



МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ**



РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, ПАО «Газпром нефть»

**Общие принципы нормирования
несинусоидальности тока и напряжения
в системе электроснабжения
нефтеперерабатывающих предприятий**

Ершов М.С., д.т.н., профессор

Чернев М.Ю., аспирант

Пфафенрот Е.В., руководитель
направления управления технического
развития и энергоэффективности

Москва, 2020

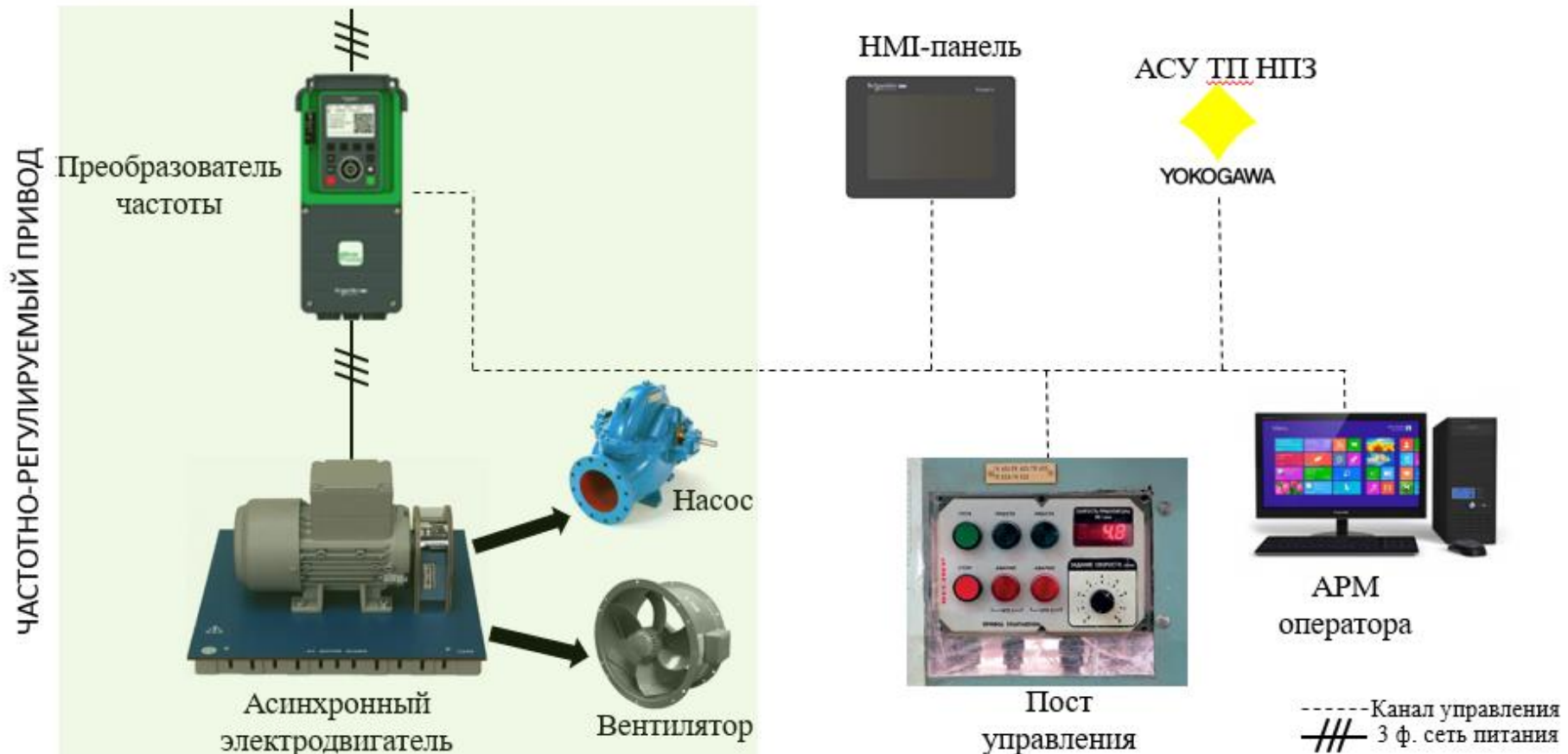
Цель работы

Разработка методики анализа и алгоритмов принятия решений по ограничению влияния гармонических искажений тока и напряжения на электрооборудование на стадии проектирования, эксплуатации и модернизации промышленных систем электроснабжения

