

АВТОРЫ ТОМАС
Дж. ДИОНИЗ И ВИСУТ ЛОРХ

ИСКАЖЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬ- НОЙ ЭЛЕКТРИ- ЧЕСКОЙ СЕТИ

Анализ содержания
гармоник в
среднечастотном
сварочном агрегате
металлообрабатываю-
щих предприятий

СРЕДНЕЧАСТОТНЫЕ СВАРОЧНЫЕ АГРЕГАТЫ
металлообрабатывающих предприятий являются потенциальным источником высокого гармонического тока и вредного искажения напряжения в распределительных электрических сетях. Анализ содержания гармоник призван установить воздействие среднечастотного сварочного агрегата на работу металлообрабатывающих предприятий, распределительных электрических сетей и особенно на установленное в непосредственной близости производственное оборудование, оснащенное большим количеством электронных блоков управления.

Металлообрабатывающие предприятия производят сварочную сталь и решетки из нержавеющей стали, кованные алюминиевые изделия и решетки с прутьями, соединенными в виде ласточкина хвоста, а также алюминиевые настилы. План по расширению производства включает установку среднечастотного сварочного агрегата, обеспечивающего полную автоматизацию и высокоскоростную сварку решеток.

Описание проблемы

Проблема, как ее описывают на металлообрабатывающих предприятиях, состоит в возможном появлении избыточных гармонических искажений в среднечастотных сварочных агрегатах 12,47 кВ систем предприятия.

Предприятием было проведено предварительное исследование, по итогам которого сделано заключение, что среднечастотные сварочные агрегаты могут превышать допустимые критерии гармонического искажения. Указанные проблемы обусловили проведение анализа гармоник. Исследования гармоник и характеристик нагрузки на среднечастотные сварочные агрегаты обеспечивают производителя сварочного оборудования ценными данными, позволяющими внести необходимые изменения на этапе проектирования и добиться соответствия установленным на предприятии критериям.

Энергетическая система

На рисунке 1 показано, каким образом 138 кВ подстанция предприятия питается от 138 кВ сети высокого напряжения и понижает напряжение до 12,47 кВ с помощью 12 МВА, 138/12,47 кВ, 8,15% Z трансформатора. Несколько действующих 12,47 кВ воздушных распределительных сетей обеспечивают электроэнергией местных жителей и промышленных рабочих. Новая строящаяся 12,47 кВ воздушная распределительная сеть коллективного пользования является потребителем электроэнергии и оборудована множеством электронных блоков управления, также она питает электричеством среднечастотные сварочные агрегаты металлообрабатывающего предприятия.

Сеть коллективного пользования имеет протяженность примерно 1 милю от 12,47 кВ подстанции до металлообрабатывающего предприятия.

**ПРОДОЛЖИТЕЛЬН
ОСТЬ РЕЖЕКЦИИ,
НАЗЫВАЕМАЯ
ПЕРИОДОМ
КОММУТАЦИИ,
ЗАВИСИТ ОТ
ИНДУКЦИИ
ИСТОЧНИКА
ПРИВОДА И
ВЕЛИЧИНЫ ТОКА**

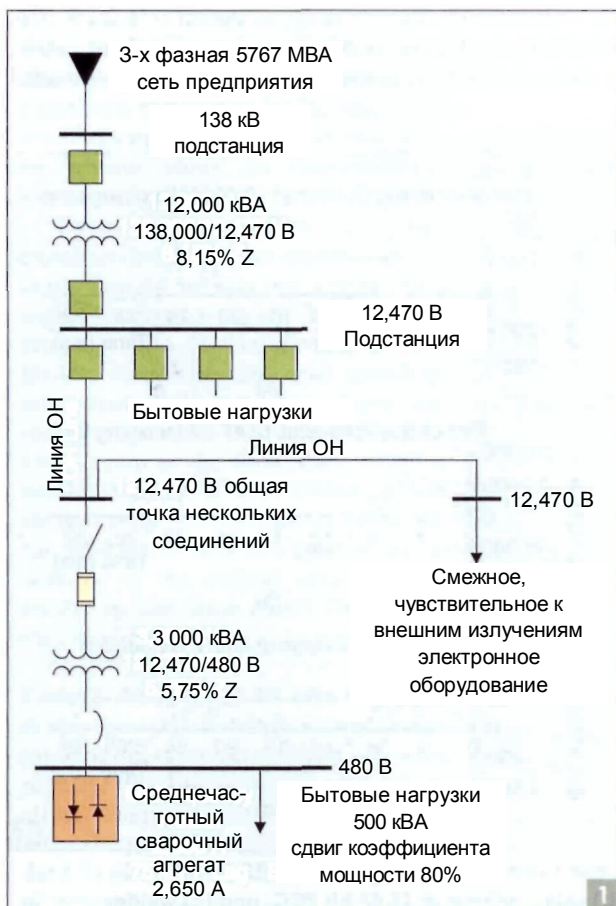
Новый трансформатор собственных нужд с номиналом 3000 кВА, 12,47/48 кВ и 5,75% Z питает среднечастотные сварочные агрегаты и бытовые потребители. Максимальная нагрузка на среднечастотные сварочные агрегаты составляет 180 кА при 11,2 В или 2,650 А при 480 В с коэффициентом электрической мощности 75%. Предположительно, нагрузка на бытовые потребители составляет примерно 500 кВА с коэффициентом электрической мощности 80%.

