

ВХОДНЫЕ УСТРОЙСТВА ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ (Технический отчет)

К.т.н. И. Морозов, ООО «ОПТИМА», Республика Беларусь moroz@optima.by
Перепечатка данного отчета запрещена без согласия автора.

Ключевые слова: входной фильтр гармоник ED3N, сетевой дроссель ED3N, сглаживающий дроссель ED1W, Elhand, Оптима, преобразователь частоты, инвертор, частотник, электромагнитная совместимость, ГОСТ32144-2013, EN50160:2010, ГОСТ30804.3.2-2013, IEC61000-3-2:2009, ГОСТ30804.3.12-2013, IEC61000-3-12:2004, МЭК61000-3-4:1998, IEEE 519-2014 СКГС, THDi, THDu, ЧВКГС, PWhd, высшие гармоники, нелинейная нагрузка, шестипульсный выпрямитель.

АННОТАЦИЯ

Шестнадцать лет 21 столетия существенно изменили характер потребителей электроэнергии в целом в мире и в странах Таможенного Союза в частности, существенно увеличилась доля нелинейных потребителей электрической энергии на базе полупроводниковых приборов. И эта тенденция будет продолжаться по очевидным причинам. Особо необходимо отметить массовое внедрение преобразователей частоты на предприятиях с целью энергосбережения. Практически все электрические преобразователи энергии на входе используют выпрямители. В большинстве случаев это шестипульсные выпрямители. Выпрямитель является нелинейным элементом, в который втекает несинусоидальный (искаженный высшими гармониками ток), он деформирует форму напряжения в точке общего присоединения, от которой могут быть запитаны иные потребители чувствительные к не синусоидальности напряжения питания. Это приводит к ряду проблем, которые описаны ниже. Способы борьбы с не синусоидальностью входного тока известны, они рассмотрены ниже. При изучении вопроса используется пакет программ имитационного моделирования Simulink Matlab R2015b.

1 ВЫПРЯМИТЕЛЬ—НЕЛИНЕЙНЫЙ ПОТРЕБИТЕЛЬ

Любой выпрямитель переменного тока в постоянный представляет собой нелинейный элемент. Причиной такого эффекта является нелинейная вольтамперная характеристика диода (тиристора). В зависимости от схемы выпрямления меняется только состав и амплитуда высших гармоник токов втекающих в выпрямитель. На Рисунке 1.1 представлены различные варианты схем выпрямления и номера гармоник тока, появляющихся во входном токе выпрямителя. В общем случае номера высших гармоник в зависимости от количества пульсаций на выходе выпрямителя определяются по формуле

$$h = kq \pm 1$$

Где,

h-номер гармоники;

k-целое число от 1;

q-число пульсаций.

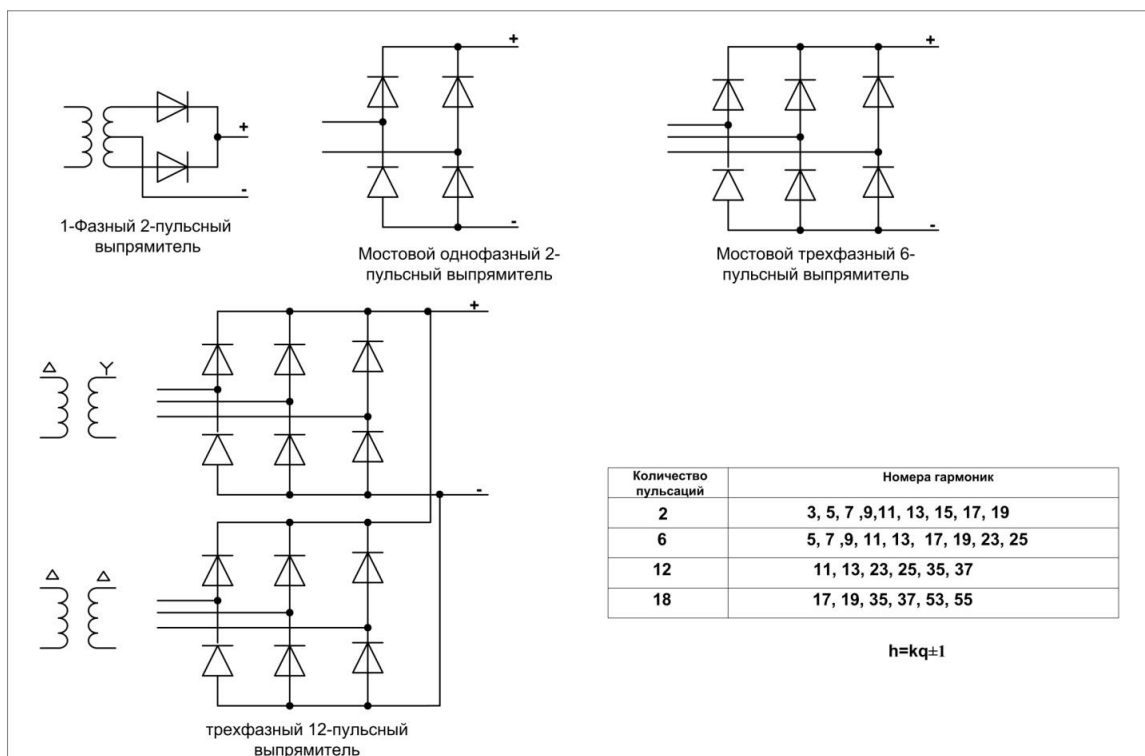


Рисунок 1.1 Варианты схем выпрямителей и таблица токов высших гармоник, втекающих в них

На выходе выпрямителя обычно установлен сглаживающий фильтр, в общем случае состоящий из дросселя и/или конденсаторов, которые фильтруют ток или напряжение в зависимости от требований конкретного устройства. Присутствие этих элементов фильтрации (индуктивность и емкость), определяет форму входного тока выпрямителя. Различие в форме тока, DC-привода (система

Выпрямитель-Двигатель постоянного тока В-ДПТ) с АС-приводами (система преобразователь частоты асинхронный двигатель ПЧ-АД), зависит от того, является ли фильтрующий контур индуктивным или емкостным по своей природе.

Если схема фильтрации в контуре постоянного тока будет преимущественно емкостной, без индуктивности или с очень небольшой индуктивностью, то форма входного тока будет иметь очень большой коэффициент формы (форм-фактор) кривой переменного тока 1,672, в синусоидальном токе не искаженном гармониками форм фактор равен 1,111. (форм-фактор – отношение действующего значения периодического тока к его среднему значению). На форму кривой тока будет в основном влиять сумма реактанса на входе выпрямителя. Такая ситуация имеет место для систем ПЧ-АД, в которых используют большая емкость конденсатора в контуре постоянного напряжения для сглаживания пульсаций напряжения. Количество гармоник в этих нагрузках почти полностью зависит от суммарного реактанса в линии переменного тока. Если реактанс линии переменного тока будет относительно низким (трансформатор, от которого питается система ПЧ-АД, имеет существенно большую мощность, чем система ПЧ-АД, отсутствует сетевой дроссель), то ток будет иметь высокий форм-фактор и, как следствие, высокий уровень высших гармоник. Если реактанс линии переменного тока будет относительно высок (трансформатор от которого питается система ПЧ-АД, имеет соизмеримую мощность с системой ПЧ-АД), то форм-фактор будет улучшен, и содержание высших гармоник снизится. Для пояснения, на рисунке изображена осциллограмма тока втекающего в ПЧ с шестипульсным выпрямителем на входе, от которого питается асинхронный двигатель 37 кВт, $U=400VAC$. Форм фактор для этой системы равен 1,335, $THDi=51,31\%$

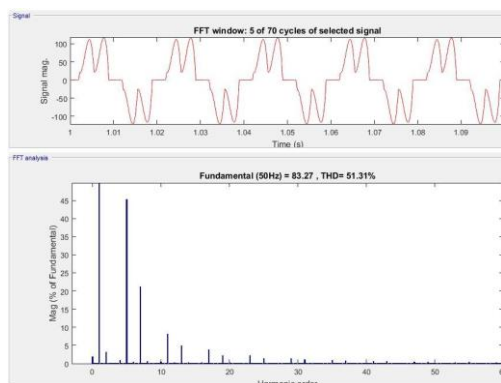


Рисунок №1.2 Форма тока и состав его гармоник в системе ПЧ-АД. Система получает питание от трансформатора 100кВА. Сетевой дроссель отсутствует.

Если фильтр контура постоянного тока будет преимущественно индуктивным без конденсатора или с очень небольшой емкостью конденсатора, то форма тока будет вообще близка к прямоугольной форме с крутыми фронтами. Такая ситуация имеет место в приводах с шестипульсными выпрямителями двигателей постоянного тока (система В-ДПТ). В кривой входного тока таких систем могут содержаться гармоники, уровень которых близок к теоретическим величинам волны прямоугольной формы: 5h-20%; 7h-14%, 11h-9%, 13h-8%, и т.д. Сумма реактанса на стороне переменного напряжения, присутствующего в последовательной сети системы электроснабжения, является небольшой по сравнению с индуктивностью контура постоянного напряжения. Добавление линейных реакторов или трансформаторов в таких системах существенно не изменит ситуацию с высшими гармониками. Для пояснения на рисунке 1.3 изображена осциллограмма тока втекающего в шестипульсный выпрямитель, от которого питается двигатель постоянного тока с независимым возбуждением 37 кВт, $U_{я}=500\text{VDC}$. Форм фактор для этой системы равен 1,208, $\text{THDi}=26,24\%$

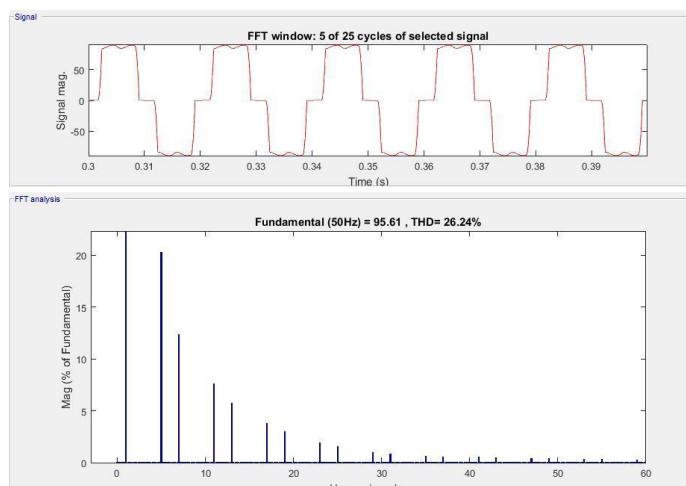
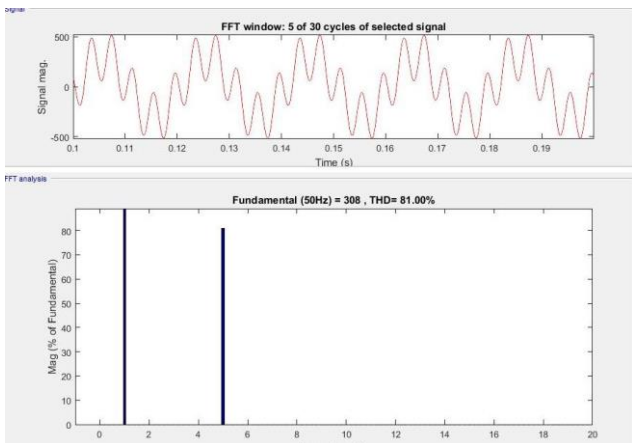
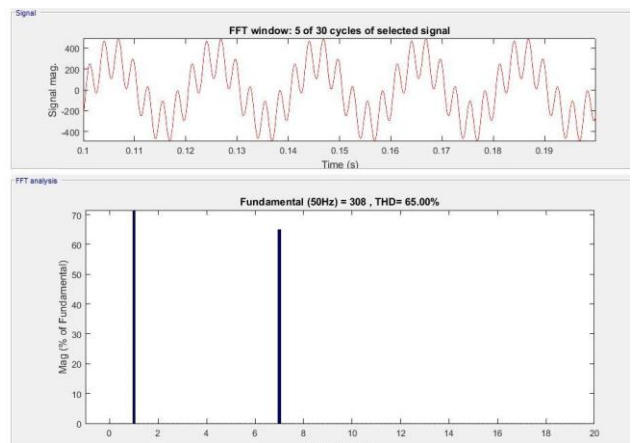


Рисунок №1.3 Форма тока и состав его гармоник в системе В-ДПТ. Система получает питание от трансформатора 100кВА. Сетевой дроссель отсутствует.