Теоретические и прикладные задачи

- ❑ 1. **Анализ тенденций роста и распределения установленной мощности нелинейных электроприемников** нефтеперерабатывающего производства (НПП) между технологическими установками **(на примере Московского НПЗ)**.
- ❑ 2. **Анализ и выбор показателей нормирования гармонических составляющих** напряжения и тока для узлов нагрузки и элементов СЭС НПП.
- ❑ 3. **Разработка** на основе отечественной и международной базы стандартов **методики принятия решений по ограничению влияния гармонических искажений тока и напряжения** на электрооборудование промышленных систем электроснабжения **на стадии проектирования, эксплуатации и модернизации**, позволяющая сбалансировать применение ЧРП и другой преобразовательной техники в промышленных системах электроснабжения с учетом электромагнитной обстановки.
- ❑ 4. **Апробация разработанной методики** по ограничению влияния гармонических искажений тока и напряжения на безопасную эксплуатацию электрооборудования на примере типовых систем электроснабжения технологических участков НПП **(на примере Московского НПЗ)**.

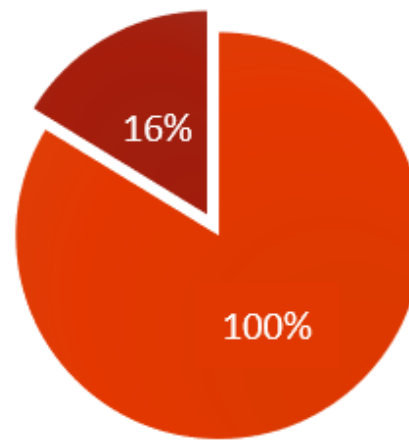
Структура частотно-регулируемого привода



Рост состава и характеристика нелинейных электроприемников нефтеперерабатывающих производств (на примере Московского НПЗ) (1/2)