Среднечастотные сварочные агрегаты

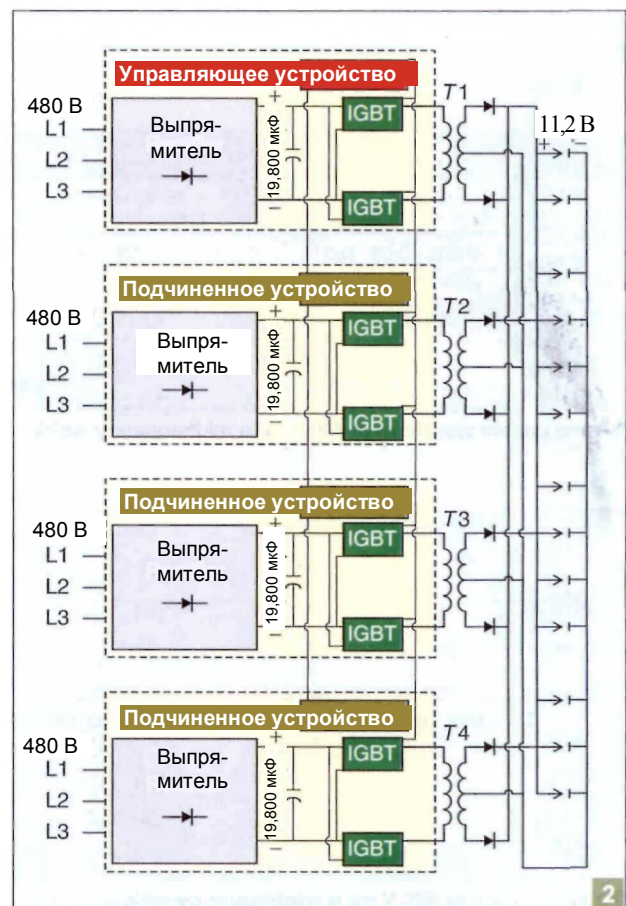
Сварочный агрегат состоит из четырех параллельно подключенных модулей (см. рисунок 2). Каждый модуль включает следующие компоненты: высокочастотный тракт с диодным выпрямителем, инвертор с биполярным транзистором с изолированным затвором (IGBT), рабочий или сварочный трансформатор, а также сварочные электроды. Диодный выпрямитель представляет собой

шестиимпульсный трехфазный 700 кВА 480 В выпрямитель. Инверторы с биполярным транзистором с изолированным затвором (IGBT) работают на частоте 1000 Гц при напряжении 600 В. Сварочные трансформаторы имеют номинал 700 кВА при напряжении 600/1 1,2 В. Выходы сварочных трансформаторов подключены параллельно и питают сварочные электроды.

Среднечастотный сварочный агрегат работает в автоматическом режиме. Решетки подаются на сварку автоматически, процесс сварки автоматически управляется программируемым логическим контроллером. Продолжительность сварки одного изделия, равная 6 сек (10 свариваемых изделий в минуту), позволяет:



Упрощенная однолинейная схема



Принципиальная электрическая схема среднечастотного сварочного оборудования

1) подавать решетки в зону сварки, 2) обеспечить среднее время сварки 1 сек (максимально 2 сек) и 3) передвинуть решетки и установить их в определенное положение для следующего этапа сварки.

Характеристики среднечастотного сварочного агрегата

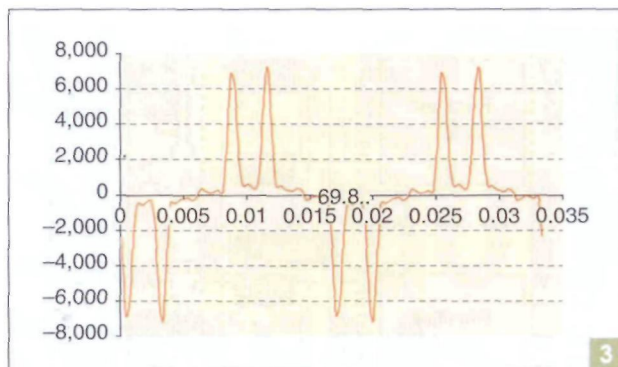
- максимальный сварочный ток 180 кА при напряжении 11,2 В или 2,650 А при напряжении 480 В с коэффициентом электрической мощности 75%
- на всем протяжении сварки сварочный ток поддерживается на указанном выше уровне
- время сварки составляет в среднем 1 сек (максимально 2 сек)
- примерно 10 свариваемых изделий в минуту
- резкое изменение сварочного тока от нулевой нагрузки до полной нагрузки (прямоугольная модуляция синусоидальной волны 60 Гц)
- диодный выпрямитель не имеет линейного реактора и характеризуется шестипульсным током.