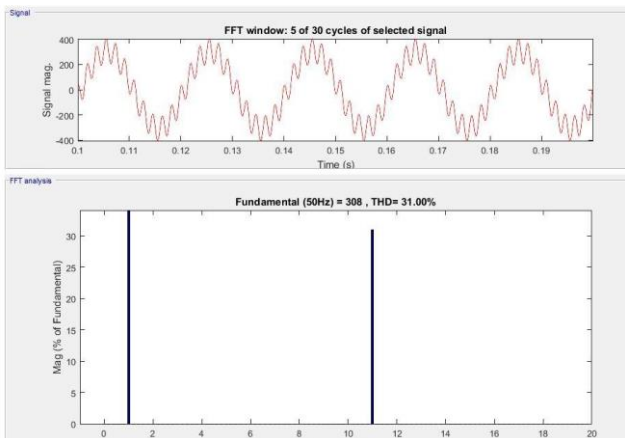
Для понимания искажающего эффекта на синусоидальный ток на Рисунке №1.4 приведены осциллограммы токов втекающих в шестипульсный выпрямитель с преимущественно емкостным фильтром на выходе выпрямителя (система ПЧ-АД). Причем показано влияние каждой из гармоник: 5, 7, 11, 13 (Рисунок №1.4.а-г), результат совместного действия самых «сильных» гармоник 5 и 7 (Рисунок №1.4 д), а также совокупное влияние этих гармоник на форму входного тока (Рисунок №1.4е)



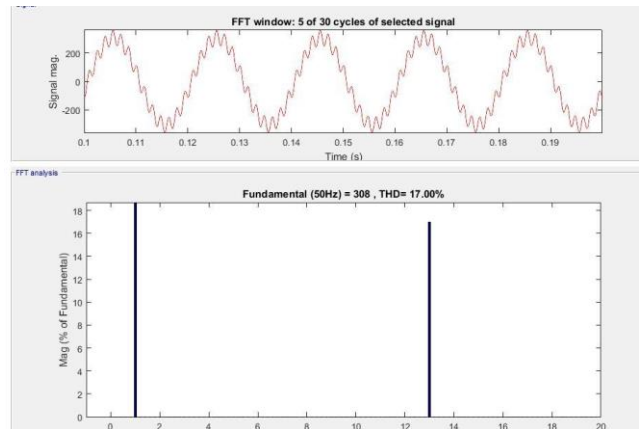
а) Влияние 5-ой гармоники



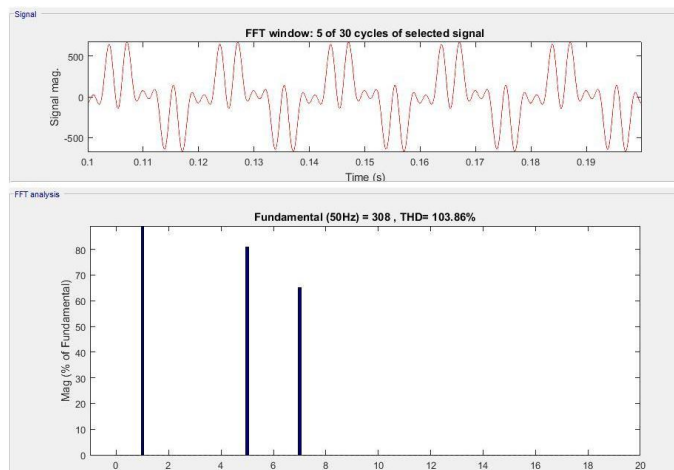
б) Влияние 7-ой гармоники



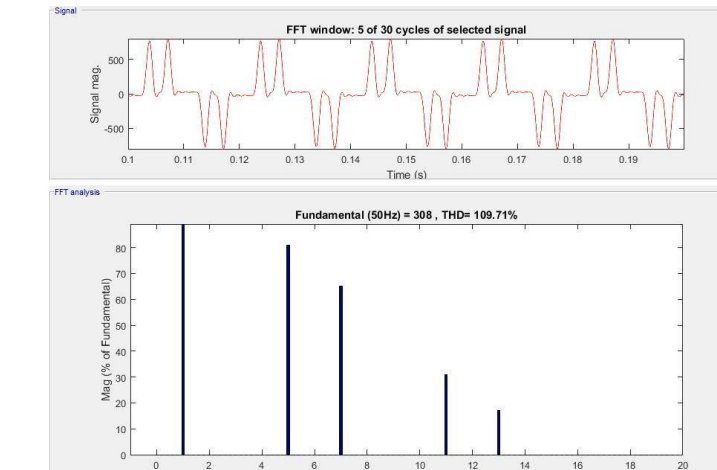
в) Влияние 11-ой гармоники



г) Влияние 13-ой гармоники



д) Влияние 5 и 7-ой гармоник



е) Влияние 5, 7, 11, 13-ой гармоник

Рисунок 1.4 Влияние высших гармоник на входной ток.

Слишком большое содержание высших гармоник входного тока преобразователя приводит к искажению синусоидального напряжения на шинах трансформаторной подстанции, к которой он подключен. От этой же трансформаторной подстанции могут быть запитаны иные потребители

электрической энергии. Это может вызвать значительное увеличение потерь мощности в устройствах и машинах подключенных к той же шине, в результате протекания тока повышенной частоты (250, 350, 550 Гц) или вызвать нарушения в работе этих устройств. Особенно, это относится к конденсаторным батареям, работающим параллельно с преобразовательной системой. Уменьшение полного сопротивления конденсаторов в связи с увеличением частоты может вызвать повреждение батареи в результате перегрузки токами с частотами высших гармоник. Искажение кривой напряжения особо опасно при питании преобразовательных технических средств от резервных аварийных генераторов. Кроме того, опасен параллельный резонанс в системе. Гармоники, создаваемые приводными системами, могут быть усилены в 10-15 раз в цепи параллельного резонанса, образованного емкостным реактивным сопротивлением конденсаторной батареи и индуктивностью сети. Это явление может привести к повреждению, как конденсаторной батареи, так и преобразователя. Гармонические составляющие при неблагоприятных условиях могут представлять опасность для механической конструкции электрических машин. Пары гармоник, например 5 и 7, могут вызвать механические колебания с частотой 6-той гармоники в генераторе или электродвигателе. Эти колебания возникают из-за колебаний электромагнитного момента в результате искажения кривой напряжения питания. В том случае если частота этих колебаний совпадёт с частотой механического резонанса, то механическая конструкция машины будет подвержена значительным механическим перегрузкам. Нежелательный эффект шумной работы электрических машин, являющийся результатом явления магнитострикции, дополнительно усиливается из-за относительно высоких частот гармонических составляющих тока. Токи, искажённые высшими гармониками, вызывают, кроме того, более интенсивное нагревание электрических проводов и кабелей в результате явления поверхностного эффекта и эффекта близости. Кроме того токи высших гармоник приводят к дополнительному нагреву трансформаторов и электродвигателей. Токи высших гармоник могут приводить к ложному срабатыванию входных автоматических выключателей. Весь этот негатив вызванный использованием преобразовательной техники, который нарастает с каждым годом, вынуждает принимать нормативные документы ограничивающие эмиссию высших гармоник тока техническими средствами.

2 ДЕЙСТВУЮЩИЕ НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

В настоящее время на территории ЕС и ТС действуют следующие нормы ограничивающие величины высших гармоник технических средств:

1 ГОСТ32144-2013 [EN 50160:2010,NEQ] Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения;

2 ГОСТ30804.3.2-2013 [IEC 61000-3-2:2004]. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16А (в одной фазе);

3 ГОСТ30804.3.12-2013 [IEC 61000-3-12:2004]. Нормы гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16А, но не более 75А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электроснабжения;

4 ГОСТ Р 51317.3.4-2006 [IEC 61000-3-4:1998] Ограничение эмиссии гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током более 75А, подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения.

Недостатками этих норм является то, что в зависимости от потребляемого тока технического средства допустимые эмиссии гармоник определяются разными ГОСТами. А технические средства с потребляемым током более 75А вообще остались без нормативов ограничения эмиссии гармонических составляющих. В ГОСТ Р 51317.3.4-2006 в пункте 5.3 Сказано: «Ступень 3—подключение, основанное на соглашении о мощности установки потребителя

Если потребляемый ток ТС более 75А, поставщик электрической энергии может подключить ТС к электрической сети на основании соглашения об активной мощности установки потребителя. В этом случае применяют требования, установленные поставщиком электрической энергии. При этом учитывают конкретные значения индивидуальных гармонических составляющих потребляемого тока ТС, а также значения СКГС и ЧВКГС, полученные по результатам измерений (моделирования) в соответствии с разделом 7».

В американском стандарте IEEE Std 519TM-2014 требования к эмиссии гармоник сведены в один документ. IEEE Std 519TM-2014 предъявляет более жесткие требования к эмиссии гармоник техническими средствами, чем европейские нормы.

3 ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Для понимания дальнейшего текста определимся в терминах.

Показателями качества электроэнергии (КЭ), относящимися к гармоническим составляющим, являются:

3.1 Суммарный коэффициент гармонических составляющих

СКГС [total harmonic distortion (THD)]: Отношение среднеквадратичного значения суммы гармонических составляющих к среднеквадратичному значению основной составляющей. Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока вычисляют как отношение среднеквадратичного значения суммы гармонических составляющих тока I_n порядка n от 2 до 40 к среднеквадратичному значению основной составляющей тока I_1 по формуле

$$СКГС(THD_I) = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad (3.1)$$

П р и м е ч а н и я

1 В случае обозначения суммарного коэффициента гармонических составляющих через аббревиатуру THD, символом «U» обозначают напряжение; символом «I»--ток;

2 Определения приведены в соответствии с МЭК 61000-2-2.

3.2 Частичный взвешенный коэффициент гармонических составляющих

ЧВКГС [partial weighted harmonic distortion (PWHD)]: Отношение среднеквадратичного значения суммы выделенных высших гармонических составляющих, взвешенных с коэффициентами, равными порядку гармонической составляющей, к среднеквадратичному значению основной составляющей. Частичный взвешенный коэффициент гармонических составляющих тока вычисляют как отношение среднеквадратичного значения суммы гармонических составляющих тока, начиная с 14-го порядка, взвешенных с коэффициентами, равными порядку гармонической составляющей, к среднеквадратичному значению основной составляющей тока, по формуле

$$ЧВКГС = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} n \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad (3.2)$$

П р и м е ч а н и е—ЧВКГС применяют, чтобы гарантировать значительное снижение влияния гармонических составляющих тока высших порядков на

результаты испытаний, при котором нет необходимости устанавливать для указанных гармонических составляющих индивидуальные нормы.

3.3 Точка общего присоединения [point of common coupling (PCC)]

Точка электрической сети общего назначения, электрически ближайшая к сетям рассматриваемого потребителя электрической энергии, к которой присоединены или могут быть присоединены электрические сети других потребителей. На рисунке 3.1 изображена однолинейная схема подключения различных потребителей электрической энергии к точке общего присоединения PCC.

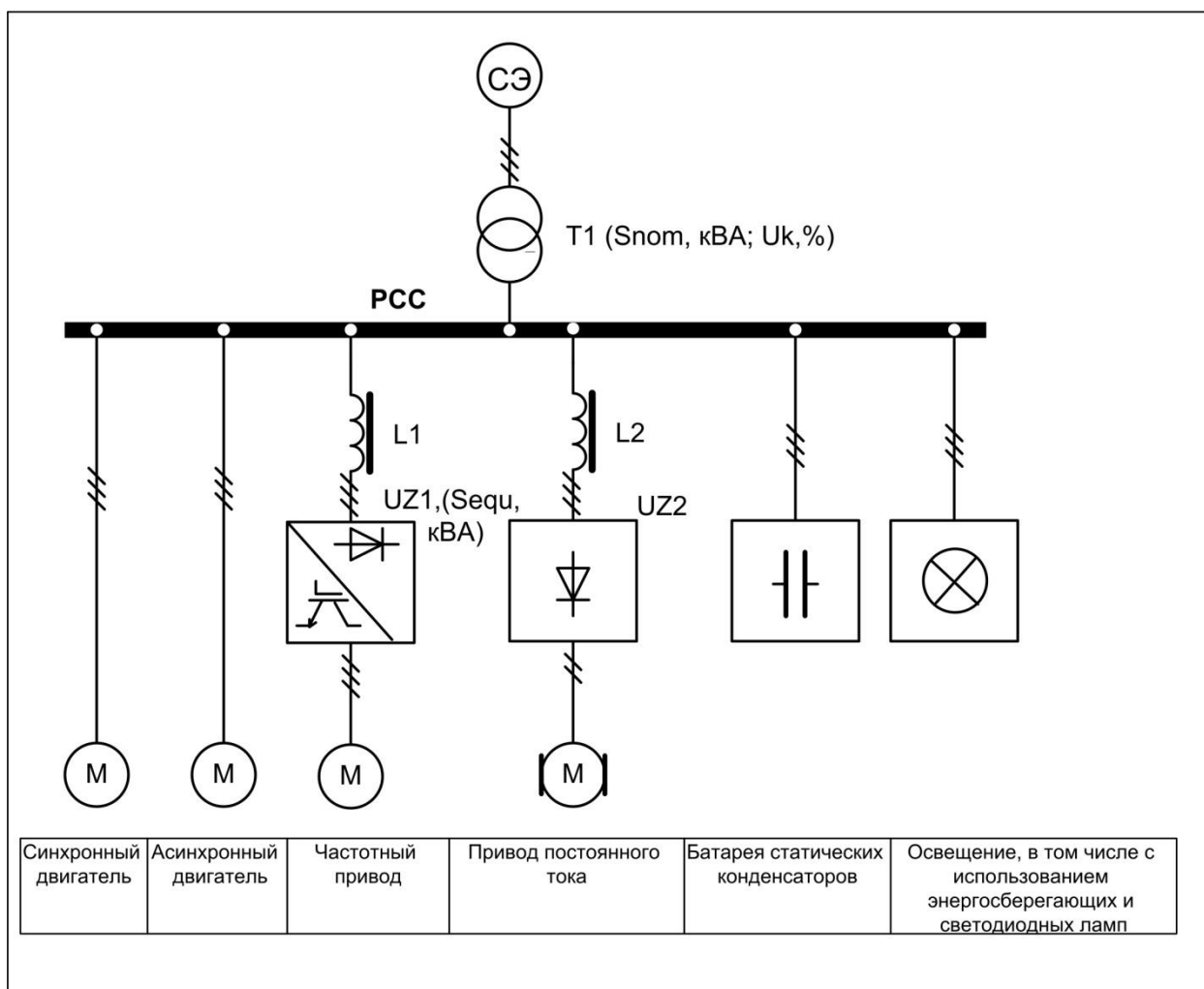


Рис. 3.1 Схема подключения потребителей к точке общего присоединения

3.4 Мощность короткого замыкания

Ssc (short-circuit power): Мощность короткого замыкания трехфазной системы электроснабжения, вычисляемая с учетом значений номинального напряжения системы $U_{ном}$ и ее полного сопротивления Z в точке общего присоединения PCC на частоте сети, по формуле (3.3)

$$S_{sc} = \frac{U_{nom}^2}{Z} \quad (3.3)$$

В том случае если индуктивности в цепи протекания тока незначительны, то полное сопротивление Z равно полному сопротивлению трансформатора определяемого по формуле

$$Z_{tr} = \frac{U_{nomtr}}{\sqrt{3}I_{nomtr}} \frac{u_{kz} \%}{100}, Ом \quad (3.4)$$

где,

$$I_{nomtr} = \frac{S_{nomtr}}{\sqrt{3}U_{nomtr}} 1000, А \quad (3.5)$$

Где

U_{nomtr} —номинальное напряжение трансформатора, В;

u_{kz} —напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Используем выражения (3.3), (3.4) и (3.5) получим выражение для определения мощности короткого замыкания в виде (3.6)

$$S_{sc} = \frac{S_{nomtr} \cdot 100}{u_{kz} \%} \quad (3.6)$$

3.5 Ток короткого замыкания

I_{sc} (short-circuit current): Ток короткого замыкания трехфазной системы электроснабжения, вычисляемый с учетом значений номинального напряжения системы U_{nom} и ее полного сопротивления Z в точке общего присоединения на частоте сети, по формуле

$$I_{sc} = \frac{U_{nom}}{\sqrt{3}Z} \quad (3.7)$$

Полное сопротивление Z состоит из импеданса кабельной линии, импеданса трансформатора и импедансов индуктивных элементов в цепи протекания тока (сетевой дроссель ED3N, дроссель контура постоянного тока ED1W). Причем в большинстве случаев импедансом кабеля можно пренебречь. В том случае если индуктивности в цепи протекания тока отсутствуют, то полное сопротивление Z равно полному сопротивлению трансформатора определяемого по формуле (3.4)

В таблице 3.1 приведены основные параметры, используемые в дальнейшем для разных мощностей трансформаторов.