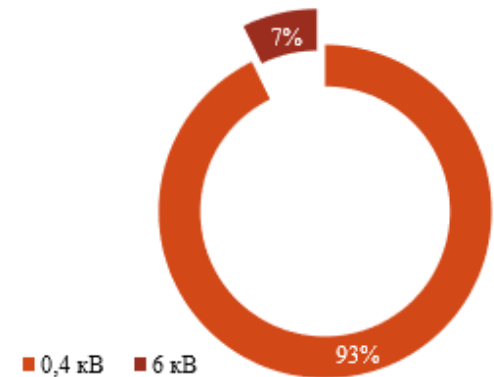


Хронология внедрения ЧРЕ



■ Мощность потребляемая НПЗ ■ ЧРЕ

Доля установленной мощности ЧРЕ



■ 0,4 кВ ■ 6 кВ

Распределение ЧРЕ по классу напряжения



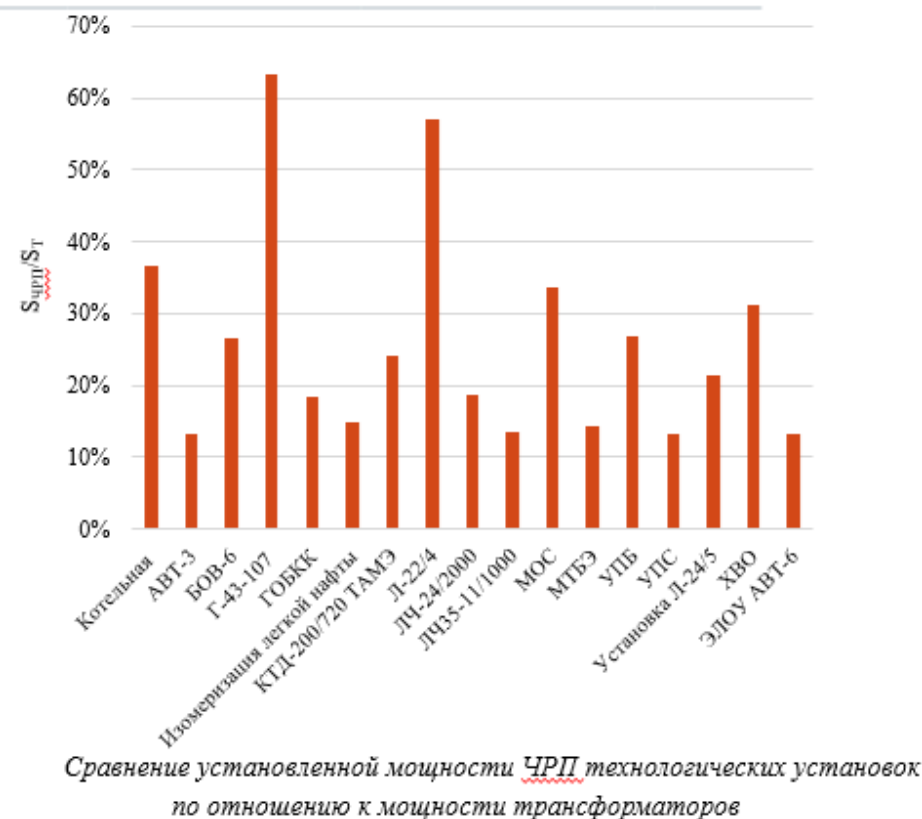
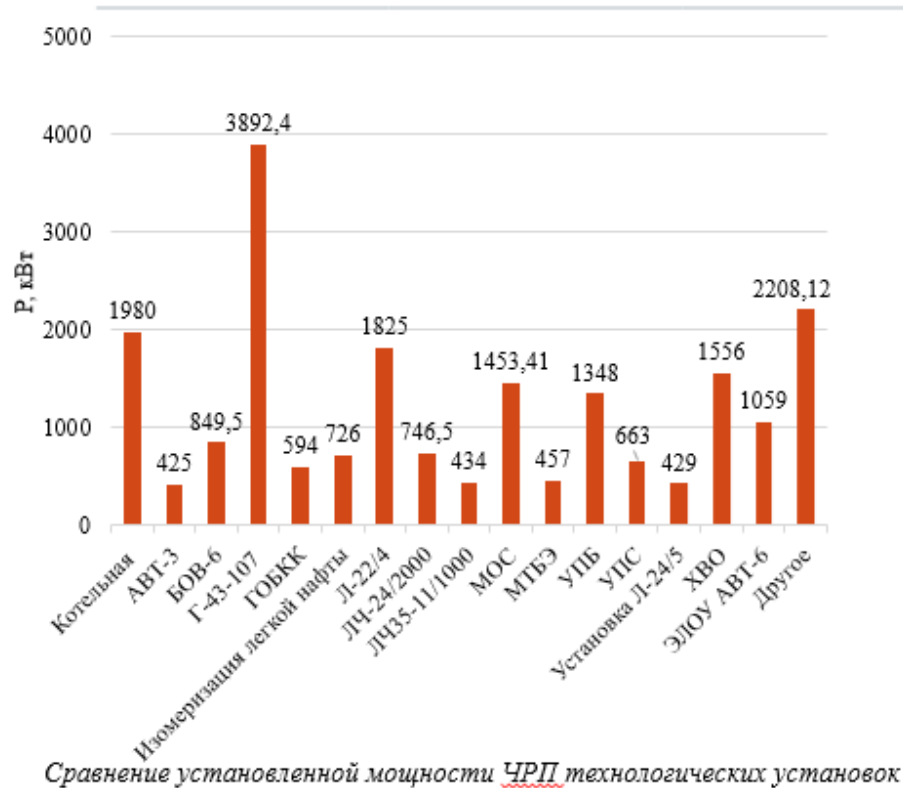
ABB

Schneider
Electric

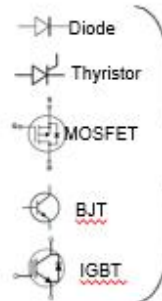
SIEMENS

ВЕСПЕР

Рост состава и характеристика нелинейных электроприемников нефтеперерабатывающих производств (на примере Московского НПЗ) (2/2)