Анализ содержания гармоник

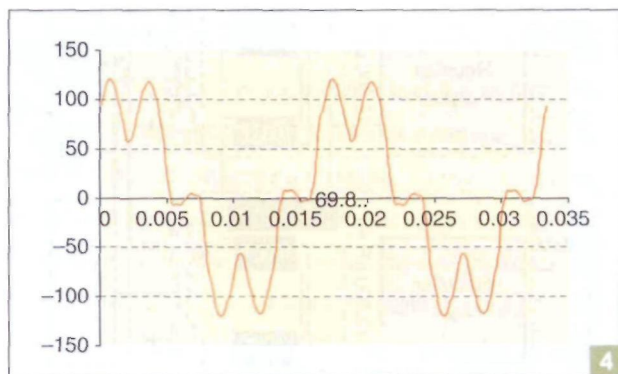
Описание исследования

На основе стандарта IEEE 519-1992 проведены три исследования, в ходе которых выполнен анализ содержания гармоник, а также анализ полученных результатов:

- *Исследование 1:* На среднечастотный сварочный агрегат подавалась нагрузка, согласно рисунку 3 общее гармоническое искажение (ГНД) тока нагрузки составило 110%.



Форма сигнала линейного тока среднечастотного сварочного агрегата при напряжении 480 В.



Линейный ток среднечастотного сварочного агрегата с 3% реактором при напряжении 480 В.

ПРОХОЖДЕНИЕ ЧЕРЕЗ СДВИНУТЫЙ НУЛЬ ВОЗДЕЙСТВУЕТ НА ЦЕПИ СИНХРОНИЗАЦИИ

Данные по току нагрузки представлены производителем среднечастотного сварочного агрегата.

■ *Исследование 2:* Аналогично исследованию 1; отличие состояло в применении 3% линейного реактора для уменьшения тока нагрузки до значения, показанного на рисунке 4 с ГНД 38,5%.

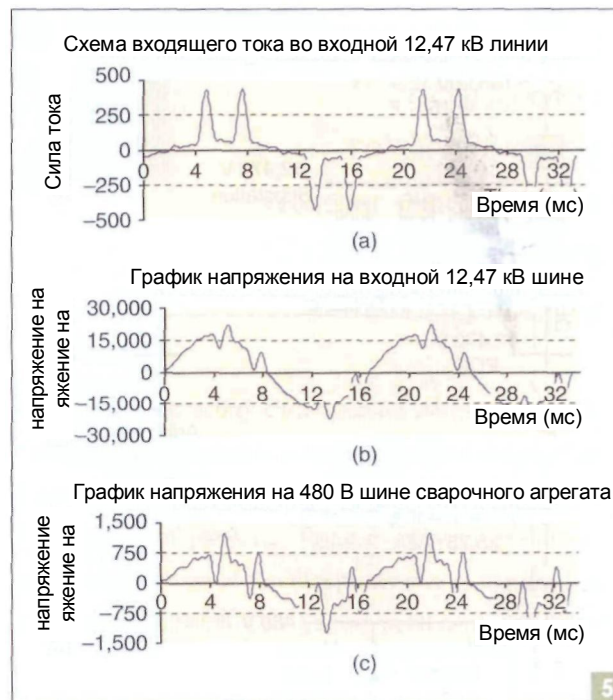
■ *Исследование 3:* Аналогично исследованию 2; отличие состояло в использовании фильтра пятой гармоники, установленного на 480 В шине.

Исследование 1: Шестипульсный диодный выпрямитель

На рисунке 3 показана форма сигнала тока нагрузки для шестипульсного сварочного агрегата (исследование 1). ГНД составляет 110% (при этом $I_2 = 100\%$, $I_5 = 69,84\%$, $I_7 = 65,37\%$, $I_{11} = 39,05\%$, $I_{13} = 34,75\%$, $I_{17} = 11,98\%$, $I_{19} = 8,18\%$, $I_{23} = 1,07\%$ и $I_{25} = 2,11\%$). Конечные формы сигнала для тока и напряжения в общей точке нескольких присоединений (РСС) 12,470 В, а также напряжение на сварочном агрегате показаны для исследования 1 соответственно на рисунках 5 (а)-(в).

Согласно исследованию 1, конструкция шестипульсного диодного выпрямителя без линейных реакторов или изолирующих трансформаторов обеспечивает THD (VTND) 20,99% для напряжения и ГНД 86,55% в 12,47 кВ РСС; оба значения превышают ограничения, установленные стандартом IEEE 519-1992 [1] (см. Таблицу 1). Данные характеристики недопустимы для потребителей электроэнергии, смежных с предприятием.

Форма сигнала напряжения 12,47 кВ проявляет сильную режекцию и является недопустимой (см. рисунок 5 (б)). При напряжении 480 В VTND 60,6% и ГНД 110% (согласно таблице 2) также недопустимы для бытовых нагрузок.



Результаты исследования 1: (а) ток предприятия в 12,47 кВ РСС, (б) напряжение предприятия в 12,47 кВ РСС и (в) напряжение сварочного агрегата на 480 В шине.