Таблица 3.1

S_{nomtr}, кВА	I_{nomtr},А	U_{kz},%	Z_{tr}, Ом	I_{sc},кА	S_{sc},кВА
16	23	4,5	0,45000	0,5	356
25	36	4,5	0,28800	0,8	556
40	58	4,5	0,18000	1,3	889
63	91	4,5	0,11429	2,0	1400
100	145	4,7	0,07520	3,1	2128
160	231	4,7	0,04700	4,9	3404
250	361	4,7	0,03008	7,7	5319
400	578	4,5	0,01800	12,8	8889
630	910	5,5	0,01397	16,6	11455
1000	1445	5,5	0,00880	26,3	18182
1250	1806	6,0	0,00768	30,1	20833
1600	2312	6,0	0,00600	38,5	26667
2500	3613	6,0	0,00384	60,2	41667

3.6 Полная номинальная мощность технического средства (ТС)

S_{equ} (rated apparent power of the equipment *S_{equ}*). Величина, вычисляемая с учетом среднеквадратических значений номинального фазного тока образца ТС *I_{equ}*, установленного изготовителем, и номинальных значений линейного напряжения сети (для трехфазных ТС) по формуле:

$$S_{equ} = \sqrt{3}U_{nom}I_{equ} \quad (3.8)$$

П р и м е ч а н и е—следует иметь ввиду, что *I_{equ}* это входной ток ТС, например, преобразователя частоты.

3.7 Отношение короткого замыкания *R_{sce}* (short-circuit ratio

***R_{sce}*)**

Величина, характеризующая образец ТС, вычисляемая по формулам:

$$R_{sce} = \frac{S_{sc}}{S_{equ}} \quad (3.9)$$

$$R_{sce} = \frac{U_{nom}}{\sqrt{3}Z I_{equ}} \quad (3.10)$$

$$R_{sce} = \frac{I_{sc}}{I_{equ}} \quad (3.11)$$

На Рис 3.2 изображены зависимости отношения короткого замыкания R_{sce} от полной мощности ТС Seq для трансформаторов различных мощностей. Штриховой линией выделены значения R_{sce} относительно которых по (ГОСТ 30804.3.12—2013 [IEC 61000-3-12:2014]) определяют допустимый уровень гармоник.

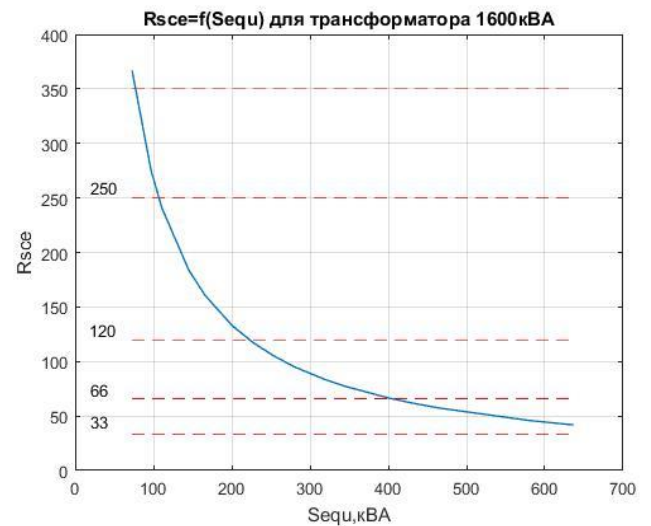
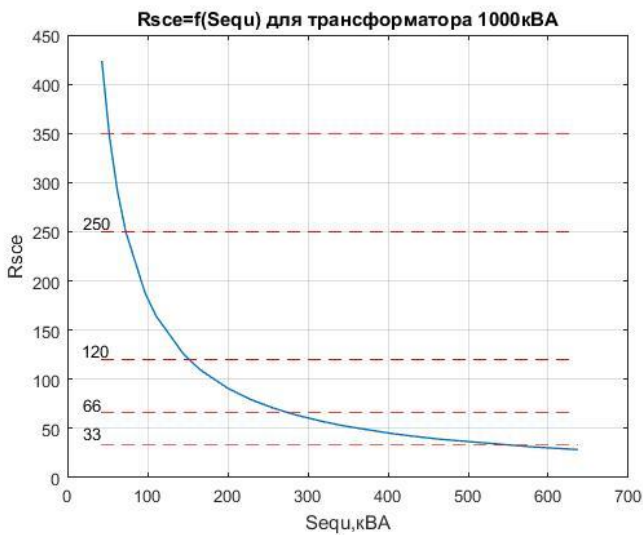
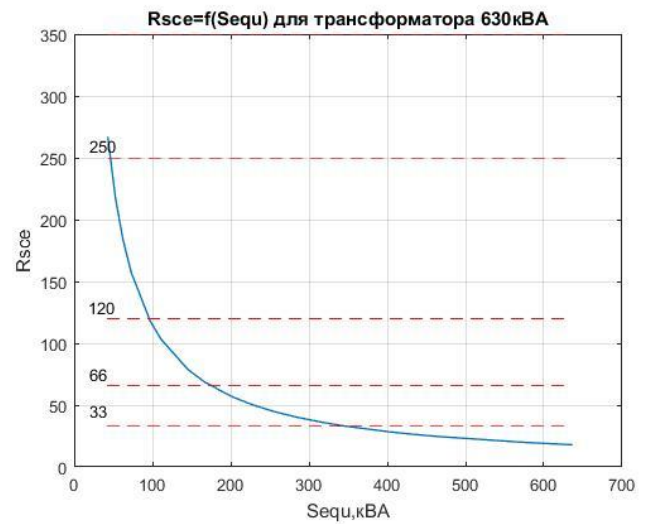
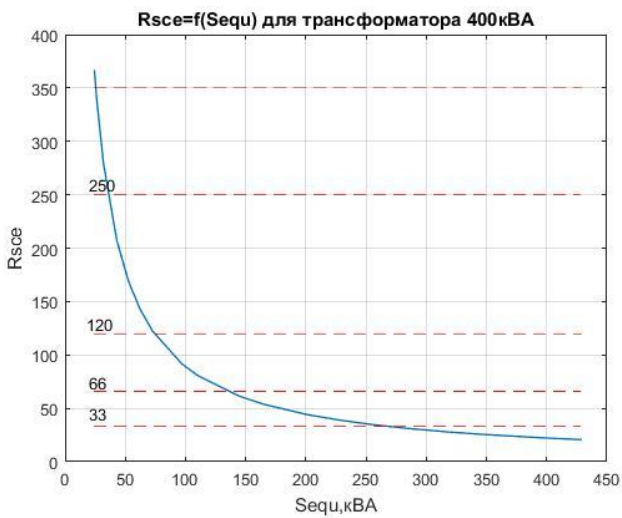
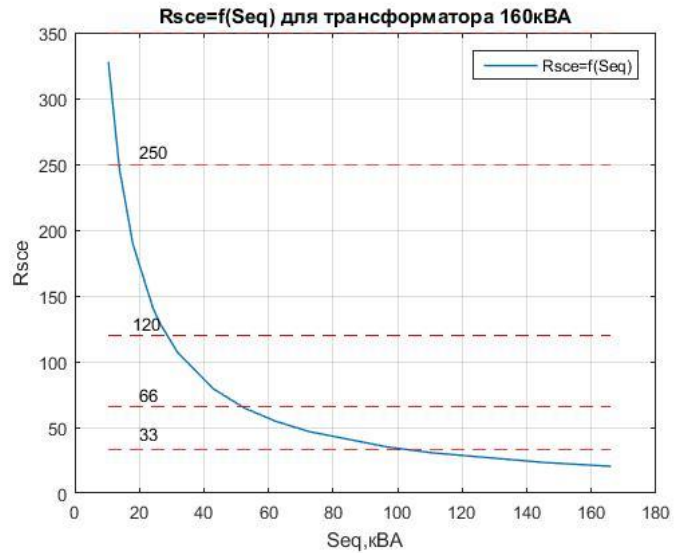
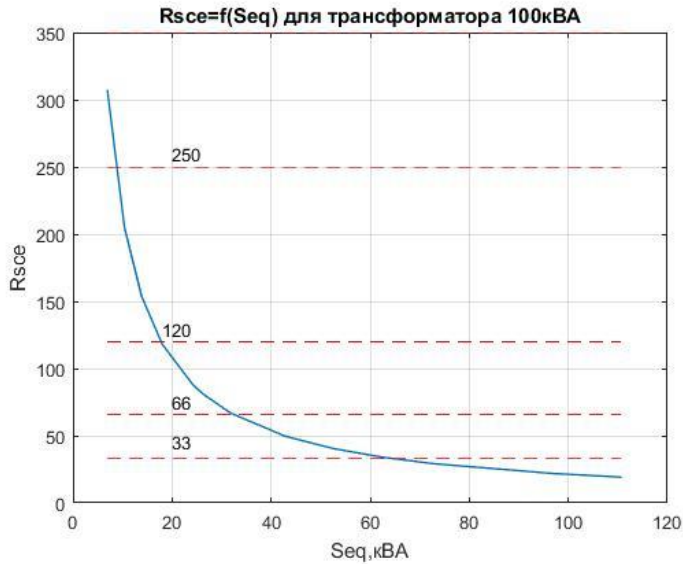


Рис 3.2 Зависимости отношения короткого замыкания R_{sc} от полной мощности TC Sequ для трансформаторов различных мощностей

3.8 Допустимые значения гармонических составляющих

напряжения и тока

Ниже в таблицах №3.2, №3.3 и №3.4 приведены допустимые значения (%) напряжения нечетных и четных гармоник в зависимости от напряжения сети. В таблицах №3.5, №3.6 приведены допустимые значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения, THDu для различных напряжений.

Т а б л и ц а № 3.2—Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения не кратных трем (ГОСТ 32144—2013, [EN50160:2010,NEQ])

Порядок гармонической составляющей n	Значение коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения $K_u(n)$, %U1			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6-25	35	110-220
5	6	4	3	1,5
7	5	3	2,5	1
11	3,5	2	2	1
13	3,0	2	1,5	0,7
17	2,0	1,5	1	0,5
19	1,5	1	1	0,4
23	1,5	1	1	0,4
25	1,5	1	1	0,4
>25	1,5	1	1	0,4

Т а б л и ц а 3.3—Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения, кратных трем (ГОСТ 32144—2013, [EN50160:2010,NEQ])

Порядок гармонической составляющей n	Значение коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения $K_u(n)$, %U1			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6-25	35	110-220
3	5	3	3	1,5
9	1,5	1	1	0,4
15	0,3	0,3	0,3	0,2
21	0,2	0,2	0,2	0,2
>21	0,2	0,2	0,2	0,2

Т а б л и ц а 3.4—Значения коэффициентов четных гармонических составляющих напряжения (ГОСТ 32144—2013, [EN50160:2010,NEQ])

Порядок гармонической составляющей n	Значение коэффициентов четных гармонических составляющих напряжения $K_u(n)$, %U1			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6-25	35	110-220
2	2	1,5	1	0,5
4	1	0,7	0,5	0,3
6	0,5	0,3	0,3	0,2
8	0,5	0,3	0,3	0,2

10	0,5	0,3	0,3	0,2
12	0,2	0,2	0,2	0,2
>12	0,2	0,2	0,2	0,2

П р и м е ч а н и я:

1. Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения THDu, усредненные в интервале 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблицах №3.2-№ 3.5, в течение 95% времени интервала в одну неделю.
2. Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения THDu, усредненные в интервале 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблицах №3.2-№ 3.5, увеличенных в 1,5 раза в течение 100% времени каждого периода в одну неделю.