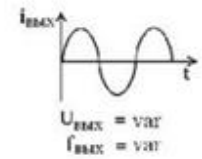
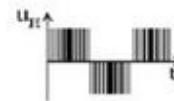
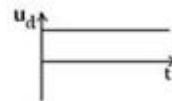
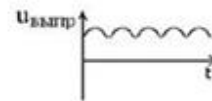
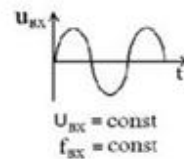
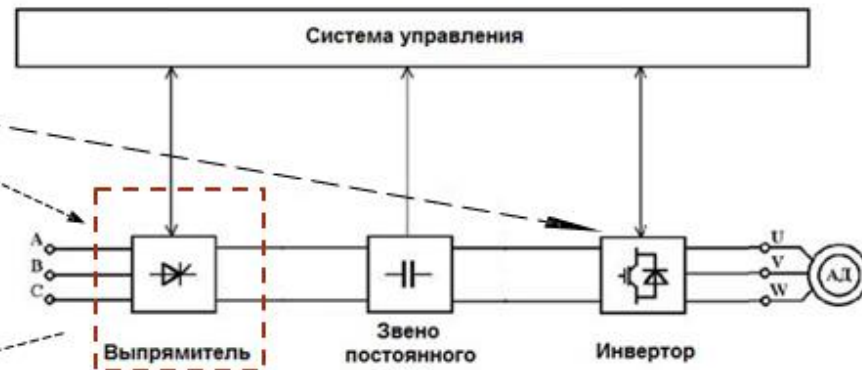


Причина возникновения гармонических искажений тока и напряжения

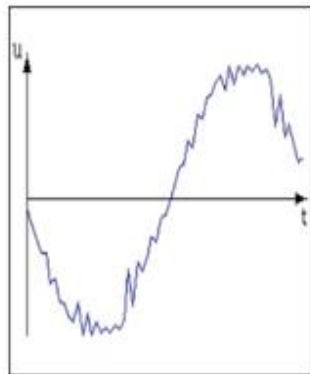


Силовая электроника

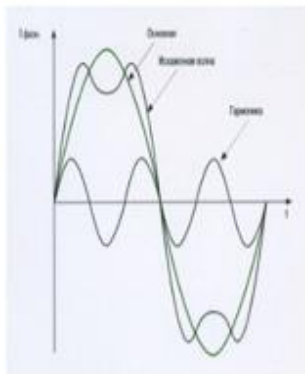
СТРУКТУРА ЧРП



Преобразование энергии преобразователем частоты с промежуточным звеном постоянного тока

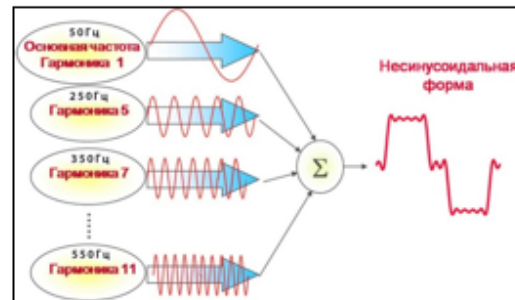


Реальная форма напряжения при нелинейной нагрузке



Искажение синусоидального напряжения и появление гармонических составляющих

Последствия воздействия высших гармоник тока и напряжения на эксплуатацию электрооборудования



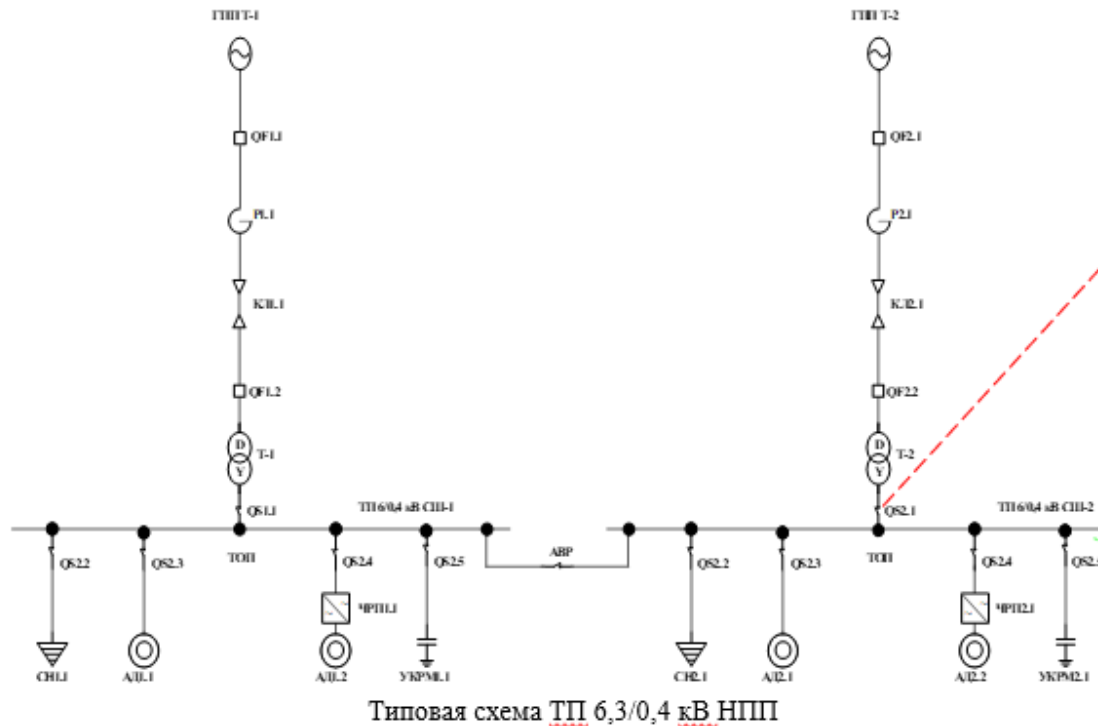
Последствия воздействия
высших гармоник тока