ТАБЛИЦА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ 1: ОЦЕНКА СОГЛАСНО СТАНДАРТУ IEEE 519.

lh	12,47 кВ РСС предприятия ⁵		ограничения стандарта IEEE 519 ³	Vh	12,47 кВ РСС предприятия ⁵		ограничения стандарта IEEE 519 ³
	ампер ¹	процентов ²			вольт ¹	процентов ²	
I1	126.61	100.00	Нет данных	V1	12.181	100.0	Нет данных
I5	69.62	54.99	4	V3	1,006.1	8.3	3
I7	65.11	51.43	4	V5	1,317.2	10.8	3
I11	38.88	30.71	2	V7	1,235.8	10.1	3
I13	34.60	27.33	2	V9	1,299.5	10.7	3
I17	11.93	9.42	1.5	V11	585.8	4.8	3
I19	8.14	6.43	1.5	V11	447.0	3.7	3
I23	1.07	0.85	0.6	V11	70.8	0.6	3
I25	2.10	1.66	0.6	V13	151.7	1.2	3
TDD ⁴	Нет данных	86.6	5	VTHD	Нет данных	21.0	5

¹ Гармонические токи, выраженные в амперах и напряжения в вольтах.
² Гармонические токи в процентах от максимального тока нагрузки, IL (частота основной гармоники). Гармонические напряжения в процентах от основной гармоники. **жирный шрифт** обозначает превышение ограничений.
³ Ограничения стандарта 519-1992, указанные в процентах.
⁴ TDD – суммарное требуемое искажение.
⁵ РСС – 12, 47 кВ шина предприятия.

Режекция формы сигнала 480 В проявляется очень ярко (см. рисунок 5 (в) и вызывает несколько прохождений через сдвинутый нуль. Прохождения через сдвинутый нуль создают помехи работе контроллеров, которые рассчитаны на частоту 60 Гц и учитывают прохождение через нуль при синхронизации; кроме того, прохождение через сдвинутый нуль могут негативно повлиять на последовательно подключенные двигатели и другие нагрузки.

Прохождение через сдвинутый нуль воздействует на цепи синхронизации. Цепи синхронизации учитывают прохождение через нуль относительно прохождение через нормальный нуль формы сигнала 60 Гц. В форме сигнала 60 Гц прохождение через нуль происходят каждые 8,33 мс. К примеру, сварочный агрегат выполняет сварку в 60 циклов. После начала сварки контроллер ведет отсчет 120 прохождений через нуль, затем останавливает сварку. Однако, отсчет прохождений через сдвинутый нуль, возникающих до прохождения через нормальный нуль, аналогичен, но происходит за более короткое время.

Исследование 2: Установка 3% линейного реактора

Линейный реактор (электрический реактор) проявляет трехфазную последовательную индуктивность на линейной стороне выпрямителя. Если линейный реактор устанавливается на всех выпрямителях, очень часто удается выполнить требования стандарта IEEE 519-1992, согласно которым 15-40% нагрузки системы должно приходиться на выпрямители, в зависимости от коэффициента жесткости линии и значения реактивного сопротивления линии. Для линейных реакторов характерно множество значений полного сопротивления в процентах, как правило, 1-1.5%, 3% и 5%.

ТАБЛИЦА 2. ОБОБЩЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ ГАРМОНИК.

Место установки шины	Параметр	Исследование	Исследование 2	Исследование 3
Предприятие, 138 кВ	V _{осн.гарм.} (В)	1 137,948	137,948	137,985
	V _{среднеkv.} (В)	137,949	137,948	137,985
	%VTHD	0.33%	0.08%	0.02%
12,47 кВ подстанция	%ITHD	86.55%	29.90%	3.92%
	V _{осн.гарм.} (В)	12,297	12,297	12,434
	V _{среднеkv.} (В)	12,408	12,303	12,435
12,47 кВ РСС	%VTHD	13.47%	3.13%	0.63%
	%ITHD	86.55%	29.90%	3.92%
	V _{осн.гарм.} (В)	12,181	12,181	12,391
480 В главная шина	V _{среднеkv.} (В)	12,446	12,195	12,393
	%VTHD	20.99%	4.88%	0.90%
	%ITHD	86.55%	29.90%	3.16%
Сварочный агрегат	V _{осн.гарм.} (В)	450.5	450.5	473.2
	V _{среднеkv.} (В)	527.0	455.0	473.4
	%VTHD	60.69%	14.11%	2.71%
	%ITHD	110.0%	37.98%	3.92%
	%ITHD	110.0%	37.98%	37.98%

ТАБЛИЦА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ 2: ОЦЕНКА СОГЛАСНО СТАНДАРТУ IEEE 519.

Ih	12,47 кВ PCC предприятия ⁵		ограничения стандарта IEEE 519 ³	Vh	12,47 кВ PCC предприятия ⁵		ограничения стандарта IEEE 519 ³
	ампер ¹	процентов ²			вольт ¹	процентов ²	
I1	126.61	100.00	Нет данных	V1	12181	100.0	Нет данных
I5	37.38	29.52	4	V3	540.2	4.4	3
I7	1.58	1.25	4	V5	32.0	0.3	3
I11	4.28	3.38	2	V7	136.1	1.1	3
I13	1.21	0.96	2	V9	45.2	0.4	3
I17	3.09	2.44	1.5	V11	151.6	1.2	3
I19	1.29	1.02	1.5	V11	71.0	0.6	3
I23	1.11	0.88	0.6	V11	73.4	0.6	3
I25	1.11	0.88	0.6	V13	79.8	0.7	3
TDD ⁴	Нет данных	29.7	5	VTND	Нет данных	4.8	5

Гармонические токи, выраженные в амперах и напряжения в вольтах.