Т а б л и ц а 3.5—Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения, THDu (ГОСТ 32144—2013, [EN50160:2010,NEQ])

Значение суммарных гармонических составляющих напряжения THDu, %U1			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6-25	35	110-220
8,0	5,0	4,0	2,0
П р и м е ч а н и е—Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения THDu, усредненные в интервале 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблице, в течение 95% времени интервала в одну неделю			

Т а б л и ц а 3.6—Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения (ГОСТ 32144—2013, [EN50160:2010,NEQ])

Значение суммарных гармонических составляющих напряжения THDu, %U1			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6-25	35	110-220
12,0	8,0	6,0	3,0
П р и м е ч а н и е—Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения THDu, усредненные в интервале 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблице, в течение 100% времени интервала в одну неделю			

Ниже в таблице №3.7, №3.8 приведены допустимые значения (%) токов нечетных гармоник не кратных трем в зависимости от отношения короткого замыкания R_{sc} .

Т а б л и ц а 3.7—Нормы эмиссии гармонических составляющих тока для симметричных трехфазных ТС (ГОСТ 30804.3.12—2013 [IEC 61000-3-12:2014])

Минимальное значение R_{sce}	Предельно допустимое значение гармонической составляющей тока $I_n/I_1^{(1)}$, %				Предельно допустимое значение коэффициента гармонических составляющих, %	
	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}	СКГС	ЧВКГС
33	10,7	7,2	3,1	2	13	22
66	14	9	5	3	16	25
120	19	12	7	4	22	28
250	31	20	12	7	37	38
≥ 350	40	25	15	10	48	46

¹⁾ I_n —значение тока n-й гармонической составляющей, I_1 —значение основной составляющей тока

П р и м е ч а н и я

1 Относительные значения четных гармонических составляющих до 12-го порядка включительно не должны превышать $16/n, \%$. Четные гармонические составляющие свыше 12-го порядка, а также нечетные гармонические составляющие учитывают при установлении норм СКГС и ЧВКГС.

2 Допускается линейная интерполяция между последовательными значениями R_{sce} .

$I_5=0,09 \cdot R_{sce}+8$; $I_7=0,06 \cdot R_{sce}+5$; $I_{11}=0,04 \cdot R_{sce}+2$; $I_{13}=0,025 \cdot R_{sce}+1,2$;
 СКГС= $0,11 \cdot R_{sce}+9$;
 ЧВКГС= $0,075 \cdot R_{sce}+9$;

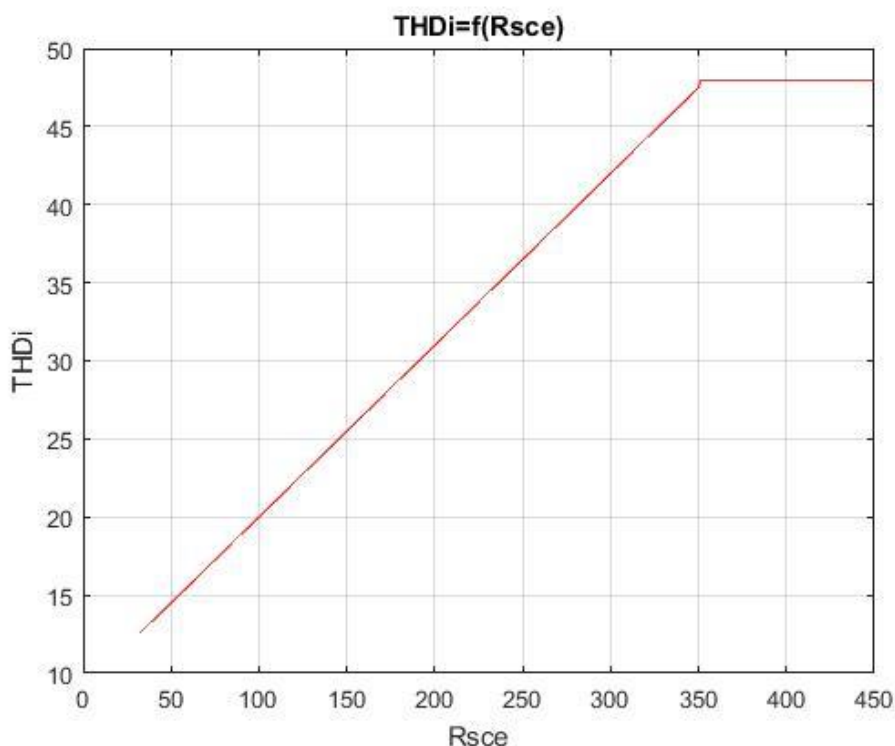


Рис 3.3 Зависимость THDi от Rsce построенная посредством линейной интерполяции данных приведенных в таблице 3.7.

В таблице №3.8 приведены нормы эмиссии гармонических составляющих тока для симметричных трехфазных ТС при выполнении любого из указанных ниже условий:

а) Угол фазового сдвига гармонической составляющей тока 5-го порядка I_5 относительно основной составляющей фазного напряжения U_{p1} находится в пределах от 90° до 150° в течение периода наблюдения при испытаниях.

П р и м е ч а н и е — Указанное выше условие обычно выполняется для ТС, конструкция которого включает в себя выпрямительный мост и емкостной фильтр с реактором 3-процентного переменного тока или 4-процентного постоянного тока.

б) Конструкция ТС должна быть такой, чтобы угол фазового сдвига гармонической составляющей тока 5-го порядка I_5 относительно основной составляющей фазного напряжения U_{p1} не принимал какого-либо предпочтительного значения во время функционирования и мог быть любым в интервале значений от 0 до 360° .

П р и м е ч а н и е — Указанное условие обычно выполняется для преобразователей с полностью управляемыми тиристорными мостами.

с) В течение периода наблюдения при испытаниях значения каждого из гармонических составляющих тока 5-го порядка I_5 и 7-го порядка I_7 составляют

менее 5% действующего значения основной составляющей тока I_1 .

Т а б л и ц а 3.8—Нормы эмиссии гармонических составляющих тока для симметричных трехфазных ТС. (ГОСТ 30804.3.12—2013 [IEC 61000-3-12:2014])

Минимальное значение R_{sce}	Предельно допустимое значение гармонической составляющей тока $I_n/I_1^{(1)}$, %				Предельно допустимое значение коэффициента гармонических составляющих, %	
	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}	СКГС	ЧВКГС
33	10,7	7,2	3,1	2	13	22
≥ 120	40	25	15	10	48	46

¹⁾ I_n —значение тока n-й гармонической составляющей, I_1 —значение основной составляющей тока

П р и м е ч а н и я

1 Относительные значения четных гармонических составляющих до 12-го порядка включительно не должны превышать $16/n, \%$. Четные гармонические составляющие свыше 12-го порядка, а также нечетные гармонические составляющие учитывают при установлении норм СКГС и ЧВКГС.

2 Допускается линейная интерполяция между последовательными значениями R_{sce} .

$I_5=0,33 \cdot R_{sce}$; $I_7=0,2 \cdot R_{sce}$; $I_{11}=0,14 \cdot R_{sce}-1,5$; $I_{13}=0,1 \cdot R_{sce}-1$; СКГС= $0,4 \cdot R_{sce}$; ЧВКГС= $0,27 \cdot R_{sce}+13$;

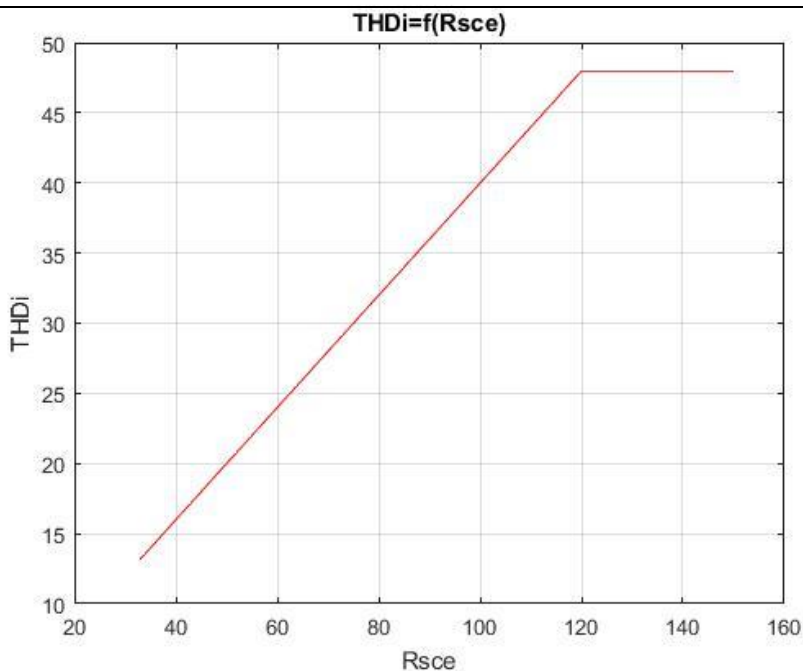


Рис 3.4 Зависимость THDi от Rsce построенная посредством линейной интерполяции данных приведенных в таблице 3.8.

В таблице №3.9 приведены нормы гармонических составляющих тока, в таблице №3.10 – нормы гармонических составляющих напряжения в соответствии со стандартом США IEEE 519—2014

Таблица 3.9 Ограничение гармоник тока в сетях напряжением от 120В до 60кВ (IEEE 519—2014)

Максимальный ток гармоник в процентах от IL						
Номера гармоник (четные гармоники) ^{1,2)}						
Isc/IL	3≤h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h<50	TDD
<20 ³⁾	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

¹⁾Четные гармоники ограничиваются значениями в 25% от уровня нечетных гармоник
 Где
 Isc—максимальный ток короткого замыкания в точке общего пользования (PCC)
 IL—максимальный требуемый ток нагрузки (основная гармоника)

Таблица 3.10 Ограничение искажения напряжения (IEEE 519—2014)

Напряжение в точке общего пользования (PCC)	Индивидуальная гармоника	THDu(%)
V≤1кВ	5.0	8.0
1кВ <V≤69кВ	3.0	5.0
691кВ <V≤161кВ	1.5	2.5
161кВ<V	1.0	1.5

3.9 Активный и пассивный токи, потребляемые техническим средством

При анализе влияния входных устройств преобразователей частоты на энергетические процессы воспользуемся понятиями активный и пассивный токи.

С. Фризе в 1932 году [6], [12] предложил для однофазных цепей полный ток i разложить на активную i_a (повторяющую форму напряжения сети и получающую за интервал рассмотрения ту же энергию, что и весь ток) и пассивную i_p (невязку до тока, не потребляющую энергию или ортогональную с напряжением сети и активным током) составляющие:

$$i_{\square} = i_a + i_p \quad (3.12)$$

Далее, через общепринятые определения мощности, среднеквадратичного напряжения и тока за определенный интервал рассмотрения им получены следующие формулы:

$$i_a = \frac{P}{U^2} u_{\square} \quad (3.13)$$

$$i_p = i_{\square} - i_a \quad (3.14)$$

Для действующих значений тока справедливо равенство

$$I^2 = I_a^2 + I_p^2 \quad (3.15)$$

Выражения для мощностей:

$$P_{\square} = U_{\square} \cdot I_a \quad (3.16)$$

$$Q_p = U_{\square} \cdot I_p \quad (3.17)$$

$$S_{\square} = \sqrt{P^2 + Q_p^2} \quad (3.18)$$

$$S^2 = U^2 \cdot I^2 = P_a^2 + Q_p^2 \quad (3.19)$$

Фризе, в своей работе указал на необходимость компенсации пассивной мощности и обосновал смысл формулы (3.19), хотя сама формула применялась и ранее для синусоидальных сигналов, при которой пассивная мощность совпадает с реактивной, определенной из других соображений. Тогда ее называли формулой К. Будеани, который опубликовал ее гораздо раньше в 1929 г. [5].

Пассивный тока i_p , в свою очередь, можно разделить на две составляющие: реактивный ток основной частоты i_{p1} и суммарный ток высших гармоник i_{ph} . Ток i_{ph} , главным образом, включает 5-ю, 7-ю, 11-ю, 13-ю, 17-ю, 19-ю, 23-ю и 25-ю гармонику. Составляющая пассивного тока i_{p1} отстает от активного тока на 90° . Составляющие токов высших гармоник могут менять угол сдвига относительно активной составляющей тока в зависимости от суммарного реактанса сети.

$$i_p = i_{p1} + i_{ph} \quad (3.19)$$

$$i_{ph} = \sum_{h=k \cdot 6 \pm 1}^N i_h \quad (3.20)$$

В настоящем отчете при определении активной и пассивной составляющих ток используется следующий алгоритм:

1. Определяется механическая мощность на валу АД по формуле:

$$P_m = M_{эм} \cdot \omega_p \quad (3.21)$$

Где, P_m - механическая мощность на валу АД, кВт;

ω_p - угловая скорость ротора АД

2. Определяется действующее значение активного тока по формуле:

$$I_a = \frac{P_m}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta} \quad (3.22)$$

Где U_n - линейное напряжение источника питания;

η - суммарный коэффициент полезного действия АД и ПЧ

3 Фаза мгновенного значения активного тока принимается равной фазе напряжения источника питания.

4 Мгновенное значение пассивного тока находится по выражению (3.14)

4 ИСЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СЕТЕВОГО ДРОССЕЛЯ НА ФОРМУ ВХОДНОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Исследования проведем для случая, когда преобразователь частоты мощностью 37 кВт питается от трансформатора 100кВа. Однолинейная схема исследуемой цепи изображена на Рис 4.1. Исследования проведем для случаев: 1) без сетевого дросселя; 2) с сетевым дросселем 2%; 3) с сетевым дросселем 3%; 4) с сетевым дросселем 4%; с сетевым дросселем 5%; Исследовать будем уровни гармоник 5, 7, 11, 13, THDi, а также I_1 , I_a и I_p для каждого из дросселей. Результаты исследования занесены в таблицы 4.1, 4.2.