Последствия воздействия
высших гармоник напряжения

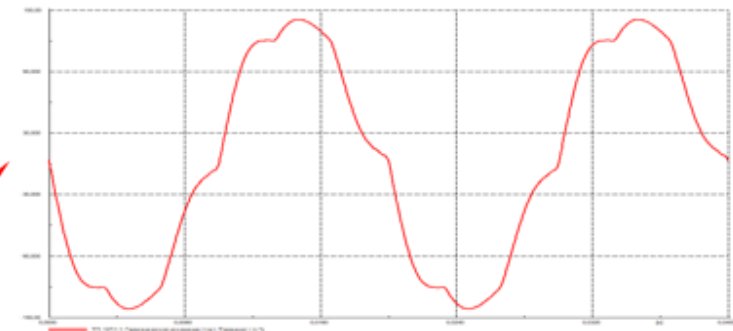
Конденсаторные батареи	Уменьшение срока службы конденсаторов. Возможность значительного усиления токов из-за возникновения резонансов.
Электродвигатели	Сокращение срока службы двигателя, ограничение допустимого коэффициента загрузки из-за увеличения потерь.
Предохранители / выключатели	Ложная работа и возможность повреждения элементов РЗА. Возникновению вибраций и акустических шумов.
Трансформаторы	Увеличение потерь в меди, ограничение допустимого коэффициента загрузки. Возникновению вибраций и акустических шумов
Кабели	Увеличением потерь, ограничение допустимого коэффициента загрузки. Перегрузка нулевого проводника.

Трансформаторы	Увеличение шума, преждевременное старение изоляции из-за повышенного напряжения.
Кабели	Преждевременное старение изоляции из-за повышенного напряжения.
Электродвигатели	Увеличение шума, механическая усталость, преждевременное старение изоляции из-за повышенного напряжения, пульсирующий и уменьшенный крутящий момент.
Конденсаторные батареи	Значительное усиление напряжения из-за возникновения резонансов.
Электронные устройства	Сбои в работе измерительных приборов и системы дистанционной связи.

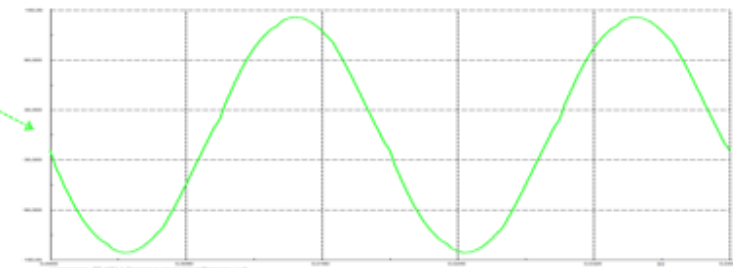
Нормирование гармонических составляющих напряжения и тока для узлов нагрузки и элементов СЭС НПП



ТОП - точка общего присоединения



Синусоида тока с учетом гармонических искажений в точке общего присоединения



Синусоида напряжения с учетом гармонических искажений в точке общего присоединения

Системные показатели нормирования гармонических составляющих напряжения в основных узлах нагрузки СЭС НПП

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (СКГСН) или Total Harmonic Distortion Voltage (THD(U)).

$$\text{СКГСН} = \text{THD}(U) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U^2}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где n – порядок гармоники;

U_1 – номинальное напряжение электропитания [В];

U_n – напряжение гармонической составляющей [В].