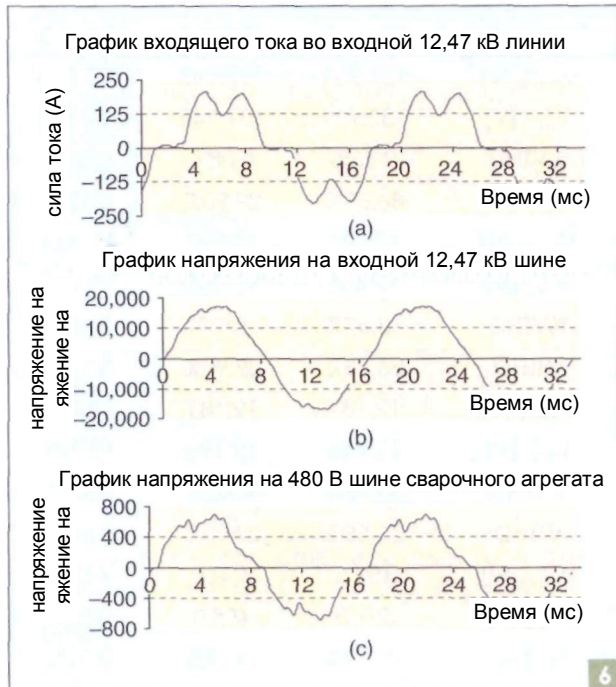
²Гармонические токи в процентах от максимального тока нагрузки, IL (частота основной гармоники). Гармонические напряжения в процентах от основной гармоники. **жирный шрифт** обозначает превышение ограничений.

³Ограничения стандарта 519-1992, указанные в процентах.

⁴TDD – суммарное требуемое искажение.

⁵PCC – 12, 47 кВ шина предприятия.

Для линейных реакторов со значением 1, 3 и 5% предполагаемое искажение гармонического тока отдельно взятого выпрямителя составляет в среднем 80%, 35-45% и 30-25% соответственно. Установка линейного реактора в значительной степени способствует снижению искажения тока.



Результаты исследования 2: (а) ток предприятия в 12,47 кВ PCC,

(б) напряжение предприятия в 12,47 кВ PCC и (в) напряжение сварочного агрегата на 480 В шине.

Преимущества линейных реакторов приведены далее в [2]. К преимуществам относятся низкая стоимость, средняя степень подавления гармоник напряжения и тока, множество значений полного сопротивления в процентах и усиленная защита выхода выпрямителя и его полупроводников от кратковременного повышения напряжения. Недостатками являются раздельный монтаж или больший по размеру корпус выпрямителя, а также периодическое несоответствие требованиям стандарта IEEE 519-1992 при снижении уровня гармоник.

На рисунке 4 показана форма колебаний тока нагрузки для шестимпульсного сварочного агрегата с 3% линейным реактором (исследование 2). ПГНД составляет 38% (при этом $I_1 = 100\%$, $I_5 = 37,5\%$, $I_7 = 1,59\%$, $I_{11} = 4,3\%$, $I_{13} = 1,21\%$, $I_{17} = 3,1\%$, $I_{19} = 1,3\%$, $I_{23} = 1,11\%$ и $I_{25} = 1,11\%$). Конечные формы сигнала для тока и напряжения при 12,470 В PCC, а также напряжение на сварочном агрегате показаны для исследования 2 соответственно на рисунках 6 (а)-(в).

Исследование 2 свидетельствует о том, что установка 3% линейного реактора в каждый из четырех модулей выпрямителя понижает VTND до 4,75% и ITND до 29,71% в 12,47 кВ PCC (согласно таблице 3). Хотя VTND соответствует установленному стандартом IEEE 519-1992 ограничению в 5%, ITND значительно превышает данное ограничение. Уровни гармонического тока и конечное искажение напряжения указывают на необходимость дальнейшего совершенствования конструкции.

Режекция форм сигналов 12,47 кВ и 480 В снижается, однако по прежнему прослеживается (рисунки 6 (б) и (в) соответственно). При напряжении 480 В значения VTND 14,11% и ITND 37,98% (согласно таблице 2) улучшены, но по-прежнему недопустимы для бытовых нагрузок.

Результаты исследования 2 показали, что установка последовательно включённой катушки индуктивности со значением 3% в цепь питания переменного тока и подключение к выпрямителю может уменьшить интенсивность режекции. Длительность режекции, называемая периодом коммутации, зависит от индукции источника привода и величины тока

Большая часть индуктивности источника приходится на понижающий трансформатор. Последовательно включенная катушка индуктивности увеличивает индуктивность источника. В исследовании 2 интенсивность режекции была уменьшена, однако искажение напряжения по-прежнему находилось на недопустимо высоком уровне. Более того, требуется фильтр для подавления гармоник.

Исследование 3: Установка фильтра пятой гармоники, настроенного на одну частоту

Настроенные на одну частоту фильтры гармоник включают подключенные последовательно реактор и емкостные элементы. Фильтры устанавливаются параллельно на линейной стороне выпрямителя или общей шине для подключения нескольких нагрузок к выпрямителю. Настроенный на одну частоту фильтр представляет собой короткозамкнутую цепь или очень низкое сопротивление на настроенной частоте. Для нагрузок выпрямителя фильтры настраиваются немного ниже пятой гармоники, являющейся основной составляющей гармонического искажения. Кроме того, фильтр поглощает некоторую часть тока седьмой гармоники.