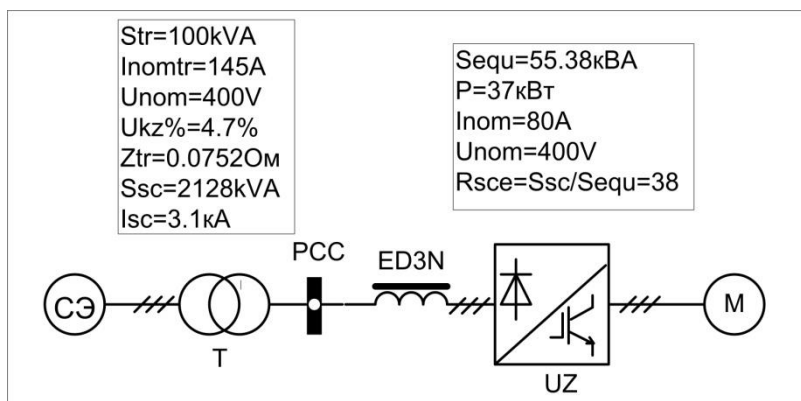


Рис. 4.1 Однолинейная схема исследуемой системы с сетевым дросселем

Нужно понимать, что с ростом мощности трансформатора, от которого питается ПЧ, отношение короткого замыкания R_{sce} будет увеличиваться, это изменение представлено на рисунке 4.2. Горизонтальные штриховые линии это

значения R_{sc} из таблицы 3.7 (ГОСТ 30804.3.12—2013), Вертикальные штриховые линии это стандартные мощности трансформаторов: 100, 160, 250, 400, 630 кВА.

Рис. 4.2 Зависимость отношения короткого замыкания R_{sc} от полной мощности трансформатора S_{tr} при мощности системы ПЧ-АД 55,38 кВА
На рисунках 4.3-4.7 изображена форма кривой входного тока и уровень гармоник в нем для схема без дросселя и с разными сетевыми дросселями 2-5%. На рисунке 4.8 изображена осциллограмма напряжения на сетевом дросселе 5%.

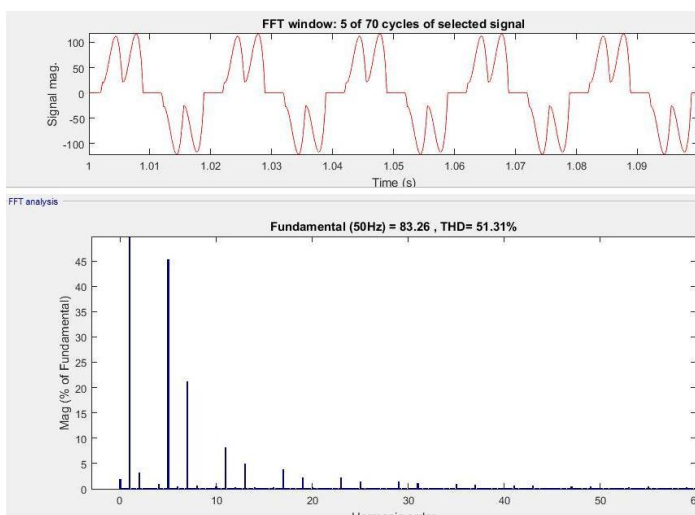


Рис. 4.3 Форма кривой входного тока выпрямителя и уровень гармоник в нем. Схема без дросселя

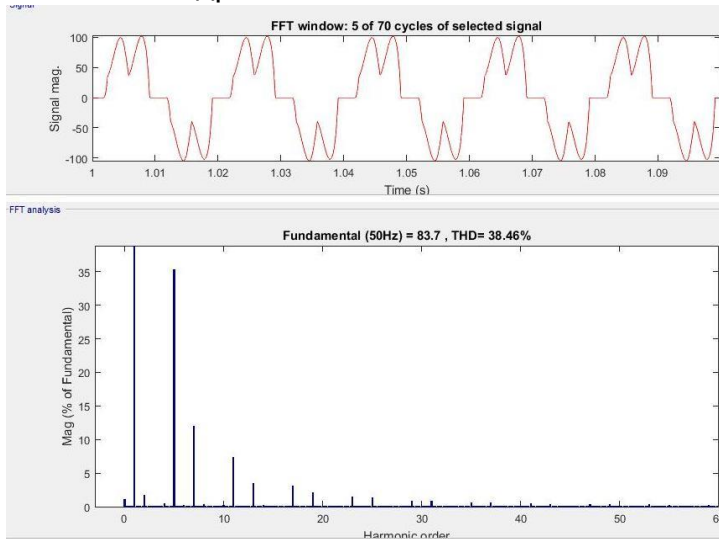


Рис. 4.4 Форма кривой тока и уровень гармоник в нем. Схема с дросселем 2%

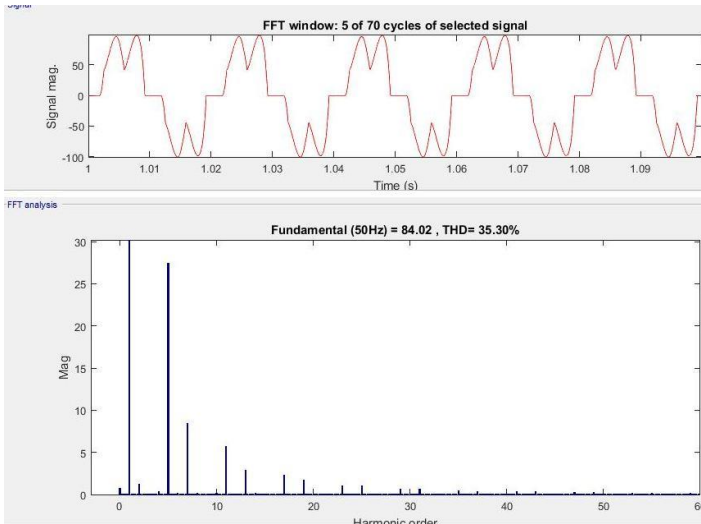


Рис. 4.5 Форма кривой тока и уровень гармоник в нем. Схема с дросселем 3%

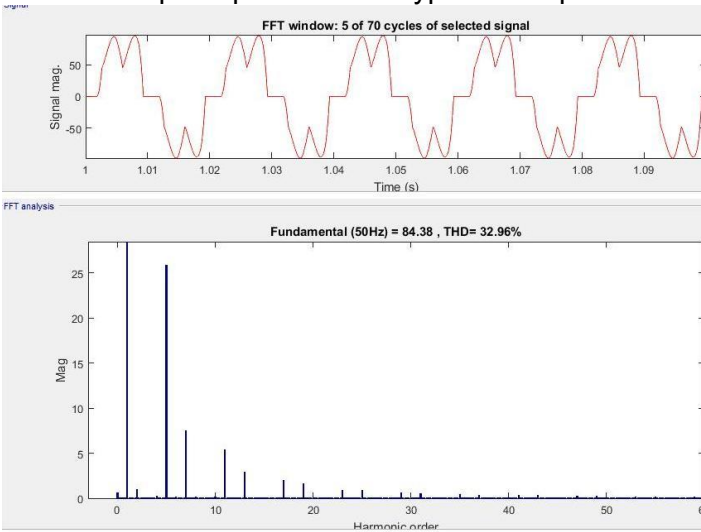


Рис. 4.6 Форма кривой тока и уровень гармоник в нем. Схема с дросселем 4%

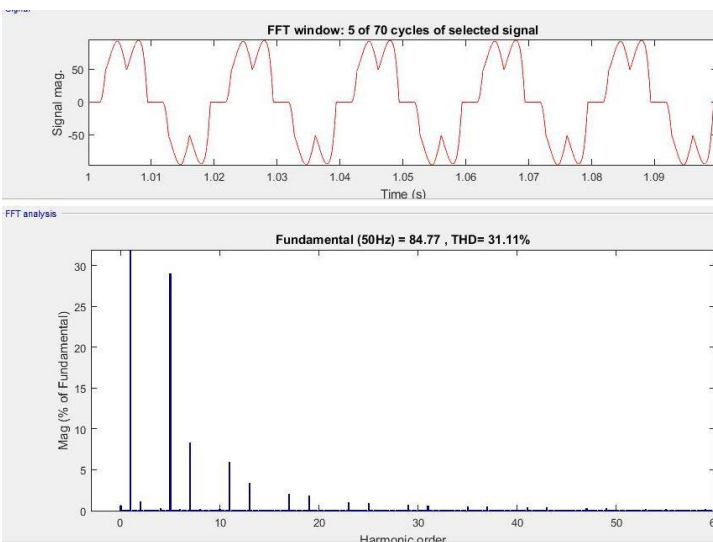


Рис. 4.7 Форма кривой тока и уровень гармоник в нем. Схема с дросселем 5%

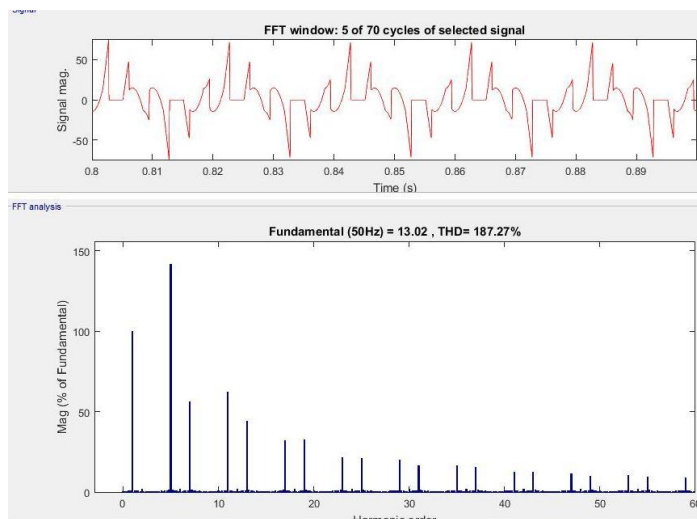


Рис. 4.8 Форма кривой напряжения на обмотке дросселе и уровень гармоник в нем. Схема с дросселем 5%

Т а б л и ц а 4.1

Нагрузка 100%*Iном (нечетные гармоники)										
h	L=0		L=0,1830(2%)		L=0,2745(3%)		L=0,3661(4%)		L=0,4576(5%)	
	%	угол	%	угол	%	угол	%	угол	%	угол
1	100	-13,1	100	-13,8	100	-14,5	100	-15,2	100	-15,9
5	45	104,3	35,32	99,6	32,68	96,5	30,66	93,2	29,02	89,9
7	21,16	228	11,95	194,8	10,04	178,3	8,9	162,3	8,24	147,4
11	8,19	268,6	7,31	235,3	6,82	221,4	6,35	208,4	5,87	196,1
13	4,84	-11,3	3,48	-81,6	3,41	251,8	3,41	230	3,4	211,4
СКГС,%	51,31		38,46		35,3		32,96		31,11	
Форм-фактор	1,34		1,26		1,25		1,24		1,23	
Полный ток I1	66,84		63,93		63,45		63,19		63,05	
Активный ток Ia, A	58,18		58,21		58,21		58,20		58,20	
Пассивный ток Ip, A	32,9		26,44		25,26		24,61		24,26	
Допустимый СКГС,% по ГОСТ 30804.3.12—2013	14		14		14		14		14	
Допустимый СКГС,% по IEEE 519—2014	8		8		8		8		8	
П р и м е ч а н и е—Str=100кВА; ukz=4,7%; Sequ=55360; Ssc=2128кВА; Rsc=38										

Т а б л и ц а 4.2 Пассивный ток Ip

Нагрузка 100%*Iном (нечетные гармоники)										
h	L=0		L=0,1830(2%)		L=0,2745(3%)		L=0,3661(4%)		L=0,4576(5%)	
	Ih, A	угол	Ih, A	угол	Ih, A	угол	Ih, A	угол	Ih, A	угол
1	12,6	267,7	12,98	267,1	13,7	267,4	14,47	267,8	15,25	268,2
5	26,81	109,9	21,04	105,3	19,53	102	18,41	98,8	17,5	95,5
7	12,65	235,8	7,15	202,4	6,08	185,9	5,41	170	5,03	155,2
11	5,0	-79,0	4,48	247,4	4,20	233,5	3,93	220,4	3,95	208,1
13	3,02	2,3	2,19	-67,6	2,14	265,9	2,15	244,1	2,15	225,5
Полный ток I1	66,84		63,93		63,45		63,19		63,05	

Активный ток I_a, A	58,18	58,21	58,21	58,20	58,20
Пассивный ток I_p, A	32,9	26,44	25,26	24,61	24,26
П р и м е ч а н и е— $Str=100кВА$; $ukz=4,7\%$; $Seq_u=55360$; $Ssc=2128кВА$; $R_{sce}=38$					

Из таблицы 4.1 видно, что для всех сетевых дросселей $THDi$ уменьшается с увеличением индуктивности сетевого дросселя, хотя остается существенно выше допустимого значения по ГОСТ 30804.3.12—2013. Например, в случае с 5% сетевым дросселем $THDi$ удалось снизить до 31.11%, допустимое значение по ГОСТ 30804.3.12—2013— 14%. Дальнейшее увеличение индуктивности дросселя не существенно снижает $THDi$, но приводит к ощутимому падению напряжения на обмотках дросселя. Поэтому при $R_{sce} \leq 200$ сетевые дроссели не позволяют ограничить уровень гармоник до уровня, предписанного ГОСТ 30804.3.12—2013. Для $R_{sce} > 200$ сетевой дроссель эффективен при условии его правильного подбора. Например, для рассматриваемого случая ($Seq_u=55кВА$) дроссель эффективен при питании от трансформатора мощностью 630кВА и более.

В таблице 4.2 приведены составляющие пассивного тока i_p . Из таблицы видно, что несмотря на падение (26%) пассивного тока из-за снижения тока i_{ph} при увеличении индуктивности сетевого дросселя от 0 до 5% пассивный ток первой гармоники i_{p1} , увеличивается на 21%. Фазовый угол первой гармоники пассивного тока не изменяется и составляет примерно 270° .