Таблица 1 – Ограничение СКГСН для 95 % времени измерений в течение одной недели согласно ГОСТ-32144-2013

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения, %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6-25	35	110-220
8,0	5,0	4,0	2,0

Нормирование значения СКГСН осуществляется согласно:



Системные показатели нормирования гармонических составляющих тока в основных ветвях нагрузки СЭС НПП

Total Harmonic Distortion (TDD).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_L} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где I_n – ток n-ой гармонической составляющей [А];

I_L – значение максимального продолжительно потребляемого тока нагрузки [А].

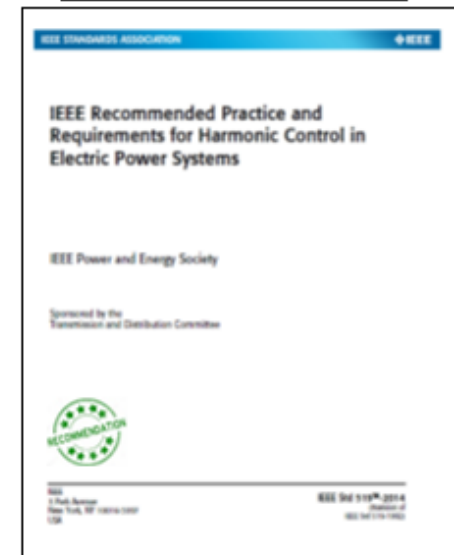
$$S_{кз} = \frac{I_{кз}}{I_L}, \quad (3)$$

где $S_{кз}$ – мощность короткого замыкания

Таблица 2 - Оценка норм эмиссии гармонических составляющих тока для симметричных трехфазных ТС согласно IEEE Std 519-2014

$I_{кз} / I_L$	Предельно допустимое значение гармонических составляющих тока от максимального тока нагрузки (<u>TDD</u>), %
<20	5
20<50	8
50<100	12
100<1000	15
>1000	20

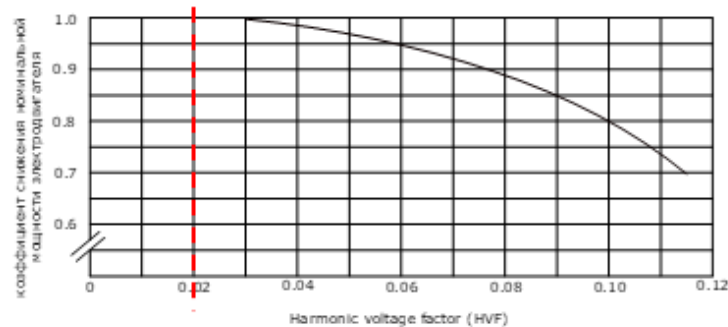
Нормирование значения TDD
осуществляется согласно:



Индивидуальные показатели для контроля ресурса основных элементов СЭС НПП Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

Взвешенный коэффициент искажения напряжения двигателя (ВКИНД) или Harmonic Voltage Factor (HVF)

$$\text{HVF (ВКИНД)} = \sqrt{\sum_{n=2}^{13} \frac{(U_n)^2}{n}} \quad (4)$$



Коэффициент снижения мощности электродвигателя
как функция HVF (ВКИНД)

Нормирование значения HVF
осуществляется согласно:



Индивидуальные показатели для контроля ресурса основных элементов СЭС НПП *Установка компенсации реактивной мощности*

