фильтра гармоник, в) принципиальная схема фильтра [9].

Конструкция общего магнитного сердечника (общие хомуты) в многодроссельном фильтре способствует уменьшению габаритов и веса устройства.

Индуктивности каждого отдельного дросселя позволяют соответствующим образом формировать характеристику подавления фильтра (рис. 5).

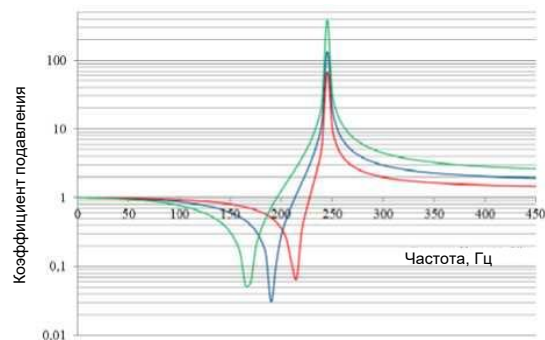


Рис. 5. Характеристики подавления многодроссельного фильтра [9].

Параллельный дроссель вместе с батареей конденсаторов образует резонансную ловушку на определенную гармонику. Последовательные дроссели (входные и выходные) формируют ширину полосы подавления и предварительно ограничивают гармоники высшего порядка. Индуктивности дросселей и емкости конденсаторов настроены таким образом, чтобы фильтр обеспечивал подавление в широком диапазоне нагрузок и соответствующее распределение токов в каждом отдельном дросселе (рис. 6).

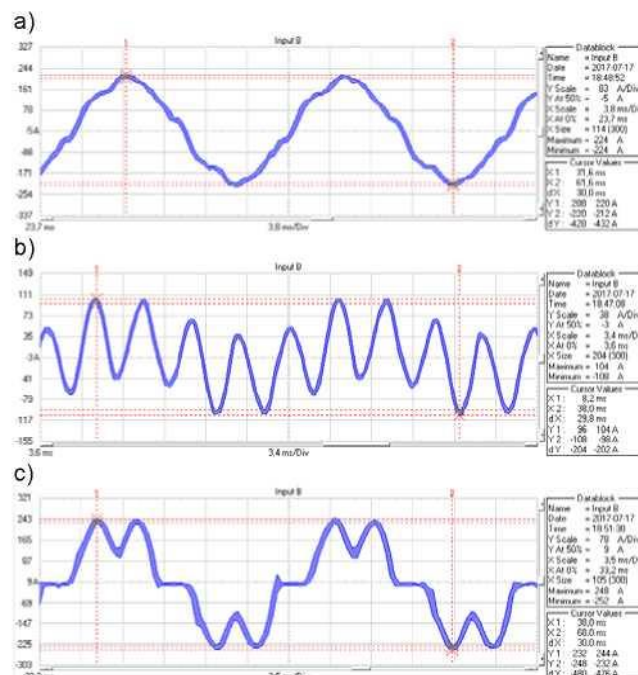


Рис. 6. Измерение распределения токов в трехдроссельном фильтре гармоник EF3N мощностью 110 кВт: а) во входном дросселе L_{IN}, б) в резонансном дросселе L_R, с) в выходном дросселе L_{OUT} [9].

Кроме того, важным параметром является потребление емкостного тока при отсутствии нагрузки или при малой нагрузке. Конструкция и оптимизация параметров многодроссельных фильтров позволяет снизить емкостной ток даже ниже $f_c < 15\% / n$ номинального тока, что особенно важно в случае генераторного питания, которое чаще всего встречается на судах или нефтяных месторождениях. Меньшие емкости в параллельной контуре фильтра заставляют использовать большую параллельную индуктивность для сохранения условия резонанса, а также большую входную индуктивность для улучшения характеристики подавления всего фильтра. Более высокие индуктивности означают большую массу и потери и, следовательно, меньшую эффективность фильтра. В случае многодроссельных фильтров на общем многоселевом сердечнике этот эффект не так заметен.

На основе типовых мощностей преобразовательных систем создаются соответствующие семейства фильтров гармоник, которые удовлетворяют требованиям подавления согласно стандарту IEC 61000-3-2, независимо от параметров точки подключения. На рисунке 7 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 менее 4,5%, тем самым устранив негативное влияние деформированного тока на других потребителей в сети.