Амплитуда пятой гармоники уменьшается на 34,7 %. Фазовый угол пятой гармоники пассивного тока изменяется от 109° , при $L_{др}=0$ до $95,5^\circ$ при $L_{др}=5\%$ (вектор вращается против часовой стрелки).

Амплитуда седьмой гармоники уменьшается на 60 %. Фазовый угол седьмой гармоники пассивного тока изменяется от $235,8^\circ$, при $L_{др}=0$ до 155° при $L_{др}=5\%$ (вектор вращается против часовой стрелки переходя из третьего квадранта во второй).

Амплитуда одиннадцатой гармоники уменьшается на 21 %. Фазовый угол одиннадцатой гармоники пассивного тока изменяется от -79° , при $L_{др}=0$ до $208,1^\circ$ при $L_{др}=5\%$ (вектор вращается против часовой стрелки переходя из четвертого квадранта в третий).

Амплитуда тринадцатой гармоники уменьшается на 28 %. Фазовый угол тринадцатой гармоники пассивного тока изменяется от $2,3^\circ$, при $L_{др}=0$ до 225°

при $L_{др}=5\%$ (вектор вращается против часовой стрелки переходя из первого квадранта в третий).

На рисунках 4.3, 4.4 изображены мгновенные значения полного, активного и пассивного токов для схемы без сетевого дросселя и с сетевым дросселем 5%.

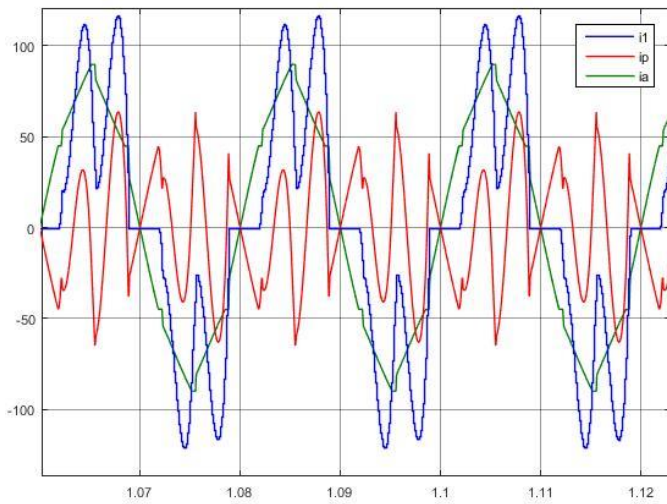


Рис. 4.3 Мгновенные значения токов без дросселей

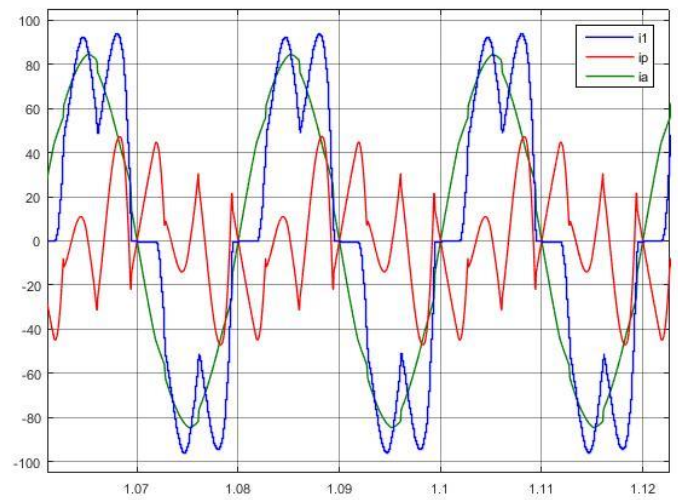


Рис. 4.4 Мгновенные значения токов с сетевым дросселем 5%

5 ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДРОССЕЛЯ В КОНТУРЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ФОРМУ ВХОДНОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Исследования проведем для случая, когда преобразователь частоты мощностью 37 кВт питается от трансформатора 100кВа. Однолинейная схема исследуемой цепи изображена на Рис 5.1. Исследования проведем для случаев: 1) без DC-дросселя; 2) с DC дросселем $L_{ED1W} = L_{ED3n}2\% * 1,5$; 3) с DC дросселем $L_{ED1W} = L_{ED3n}3\% * 1,5$; 4) с DC дросселем $L_{ED1W} = L_{ED3n}4\% * 1,5$; с сетевым дросселем $L_{ED1W} = L_{ED3n}5\% * 1,5$; Исследовать будем уровни гармоник 5, 7, 11, 13, THDi, а также I1, Ia и Ip для каждого из дросселей. Результаты исследования занесены в таблицы 5.1, 5.2.

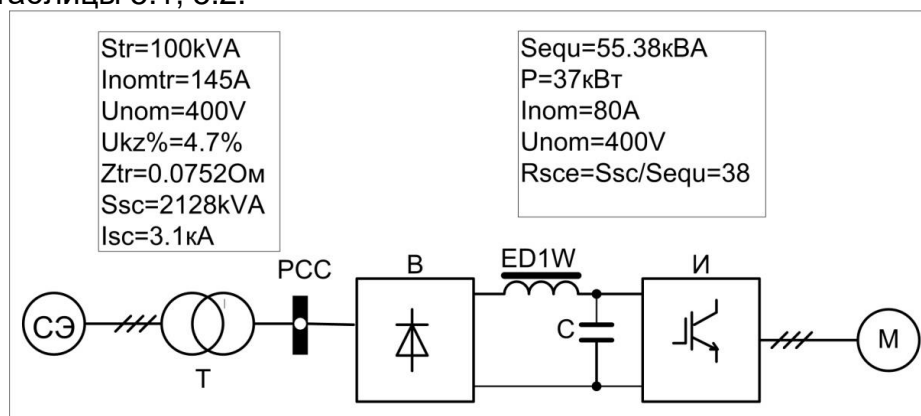


Рис. 5.1 Однолинейная схема исследуемой системы с дросселем в контуре постоянного тока

Т а б л и ц а 5.1

Нагрузка 100%*Inom (нечетные гармоники)										
h	L=0		L=0,1830*1,5		L=0,2745*1,5		L=0,3661*1,5		L=0,4576*1,5	
	%	угол	%	угол	%	угол	%	угол	%	угол
1	100	-13,1	100	-11,1	100	-10,6	100	-10,2	100	-9,9
5	45	104,3	34,5	111,2	31,78	113,9	29,8	116,2	28,35	118,3
7	21,16	228	13,34	205,8	11,84	195,5	11,04	186,4	10,64	178,8
11	8,19	268,6	7,94	-89,3	7,9	-88,6	7,87	-88,1	7,86	-87,6
13	4,84	-11,3	4,05	-52,3	4,19	-63,4	4,38	-70,7	4,56	-75,6
СКГС, %	51,31		38,59		35,62		33,61		32,23	
Форм-фактор	1,34		1,264		1,25		1,24		1,234	
Полный ток I1	66,84		63,36		62,66		62,20		61,9	
Активный ток Ia, А	58,18		58,20		58,21		58,21		58,21	
Пассивный ток Ip, А	32,9		25,04		23,20		21,94		21,05	
Допустимый СКГС, % по ГОСТ 30804.3.12—2013	14		14		14		14		14	
Допустимый СКГС, % по IEEE 519—2014	8		8		8		8		8	
П р и м е ч а н и е—Str=100кВА; ukz=4,7%; Sequ=55360; Ssc=2128кВА; Rsce=38										

Т а б л и ц а 5.2 Пассивный ток I_p

Нагрузка 100%* $I_{ном}$ (нечетные гармоники)										
h	L=0		L=0,1830*1,5		L=0,2745*1,5		L=0,3661*1,5		L=0,4576*1,5	
	Ih, A	угол	Ih, A	угол	Ih, A	угол	Ih, A	угол	Ih, A	угол
1	12,6	267,7	10,12	265,7	9,577	265,5	9,163	265,3	8,841	265,1
5	26,81	109,9	20,30	116,9	18,65	119,6	17,47	122	16,6	124
7	12,65	235,8	7,95	213,4	7,052	203,2	6,57	194,1	6,33	186,6
11	5,0	-79,0	4,82	-76,9	4,78	-76,2	4,76	-75,7	4,75	-75,2
13	3,02	2,3	2,52	-38,2	2,6	-49,1	2,71	-56,3	2,81	-61,1
Полный ток I1	66,84		63,36		62,66		62,20		61,9	
Активный ток Ia, A	58,18		58,20		58,21		58,21		58,21	
Пассивный ток Ip, A	32,9		25,04		23,20		21,94		21,05	
П р и м е ч а н и е—Str=100кВА; ukz=4,7%; Sequ=55360; Ssc=2128кВА; Rsce=38										

Из таблицы 5.1 видно, что для всех DC-дросселей THDi уменьшается с увеличением индуктивности DC-дросселей, хотя остается существенно выше допустимого значения по ГОСТ 30804.3.12—2013. Например, в случае с 5% DC-дросселем THDi удалось снизить до 32.23%, допустимое значение по ГОСТ 30804.3.12—2013— 14%. Дальнейшее увеличение индуктивности дросселя не существенно снижает THDi, но приводит к ощутимому падению напряжения на обмотках дросселя и неоправданному увеличению его стоимости. Поэтому при $R_{sce} \leq 200$ DC-дросселей не позволяют ограничить уровень гармоник до уровня, предписанного ГОСТ 30804.3.12—2013. Для $R_{sce} > 200$ DC-дроссель эффективен при условии его правильного подбора. Например, для рассматриваемого случая ($Sequ=55кВА$) дроссель эффективен при питании от трансформатора мощностью 630кВА и более.

В таблице 5.2 приведены составляющие пассивного тока i_p . Из таблицы видно, что падение пассивного тока составляет 36% при увеличении индуктивности DC-дросселей от 0 до 5%, пассивный ток первой гармоники i_{p1} , в отличие от использования сетевого дросселя, также уменьшается на 30%. Фазовый угол первой гармоники пассивного тока практически не изменяется и составляет примерно 270°.

Амплитуда пятой гармоники уменьшается на 38 %. Фазовый угол пятой гармоники пассивного тока изменяется от 109°, при $L_{др}=0$ до 124° при $L_{др}=5\%$ (вектор вращается по часовой стрелки).

Амплитуда седьмой гармоники уменьшается на 50 %. Фазовый угол седьмой гармоники пассивного тока изменяется от $235,8^\circ$, при $L_{др}=0$ до 186° при $L_{др}=5\%$ (вектор вращается против часовой стрелки).

Амплитуда одиннадцатой гармоники уменьшается на 5 %. Фазовый угол одиннадцатой гармоники пассивного тока изменяется от -79° , при $L_{др}=0$ до -75° при $L_{др}=5\%$ (вектор вращается по часовой стрелке).

Амплитуда тринадцатой гармоники уменьшается на 6.95 %. Фазовый угол тринадцатой гармоники пассивного тока изменяется от $2,3^\circ$, при $L_{др}=0$ до $-61,1^\circ$ при $L_{др}=5\%$ (вектор вращается против часовой стрелки переходя из первого квадранта в четвертый).

На рисунках 5.3, 5.4 изображены мгновенные значения полного, активного и пассивного токов для схемы без DC-дросселя и с DC- дросселем 5%.

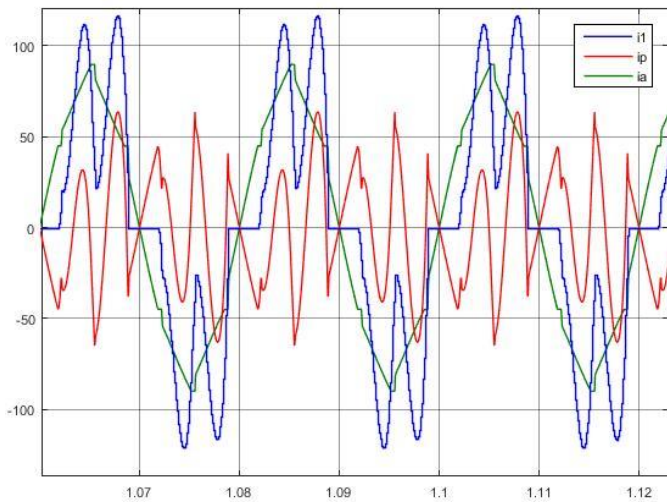


Рис. 5.3 Мгновенные значения токов без DC-дросселя

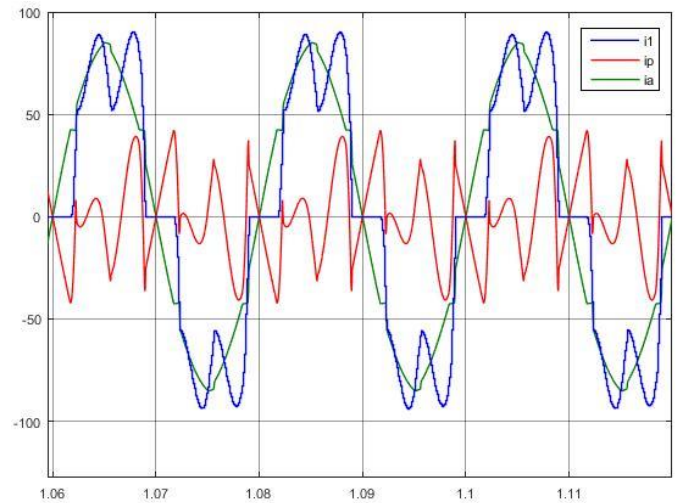


Рис. 5.4 Мгновенные значения токов с DC- дросселем 5%

6 ИСЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕТЕВОГО ДРОССЕЛЯ И ДРОССЕЛЯ В КОНТУРЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ФОРМУ ВХОДНОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