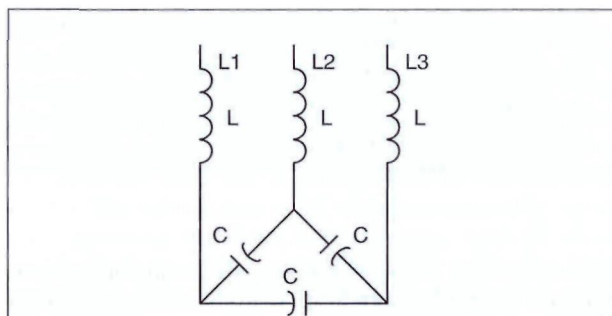
В исследовании 3 фильтр пятой гармоники, настроенный на значение 4.85 с характеристиками, указанными в таблице 4 и сконфигурированный согласно рисунку 7, устанавливается на шину сварочного агрегата 480 В.

ЛИНЕЙНЫЙ РЕАКТОР (ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕАКТОР) ПРОЯВЛЯЕТ ТРЕХФАЗНУЮ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНУЮ ИНДУКТИВНОСТЬ НА ЛИНЕЙНОЙ СТОРОНЕ ВЫПРЯМИТЕЛЯ.

Конечные формы сигнала для тока и напряжения в 12,470 В РСС, а также напряжение на сварочном агрегате показаны для исследования 3 соответственно на рисунках 8 (а)-(в).

Результаты исследования 3 показали, что использование фильтра пятой гармоники, настроенного на одну частоту, который устанавливается с 3% линейным реактором в каждом выпрямителе, понижает значение VTHD до 0,90%, а значение ITHD до 3,16% в 12,47 кВ РСС согласно ограничениям стандарта IEEE 519-1992 (см. таблицу 5).

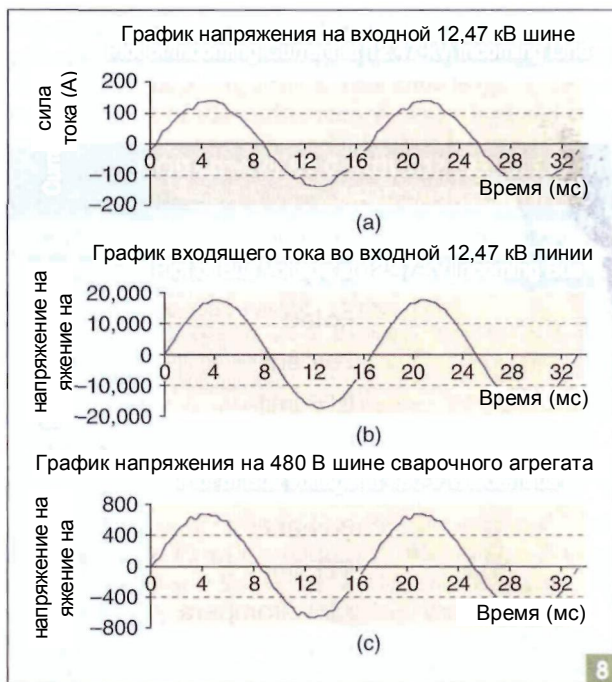
В данном случае, формы сигнала напряжения при 12,47 кВ и 480 В почти синусоидальны (см. рисунки 8 (б) и (в)). Интенсивная режекция и прохождение через сдвинутый нуль, наблюдаемые ранее, в данном случае отсутствуют. При максимальном значении тока вблизи максимального значения формы сигнала отмечается лишь незначительное искажение напряжения.



Конфигурация цепи с фильтром пятой гармоники, настроенным на одну частоту.

ТАБЛИЦА 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЛЬТРА ПЯТОЙ ГАРМОНИКИ, НАСТРОЕННОГО НА ОДНУ ЧАСТОТУ

Характеристики	Единица измерения
Порядок гармоники для фильтра с последовательным резонансным контуром	4.85
емкостное напряжение, кВ переменного тока	2,400 кВ
Емкостное напряжение (межфазное)	600 В
Конденсаторная ёмкость (микрофарад)	4,895 мкФ
Эффективное емкостное напряжение, кВ переменного тока (суммарное трехфазное)	1,536 кВ
Эффективное напряжение (межфазное)	480 В
Номинальное реактивное сопротивление (Ом на фазу)	0.00641 Ω
Реактивное сопротивление (миллигенри на фазу)	0.01 7 мГн
Реактивная сила тока	см. ниже
Основная гармоника	2,656 А
I5	2,125 А
I7	1,084 А
I11	439 А
I13	314 А
I17	184 А
I19	147 А
I23	100 А
I25	85 А



Результаты исследования 3: (а) ток предприятия в 12,47 кВ РСС, (б) напряжение предприятия в 12,47 кВ РСС и (в) напряжение сварочного агрегата на 480 В шине.

ТАБЛИЦА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ 3: ОЦЕНКА СОГЛАСНО СТАНДАРТУ IEEE 519.