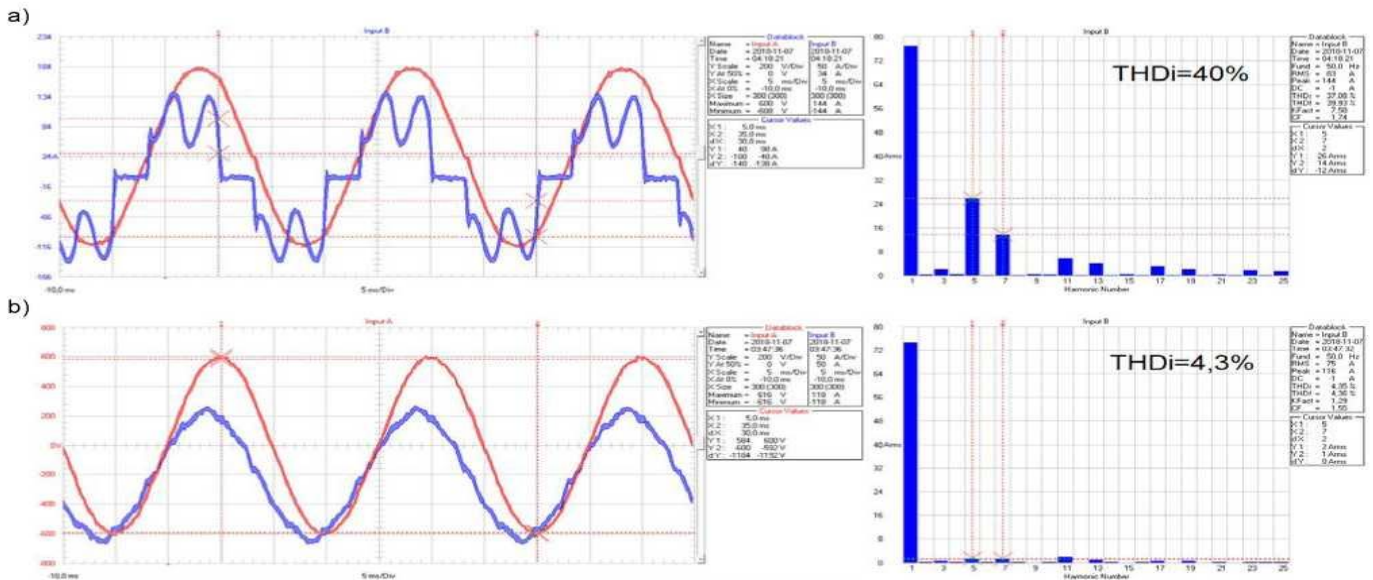


Рис. 7. Результаты измерения гармоник входного тока преобразователя 55 кВт в системе; а) без фильтра гармоник; б) с трехдроссельным фильтром на общих хомутах типа EF3H-55 кВт 380-415 В±10% T40F I9I.

Подведение итогов

Стоимость преобразовательной приводной системы представляет собой относительно небольшую сумму расходов, понесенных пользователем за свою работу в течение всего срока эксплуатации. Поэтому стоит присмотреться к эффективности всей системы в целом, его влиянию на сеть и другие приемники. В настоящее время можно найти ряд нормативных актов, 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.

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.

Авторы: маг. инж. Ярослав Чорник (Jarosław Czornik), ELHAND Transformatory Sp. z o.o., ul. Klonowa 60, 42-700 Lubliniec, адрес эл. почты: i.czornik@elhand.pl; докт. инж. Мацей Халтоф (Maciej Haltof), ELHAND Transformatory Sp. z o.o., ul. Klonowa 60, 42-700 Lubliniec, адрес эл. почты: m.haltof@elhand.pl.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Czornik J., Haltof M., Filtry harmoniczných w przekształtnikowych układach napędowych, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (Чорник Я., Халтоф М., Фильтры гармоник в приводных системах преобразователей, Рабочие документы факультета электротехники и автоматки Гданской

[2] Czornik J., Łukiewski M., Filtry harmoniczných gwarantującą 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* (2015), № 2, 51-58

[3] Wolnik P., Sobota J., Wpływ występowania wyższych harmoniczných w prądzie obciążenia transformatora dystrybucyjnego na sposób jego eksploatacji (Вольник П., Собота Я. Влияние присутствия высших гармоник в токе нагрузки распределительного трансформатора на способ его эксплуатации), *Konferencja - Zarządzanie eksploatacją transformatorów (Конференция - Управление эксплуатацией трансформаторов)*, Wiśła - Jawornik (2012), 99-107

[4] Rak J., Gała M., Jagieła K., Kępiński M., Analiza obciążenia i strat w transformatorach przekształtnikowych układów napędowych (Пак Я., Галя М., Ягеля К., Кемпиньски М., Анализ нагрузок и потерь в преобразовательных трансформаторах приводных систем), *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe (Электрические машины - Проблемные документы)*, (2011), № 89, 139-147

[5] PN-EN 61378-1:2000 „Transformatory przekształtnikowe (Преобразовательные трансформаторы). Transformatory do zastosowań przemysłowych” (Трансформаторы для промышленных применений).

[6] Ryłko M., Lyons B., Hayes J., Egan M., Revised magnetics performance factors and experimental comparison of high-flux materials for high-current DC-DC inductors (Пересмотренные коэффициенты магнитных характеристик и экспериментальное сравнение материалов с высокой плотностью потока для сильноточных катушек индуктивности постоянного и постоянного тока), *IEEE Trans. Power Electronics*, 26 (2011), n.8, 2112-2126

[7] Pozowski A., Nowe trendy ochrony sieci zasilających przed wyższymi harmonicznymi prądu i napięcia przy zasilaniu z przemienników częstotliwości (Позовски А., Новые тенденции в защите питающих сетей от высших гармоник тока и напряжения при питании от преобразователей частоты), *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe (Электрические машины - Проблемные документы)*, (2008), № 79, 57-62

[8] 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)

[9] ELHAND Transformatory Sp. z o.o., Materiały i opracowania własne, Lubliniec (2019) - ООО "ELHAND Transformatory", Собственные материалы и исследования, Люблинец (2019)



политехники), (2019), № 67, 33-38