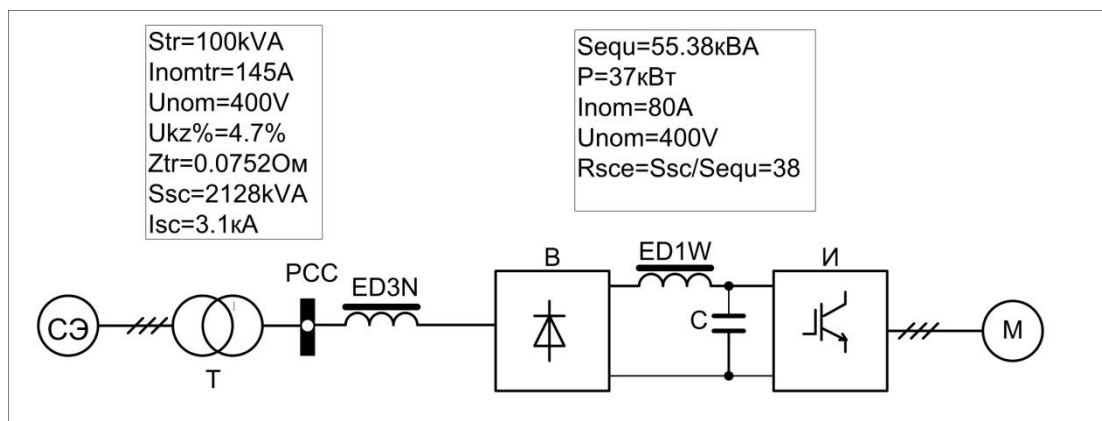


Рис. 6.1 Однолинейная схема исследуемой системы с сетевым дросселем и дросселем в контуре постоянного тока

Т а б л и ц а 6.1

Нагрузка 100%*Inom (нечетные гармоники)										
h	LED3N=0,мГ		LED3N=0,1830,мГ(2%)		LED3N=0,1830,мГ(2%)		LED3N=0,1830,мГ(2%)		LED3N=0,1830,мГ(2%)	
	LED1W=0,мГ		LED1W=0,1830*1,5,мГ		LED1W=0,2745*1,5,мГ		LED1W=0,3661*1,5,мГ		LED1W=0,4576*1,5,мГ	
	%	угол	%	угол	%	угол	%	угол	%	угол
1	100	-13,1	100	-12,9	100	-12,6	100	-12,4	100	-12,1
5	45	104,3	30,57	104,0	29,07	105,8	27,89	107,4	26,95	108,8
7	21,16	228	9,68	174,3	9,28	165,9	9,11	158,7	9,09	152,8
11	8,19	268,6	7,10	238,0	7,06	239,0	7,04	239,7	7,02	240,4
13	4,84	-11,3	3,72	257,6	3,86	162,0	4,6	247,9	4,13	244,9
СКГС,%	51,31		33,39		31,91		30,8		29,95	
Форм-фактор	1,34		1,24		1,233		1,229		1,225	
Полный ток I1, А	66,84		62,7		62,36		62,11		61,93	
Активный ток Ia, А	58,18		58,22		58,22		58,22		58,22	
Пассивный ток Ip, А	32,9		23,29		22,36		21,66		21,11	
Допустимый СКГС,% по ГОСТ 30804.3.12—2013	14		14		14		14		14	
Допустимый СКГС,% по IEEE 519—2014	8		8		8		8		8	
П р и м е ч а н и е—Str=100кВА; ukz=4,7%; Sequ=55360; Ssc=2128кВА; Rsce=38										

Т а б л и ц а 6.2

Нагрузка 100%*Inom (нечетные гармоники)

h	LED3N=0,МГ		LED3N=0,2745,МГ		LED3N=0,2745,МГ		LED3N=0,2745,МГ		LED3N=0,2745,МГ	
	LED1W=0,МГ		LED1W=0,1830*1,5,МГ		LED1W=0,2745*1,5,МГ		LED1W=0,3661*1,5,МГ		LED1W=0,4576*1,5,МГ	
	%	угол	%	угол	%	угол	%	угол	%	угол
1	100	-13,1	100	-13,8	100	-13,5	100	-13,3	100	-13,1
5	45	104,3	29,6	100,3	27,98	101,8	27,03	103,1	26,24	104,3
7	21,16	228	8,84	159,7	8,67	152,4	8,64	146,3	8,70	141,2
11	8,19	268,6	6,66	224,1	6,62	225,1	6,60	225,9	6,69	226,6
13	4,84	-11,3	3,66	237,7	3,78	233,5	3,88	230,4	3,97	228,0
СКГС,%	51,31		31,68		30,55		29,68		28,99	
Форм-фактор	1,34		1,232		1,227		1,224		1,221	
Полный ток I1, А	66,84		62,59		62,33		62,14		61,98	
Активный ток Ia, А	58,18		58,21		58,21		58,22		58,22	
Пассивный ток Ip, А	32,9		23,00		22,28		21,72		21,27	
Допустимый СКГС,% по ГОСТ 30804.3.12—2013	14		14		14		14		14	
Допустимый СКГС,% по IEEE 519—2014	8		8		8		8		8	
Примечание—Str=100кВА; ukz=4,7%; Sequ=55360; Ssc=2128кВА; Rsce=38										

Таблица 6.3

Нагрузка 100%*Inom (нечетные гармоники)										
h	LED3N=0,МГ		LED3N=0,3661,МГ		LED3N=0,3661,МГ (2%)		LED3N=0,3661,МГ (2%)		LED3N=0,3661,МГ (2%)	
	LED1W=0,МГ		LED1W=0,1830*1,5,МГ		LED1W=0,2745*1,5,МГ		LED1W=0,3661*1,5,МГ		LED1W=0,4576*1,5,МГ	
	%	угол	%	угол	%	угол	%	угол	%	угол
1	100	-13,1	100	-12,9	100	-14,4	100	-14,2	100	-14,1
5	45	104,3	27,95	96,5	27,00	97,8	26,21	99,0	25,55	100,1
7	21,16	228	8,34	146,2	8,31	140,00	8,35	134,8	8,45	130,5
11	8,19	268,6	6,22	211,1	6,19	212,1	6,18	212,9	6,16	213,6
13	4,84	-11,3	3,61	220,1	3,69	216,9	3,77	214,4	3,83	212,4
СКГС,%	51,31		30,27		29,38		28,68		28,11	
Форм-фактор	1,34		1,226		1,222		1,220		1,217	
Полный ток I1, А	66,84		62,55		62,35		62,19		62,06	
Активный ток Ia, А	58,18		58,21		58,21		58,21		58,21	
Пассивный ток Ip, А	32,9		22,9		22,33		21,88		21,5	
Допустимый СКГС,% по ГОСТ 30804.3.12—2013	14		14		14		14		14	
Допустимый СКГС,% по IEEE 519—2014	8		8		8		8		8	
Примечание—Str=100кВА; ukz=4,7%; Sequ=55360; Ssc=2128кВА; Rsce=38										

Т а б л и ц а 6.4

Нагрузка 100%*Iном (нечетные гармоники)										
h	LED3N=0,мГ		LED3N=0,4576,мГ		LED3N=0,4576,мГ		LED3N=0,4576,мГ		LED3N=0,4576,мГ	
	LED1W=0,мГ		LED1W=0,1830*1,5,мГ		LED1W=0,2745*1,5,мГ		LED1W=0,3661*1,5,мГ		LED1W=0,4576*1,5,мГ	
	%	угол	%	угол	%	угол	%	угол	%	угол
1	100	-13,1	100	-15,4	100	15,2	100	-15,1	100	-14,3
5	45	104,3	26,88	119,7	26,1	93,9	25,44	96,0	24,88	96,0
7	21,16	228	8,04	133,8	8,09	128,6	8,18	124,3	8,30	120,7
11	8,19	268,6	5,79	198,8	5,78	199,8	5,77	200,6	5,76	201,4
13	4,84	-11,3	3,54	204,2	3,60	201,7	3,65	199,6	3,70	198,0
СКГС,%	51,31		29,07		28,36		27,78		27,31	
Форм-фактор	1,34		1,221		1,218		1,216		1,214	
Полный ток I1, А	66,84		62,56		62,39		62,26		62,15	
Активный ток Ia, А	58,18		58,2		58,2		58,20		58,2	
Пассивный ток Ip, А	32,9		22,94		22,48		22,10		21,79	
Допустимый СКГС,% по ГОСТ 30804.3.12—2013	14		14		14		14		14	
Допустимый СКГС,% по IEEE 519—2014	8		8		8		8		8	
П р и м е ч а н и е—Str=100кВА; ukz=4,7%; Sequ=55360; Ssc=2128кВА; Rsce=38										

7 ИСЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СЕТЕВОГО ФИЛЬТРА НА ФОРМУ ВХОДНОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Исследования проведем для случая, когда преобразователь частоты мощностью 37 кВт питается от трансформатора 100кВа. Однолинейная схема исследуемой цепи изображена на Рис 7.1.

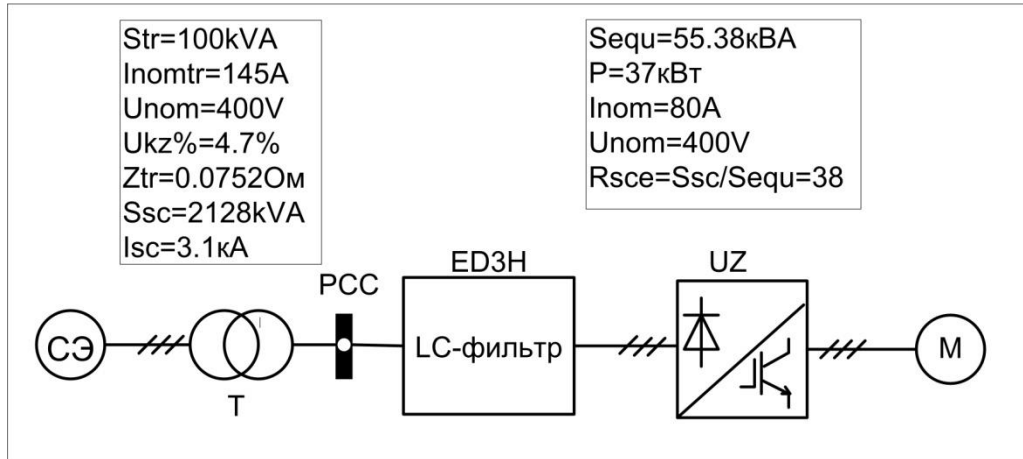
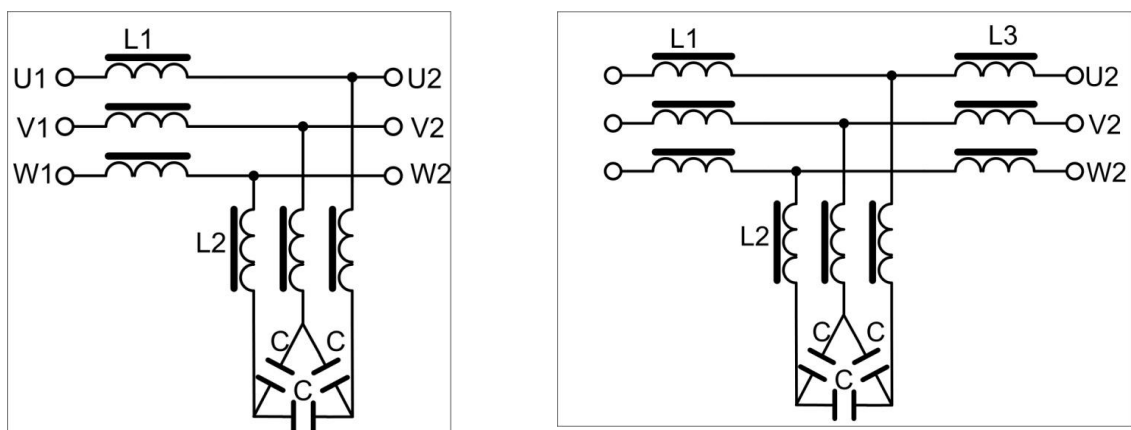


Рис. 7.1 Однолинейная схема исследуемой системы с фильтром гармоник

Целью исследования будет возможность снижение $THDi$ входного тока до допустимого по ГОСТ 30804.3.12—2013 уровня. Для случая, когда $Rsce=38$, $THDi$ должен быть не более 14%. Исследовать будем фильтры двух топологий: Г-образный фильтр Рисунок 5.2а; Т-образный фильтр рисунок 5.2в. При условии, что сумма индуктивностей линейных дросселей $L1$ и $L2$ Т-образного фильтра равна индуктивности $L1$ Г-образного фильтра. Резонансная цепь $L2-C$ у обоих фильтров одинакова.



а) Г-образная схема

б) Т-образная схема

Рис. 5.2 Варианты схем LC-фильтров; а) б)

На рисунке 5.3 изображена осциллограмма входного тока и его спектр для Г-образного фильтра. При известных параметрах фильтра удалось снизить THDi до 13.49%. На рисунке 5.4 изображены осциллограмма полного тока i_1 , активного тока i_a и пассивного тока i_p Г-образного фильтра. Видно, что входной ток носит опережающий характер по отношению к активному току i_a , а следовательно и входному напряжению u_1 . То есть система Г-фильтр-ПЧ-АД носит емкостной характер. На рисунке 5.5 изображена осциллограмма пассивного тока i_p схемы без дросселей и фильтров. На рисунке 5.6 изображена осциллограмма тока резонансной цепи Г-образного фильтра, который находится в противофазе пассивному току, стремясь его скомпенсировать.