Ih	12,47 кВ РСС предприятия ⁵		ограничения стандарта IEEE 519 ³	Vh	12,47 кВ РСС предприятия ⁵		ограничения стандарта IEEE 519 ³
	ампер ¹	процентов ²			вольт ¹	процентов ²	
I1	96.43	100.00	Нет данных	V1	12181	100.0	Нет данных
I5	1.67	1.73	4	V3	24.1	0.2	3
I7	0.49	0.51	4	V5	9.9	0.1	3
I11	1.79	1.86	2	V7	56.7	0.5	3
I13	0.52	0.54	2	V9	19.6	0.2	3
I17	1.39	1.44	1.5	V11	68.4	0.6	3
I19	0.59	0.61	1.5	V11	32.4	0.3	3
I23	0.51	0.53	0.6	V11	33.9	0.3	3
I25	0.51	0.53	0.6	V13	37.0	0.3	3
TDD ⁴	Нет данных	3.2	5	VTND	Нет данных	0.98	5

¹ Гармонические токи, выраженные в амперах и напряжения в вольтах.
² Гармонические токи в процентах от максимального тока нагрузки, IL (частота основной гармоники). Гармонические напряжения в процентах от основной гармоники. **жирный шрифт** обозначает превышение ограничений.
³ Ограничения стандарта 519-1992, указанные в процентах.
⁴ TDD – суммарное требуемое искажение.
⁵ РСС – 12, 47 кВ шина предприятия.

При напряжении 480 В допустимыми считались VTND, равное 2.71% и ITND, равное 3.92% (см.таблицу 2). Данные формы сигнала напряжения не представляют проблем для 480 В бытовых потребителей или нагрузок прочих потребителей, питаемых от сети напряжением 12,47 кВ.

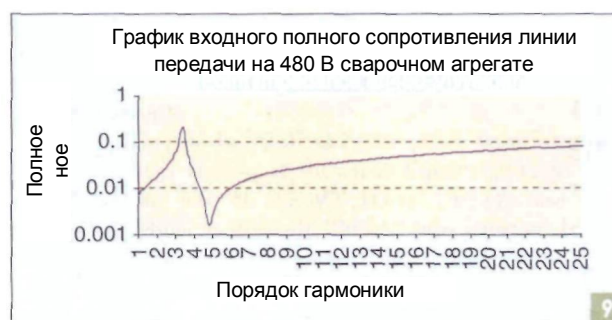
Более внимательно стоит отнестись к использованию настроенного фильтра гармоник, нежели к иным средствам уменьшения гармоник. Фильтр может испытать перегрузку, если не принять в расчет все источники гармоник в системе. При включении дополнительных нелинейных нагрузок без фильтрации фильтр может быть перегружен (для защиты, как правило, устанавливаются плавкие предохранители).

Для защиты от перегрузки конденсаторов в фильтре пятой гармоники гармоническим током среднечастотного сварочного агрегата согласно стандарту IEEE 18-1992 [3] была выполнена оценка напряжения на конденсаторе, а также оценка силы тока и полной мощности.

В таблице 6 приведены данные по напряжению на конденсаторе, силе тока и полной мощности фильтра пятой гармоники. Значения в таблице 6 получены в ходе анализа содержания гармоник. Напряжение на конденсаторе, сила тока и полная мощность конденсаторов соответствуют установленным ограничениям стандарта IEEE 18-1992. Между вычисленным значением и ограничением стандарта IEEE 18-1992 существует определенный «интервал». В конструкции подобных фильтров заложена идея, согласно которой фильтр не должен испытывать нагрузку свыше 100% указанных характеристик, т.е. напряжения, силы тока или полной мощности в режиме полной нагрузки. Таким образом, «интервал» должен допускать непродолжительную повышенную нагрузку в нештатных ситуациях или переходных условиях.

ТАБЛИЦА 6. ОЦЕНКА КОНДЕНСАТОРОВ ФИЛЬТРОВ СОГЛАСНО СТАНДАРТУ IEEE 18

Конденсатор	Параметр	Значение
Напряжение	Вольт	495.6
	номинальное	600.0
	Проценты	82.6
Сила тока	Ограничение IEEE	110.0
	Сила тока	2,140.7
	номинальная	2,309.4
	Проценты	92.7
Полная мощность	Ограничение IEEE	180.0
	Полная мощность	1,708.0
	номинальная	2,400.0
	Проценты	71.2
	Ограничение IEEE	135.0



Частотное сканирование фильтра пятой гармоники, настроенного на одну частоту

На рисунке 9 показана резонансная частота на 480 В шине. Резонансная частота параллельного контура составила 201 Гц (3.35 гармоника), а резонансная частота последовательного контура - 291 Гц (4.85 гармоника). Выбор значения 4.85 обеспечивает правильную фильтрацию, а значит соответствие стандарту IEEE 519-1992, при этом фильтрация всего тока пятой гармоники не требуется. Это допускает изменение емкости (или потери в конденсаторе), поэтому конечный сдвиг резонанса параллельного контура не происходит на пятой гармонике.

Обобщенные результаты анализа содержания гармоник.