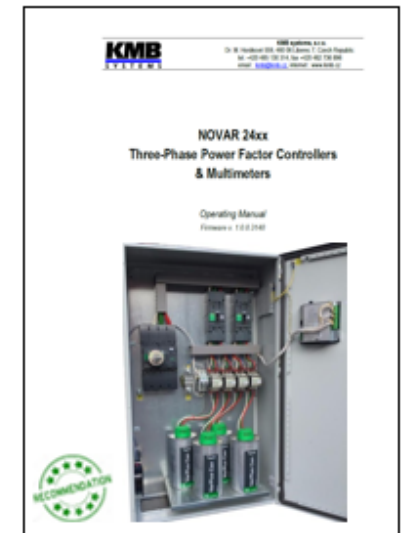
Коэффициент гармонической нагрузки конденсаторов (КГНК) или capacitor harmonic load factor (CHL)

$$\text{КГНК} = \sqrt{\sum_{n=1}^N \left(\frac{n \cdot U_n}{U_{\text{ном}}} \right)^2} \cdot 100\% \quad (5)$$

Таблица 3 - Примеры значений коэффициента КГНК для некоторых выборок ВГ напряжения при нормальном значении первой гармоники ($U_1 = U_{\text{ном}}$).

Пример выборки	<u>Значение ВГ напряжения, %</u>									CHL, %
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	
1	2.5	3.5	2.5	1	2	1.5	0.8	1	0.5	110
2	3.5	4.5	3.5	1.2	2.5	2.0	1.0	1.5	1.0	118
3	5.0	6.0	5.0	1.5	3.5	3.0	0.5	2.0	1.5	133
4	5.5	6.5	5.5	2.0	4.0	4.0	1.8	2.3	1.8	146
5	8.0	9.0	8.0	6.0	7.0	7.0	2.3	4.0	3.5	208

Нормирование значения CHL
осуществляется согласно:



Индивидуальные показатели для контроля ресурса основных элементов СЭС НПП Кабельная линия с ПВХ изоляцией

Оценка эффекта нагрева кабельной линии (Heating Derating Factor (HDF))

$$\text{HDF} = \sum_{n=1}^N \left[\left(\frac{I_n}{I_{\text{RMS}}} \right)^2 \cdot \frac{R_n}{R_1} \right] \quad (6) \quad I_{\text{RMS eff}} = \frac{1}{\sqrt{\text{HDF}}} \quad (7)$$

где I_{RMS} – действующее значение тока нагрузки [А]; R_n – сопротивление проводника на частоте n -й гармоники, [Ом]; R_1 – активное сопротивление кабеля на промышленной частоте.

Для расчета данного коэффициента необходимо рассчитать активное сопротивление кабеля для каждой n -ой гармоники:

$$R_n = R_1 \sqrt{n} \quad (8)$$

Значение рабочей температуры кабельной линии в условиях перегрузки токами высших гармоник рассчитывается:

$$\theta_{\text{op}} = \theta_A + 40 \cdot \text{HDF}, \quad (9)$$

где θ_A – температуру окружающей среды [°C]; θ_{op} – рабочая температура кабельной линии [°C].

Нормирование значения HDF
осуществляется согласно:



Индивидуальные показатели для контроля ресурса основных элементов СЭС НПП Сухой силовой трансформатор

K-FACTOR

$$k - factor = \sum_{n=2}^N \left(\frac{I_n}{I_{rms}} \right)^2 \cdot n^{1.5} \quad (10)$$

Таблица 4 - Соответствие между $k-factor$ и $k_3 k-factor$

k-factor, o.e.	<2	2.0	3.0	4.0	5.0	7.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	15.0	17.0	20.0
$k_3 k-factor$, o.e.	1	1.02	1.04	1.06	1.08	1.12	1.15	1.17	1.19	1.2	1.22	1.25	1.28	1.33

$$S_{T k-factor} = \frac{S_T}{k_3 k-factor}, \quad (11)$$

где S_T – номинальная мощность силового трансформатора [кВА];

$S_{T k-factor}$ – максимальная допустимая мощность силового трансформатора с учетом несинусоидальности тока [кВА];

$k_3 k-factor$ – коэффициент допустимой загрузки сухого трансформатора с учетом несинусоидальности тока.

Нормирование значения $k-factor$ осуществляется согласно:



Индивидуальные показатели для контроля ресурса основных элементов СЭС НПП *Сухой силовой трансформатор и Установка компенсации реактивной мощности*

Требования производителей электрооборудования к уровню несинусоидальности напряжения

Для безопасной эксплуатации силового электрооборудования в СЭС НПП, содержащих ЧРП, его производители устанавливают собственные требования к уровню СКГСН в зависимости от технических характеристик их оборудования.