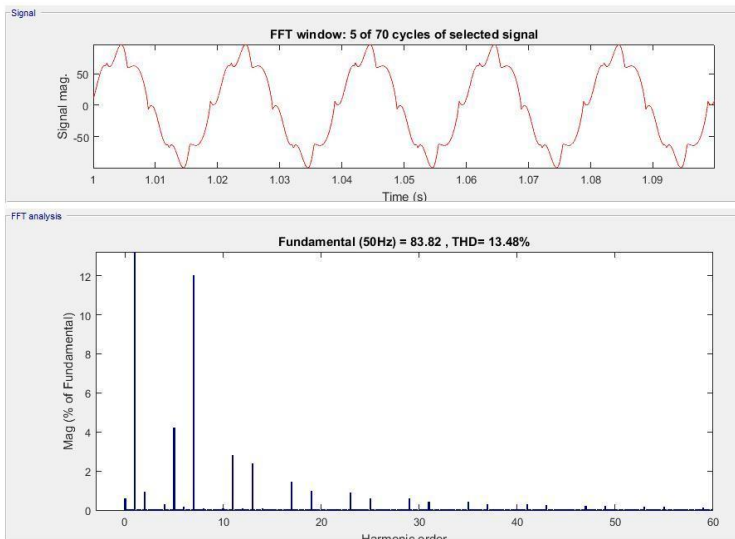


Рисунок 5.3 Осциллограмма полного тока i_1 и его спектр. Фильтр Г-образный.

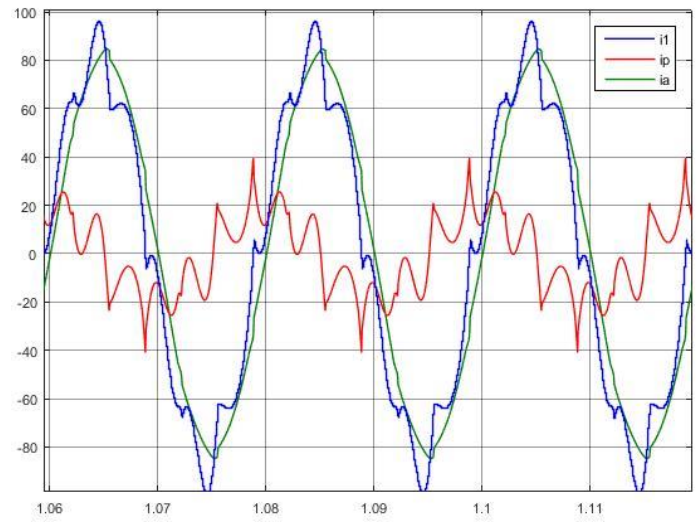


Рисунок 5.4 Осциллограмма полного тока i_1 , активного тока i_a и пассивного тока i_p . Фильтр Г-образный.

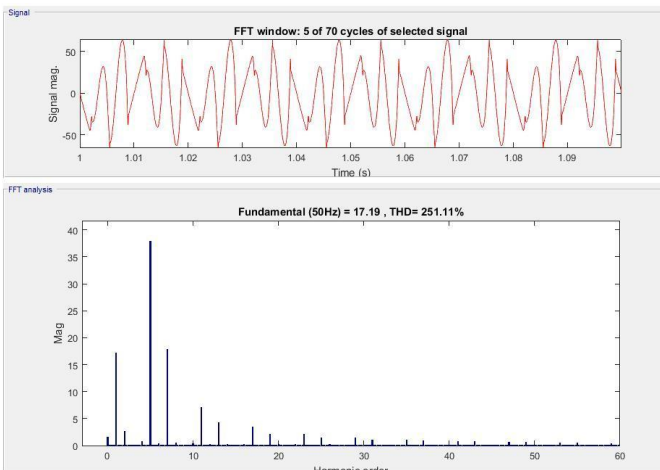


Рисунок 5.5 Осциллограмма пассивного тока i_p в схеме без дросселей и фильтра и его спектр. Фильтр Г-образный.

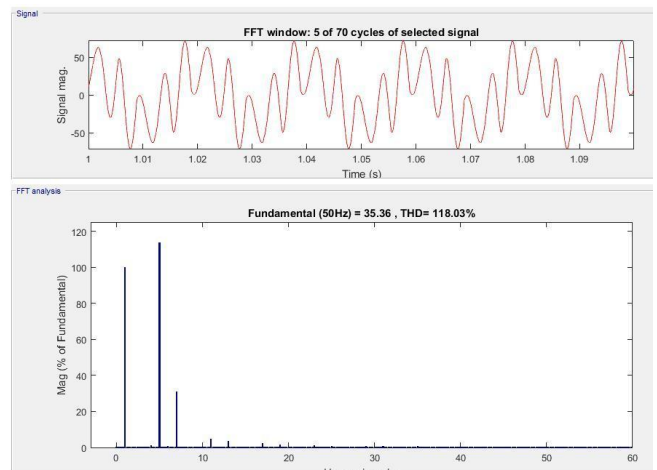


Рисунок 5.6 Осциллограмма тока LC-фильтра и его спектр. Фильтр Г-образный.

На рисунке 5.7 изображена осциллограмма входного тока и его спектр для Т-образного фильтра. При известных параметрах фильтра удалось снизить THDi

до 9.91%. То есть Т-образный фильтр, работает эффективней, чем Г-образный фильтр. На рисунке 5.8 изображены осциллограмма полного тока i_1 , активного тока i_a и пассивного тока i_p Г-образного фильтра. Входной ток носит опережающий характер по отношению к активному току i_a , а следовательно и входному напряжению u_1 . То есть система Т-фильтр-ПЧ-АД также носит емкостной характер. На рисунке 5.9 изображена осциллограмма пассивного тока i_p схемы без дросселей и фильтров. На рисунке 5.10 изображена осциллограмма тока резонансной цепи Т-образного фильтра, который находится в противофазе пассивному току, стремясь его скомпенсировать.

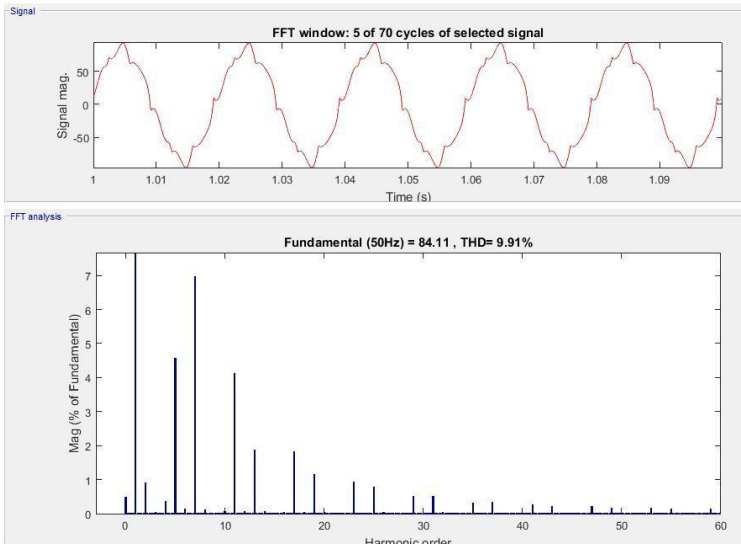


Рисунок 5.7 Осциллограмма полного тока i_1 и его спектр. Фильтр Т-образный.

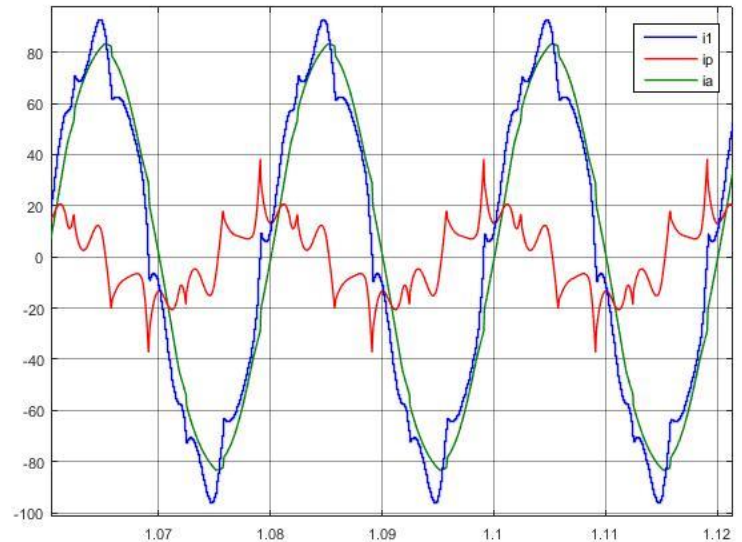


Рисунок 5.8 Осциллограмма полного тока i_1 , активного тока i_a и пассивного тока i_p . Фильтр Т-образный.

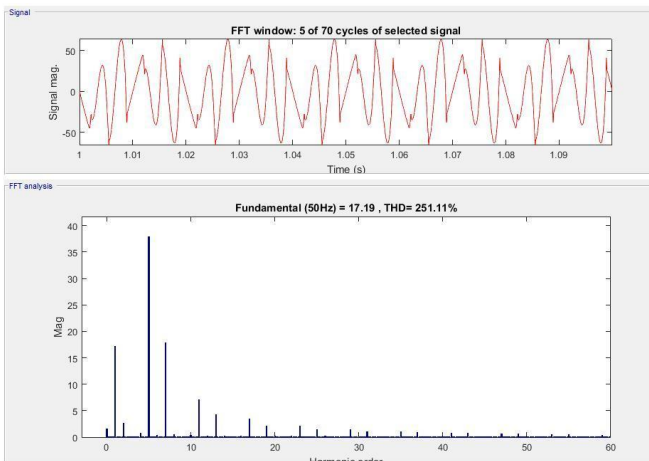


Рисунок 5.9 Осциллограмма пассивного тока i_p в схеме без дросселей и фильтра и его спектр.

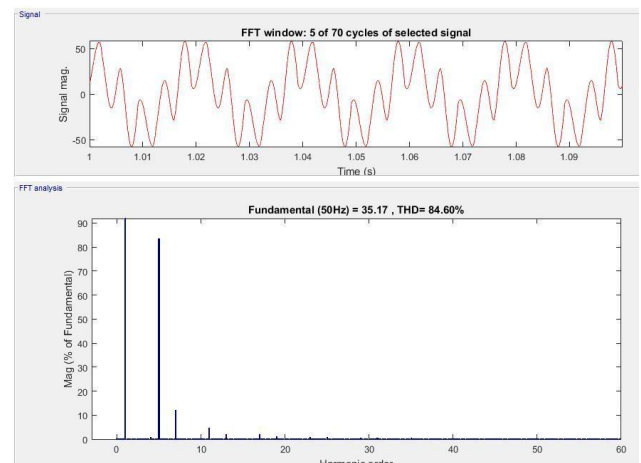


Рисунок 5.10 Осциллограмма тока LC-фильтра и его спектр. Фильтр Г-образный.

В сравнительной таблице 7.1 приведены действующие значения токов для различных фильтров и THDi для разных топологий фильтров гармоник

Таблица 7.1

Измерения	I_1, A	I_a, A	I_p, A	THDi, %
-----------	----------	----------	----------	---------

Г-фильтр	60,09	57,4	15,93	13,49
Т-фильтр	59,43	57,83	13,7	9,9

ВЫВОДЫ

1. Если мощность системы ПЧ-АД соизмерима с мощностью трансформатора ($R_{sc} < 200$), от которого она получает питание то оснащение такой системы дросселями в разных сочетаниях не ограничивает уровень гармоник тока до значений предписанных действующим ГОСТ30804.3.12-2013 [IEC 61000-3-12:2004].
2. Если мощность системы ПЧ-АД существенно ниже мощности трансформатора от которого она питается ($R_{sc} > 200$), то при правильном подборе дросселя или сочетания дросселей можно ограничить уровень гармоник до значений предписанных действующим ГОСТ30804.3.12-2013 [IEC 61000-3-12:2004].
3. Т-образный фильтр более эффективен притех же затратах на производство, чем Г образный фильтр.

ЛИТЕРАТУРА

1 ГОСТ32144-2013 [EN 50160:2010,NEQ] Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения;

2 ГОСТ30804.3.2-2013 [IEC 61000-3-2:2004]. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16А (в одной фазе);

3 ГОСТ30804.3.12-2013 [IEC 61000-3-12:2004]. Нормы гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16А, но не более 75А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электроснабжения;

4 ГОСТ Р 51317.3.4-2006 [IEC 61000-3-4:1998] Ограничение эмиссии гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током более 75А, подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения.

5. Budeany, C. Problème de la présence des puissances réactives dans les installations de production et distribution d'énergie électrique [Text] / C. Budeany // Rap. et discuss. Sur la puissance réactive. – 1929. – Pt. 3. – P. 117-218.

6. Fryze, S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmigen Verlauf von Strom und Spannung [Text] / S. Fryze // Elektrotechn. Z. – 1932. – 25. – S. 596-599; 26. –S. 625-627; 29. – S. 700-702.

7 Фильтры гармоник – гарантия электромагнитной совместимости и высокой эффективности инверторных приводных систем. Ярослав Чорник, Мирослав Лукевски. ООО «ELHAND TRANSFORMATORY», Люблинец, Польша.

8 IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Std 519™-2014.

9 Meeting IEEE 519-1992 Harmonic Limits Using HarmonicGuard® Passive Filters. Written By: John F. Hibbard, Michael Z. Lowenstein,

10 Harmonic filter white paper. Written By Andrzej Pietkiewicz, Ph.D., Project manager Innovation Center Schaffner EMV AG , Stefan Melly, Business Development Manager Schaffner EMV AG.

11 Правильный выбор пассивных и активных фильтров подавления сетевых гармоник. Анджеј Петкевич (Andrzej Pietkiewicz), руководитель проекта, инновационный центр, Schaffer EMV AG, Стефан Мелли (StefAn Melly), директор по управлению бизнесом, Schaffer EMV AG

12 С.П.Лохов. Энергетические составляющие мощности вентильных преобразователей. Часть 1. Однофазные цепи. Челябинск Издательство ЮУрГУ 1999.