Обобщенные результаты анализа содержания гармоник в среднечастотном сварочном агрегате представлены в таблице 2. Согласно исследованию 1, конструкция шестимпульсного диодного выпрямителя без линейных реакторов или изолирующих трансформаторов обеспечивает VTHD 20.99% и THD 86.55% в 12,47 кВ PCC; оба значения превышают предел в 5%, установленный стандартом IEEE 519-1992 и недопустимы для потребителей электроэнергии, смежных с предприятием. При напряжении 480 В VTHD 60.6% и THD 110% также недопустимы для бытовых нагрузок.

Исследование 2 свидетельствует о том, что установка 3% линейного реактора в каждый из четырех модулей выпрямителя понижает VTHD до 4,8% и THD до 29,9% в 12,47 кВ PCC. Хотя VTHD соответствует установленному стандарту IEEE 5-1992 ограничению в 5%, THD значительно превышает данное ограничение. При напряжении 480 В значения VTHD 14,11% и THD 37,98% улучшены, но остаются недопустимыми для бытовых нагрузок.

Результаты исследования 3 показали, что использование фильтра пятой гармоники, настроенного на одну частоту, который устанавливается с 3% линейным реактором в каждом выпрямителе, понижает значение VTHD до 0,90%, а значение THD до 3,16% в 12,47 кВ PCC; оба значения соответствуют ограничениям стандарта IEEE 519-1992. При напряжении 480 В значения VTHD 2,71% и THD 3,92% являются допустимыми. Данные напряжения не представляют проблем для 480 В бытовых потребителей или нагрузок прочих потребителей, питаемых от сети напряжением 12,47 кВ.

Дополнительная модернизация

Исследование показало, что гармоники являлись избыточными без установленного для их подавления оборудования. Для устранения указанных выше проблем производителю была предложена дополнительная модернизация еще не изготовленного среднечастотного сварочного агрегата.

Модернизация предполагает, как минимум, установку линейных реакторов (электрических реакторов) на линейной стороне каждого из четырех модулей диодного выпрямителя. Результаты исследования показывают, что реактивное сопротивление 3% уменьшает THD с 110% до 38%. Установка реактивных катушек парами, аналогично изолирующим трансформаторам (схема соединения "треугольник-треугольник" и схема соединения «треугольник – звезда») образует эффективную 12-ти импульсную систему на 480 В линейной стороне. Дополнительные фазорегулирующие трансформаторы создают эффективную 24-х импульсную систему на 480 В линейной стороне.

Кроме уменьшения искажения гармонического тока установка фазорегулирующих трансформаторов позволяет обеспечить компактность фильтра гармоник, настроенного на одну частоту.

НАСТРОЕННЫЕ НА ОДНУ ЧАСТОТУ ФИЛЬТРЫ ГАРМОНИК ВКЛЮЧАЮТ ПОДКЛЮЧЕННЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО РЕАКТОР И ЕМКОСТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Кроме того, существует вероятность, что эффективная 12-ти или 24-х импульсная система может полностью исключить необходимость установки фильтра гармоник, настроенного на одну частоту. Производитель сварочного агрегата может использовать существующую конструкцию для создания 12-ти или 24-х импульсной системы, модернизированной под среднечастотное сварочное оборудование.

Следует учитывать линейно нарастающие на протяжении нескольких циклов характеристики тока. Линейно нарастающие характеристики тока обеспечивают оптимальную нагрузку и замедляют изменение напряжения в 12,47 кВ системе (следует учитывать синусоидальную модуляцию синусоидальной волны 60 Гц), а также

снижают пульсации напряжения. Доступная в настоящее время конструкция требует резкого изменения силы тока, что вызывает резкое изменение напряжения (следует учитывать прямоугольную модуляцию синусоидальной волны 60 Гц) и более значительные пульсации напряжения.

Выводы

В настоящей статье описано исследование с целью анализа содержания гармоник, в ходе которого было установлено, что среднечастотный сварочный агрегат является причиной недопустимого искажения напряжения в распределительной электрической сети предприятия, особенно в установленном в непосредственной близости производственном оборудовании с множеством электронных блоков управления, а также в связанных со сварочным агрегатом бытовых потребителях. Искажение напряжения характеризуется значительной режекцией и прохождением через сдвинутый ноль; оба явления могут оказывать воздействие на цепи электронных управляющих устройств, а последнее из явлений может повлиять на цепи синхронизации, например, в сварочном агрегате. Далее, в статье наглядно показано, что установка линейных реакторов в сочетании с фильтром пятой гармоники, настроенным на одну частоту снижает искажение напряжения до допустимых пределов. В заключительной части утверждается, что дополнительная модернизация, включая использование фазорегулирующих трансформаторов в составе 12-ти импульсной или 24-х импульсной эффективной системы позволяет полностью исключить установку фильтра. Исследования гармоник и характеристик нагрузки на среднечастотный сварочный агрегат, а также эффективных методов подавления гармоник, обеспечивают производителя сварочного оборудования ценными данными, позволяющими внести необходимые изменения на этапе проектирования и добиться соответствия установленным на предприятии критериям.

Ссылки

- [1] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Standard 519-1992, 1992.
- [2] D. Carnovale, T. Dionise, and T. Blooming, "Price and performance considerations for harmonic solutions." in *Proc. Power Quality Conf. and Exhibition*, 2003, pp. 4-6.
- [3] *IEEE Standard for Shunt Power Capacitors*, ANSI/IEEE Standard 18-1992, 1992.