- Для сухого трансформатора с литой изоляцией Trihal стандартного исполнения производства Schneider-Electric согласно требованиям производителя, значение СКГСН_T не должно превышать 5%.
- Для УКРМ классического исполнения без фильтрующих дросселей компаний ООО «КВАР» значение СКГСН_{УКРМ} не должно превышать 1%.

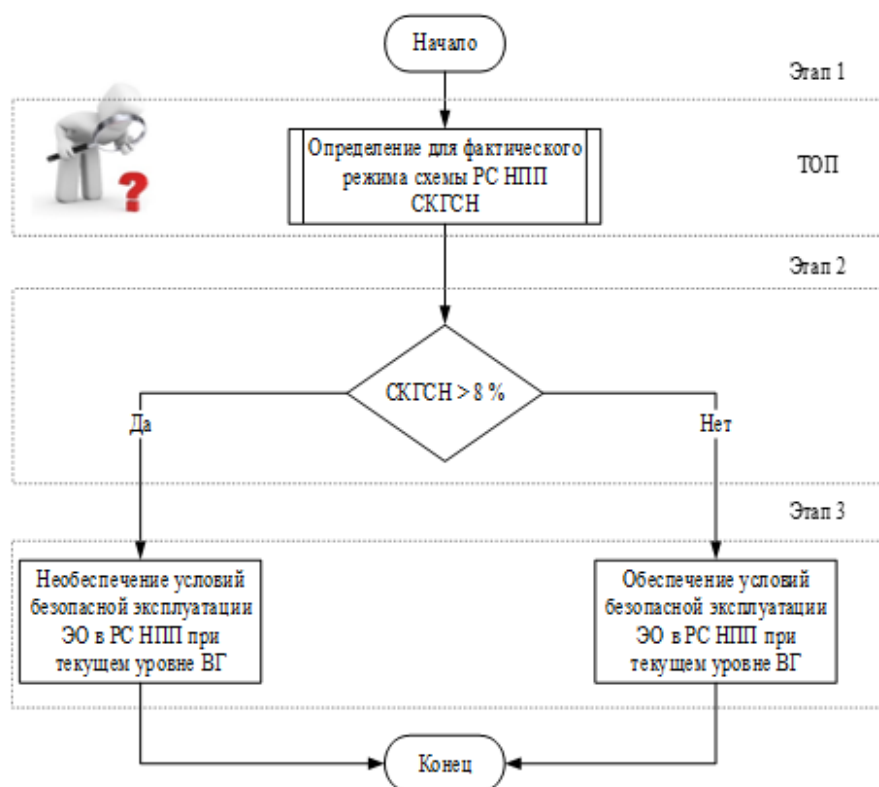


Schneider
Electric



КВАР
СЕРТУКОВСКИЙ КОНДЕНСАТОРНЫЙ ЗАВОД

Последствия применения текущего подхода к анализу влияния уровня гармонических искажений напряжения на эксплуатацию ЭО (1/2)



Тип оборудования	Требования ГОСТ 32144-2013 к значению СКГСН, %	Текущее значение СКГСН, %	Решение специалиста
УКМ58-0,4-300-25 УЗ [стандартного исполнения]	<ul style="list-style-type: none"> НД: 8% ПД: 12% 	3,67%	<ol style="list-style-type: none"> Соответствие требованиям ГОСТ-32144-2013. Разработка мероприятий не требуется. Ввод в эксплуатацию УКРМ.



График коэффициентов искажения синусоидальности междофазных напряжений

ПОСЛЕДСТВИЯ ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ УКРМ > ВЫХОД ИЗ СТРОЯ УКРМ

Последствия применения текущего подхода к анализу влияния уровня гармонических искажений напряжения на эксплуатацию ЭО (2/2)

На примере УКРМ классического исполнения производства ООО «КВАР»

Тип оборудования	Требования ГОСТ 32144-2013 к СКГСН по напряжению	Требования производителя КНИ по напряжению	Текущие значения СКГСН по напряжению	Компетенция специалиста
УКМ58-0,4-300-25 УЗ	НД: 8% ПД: 12%	1%	3,67%	1. Соответствие требованиям ГОСТ-32144-2013. 2. Несоответствие требованиям производителя 3. Требуется разработка мероприятий. 4. Ввод в эксплуатацию УКРМ запрещен.

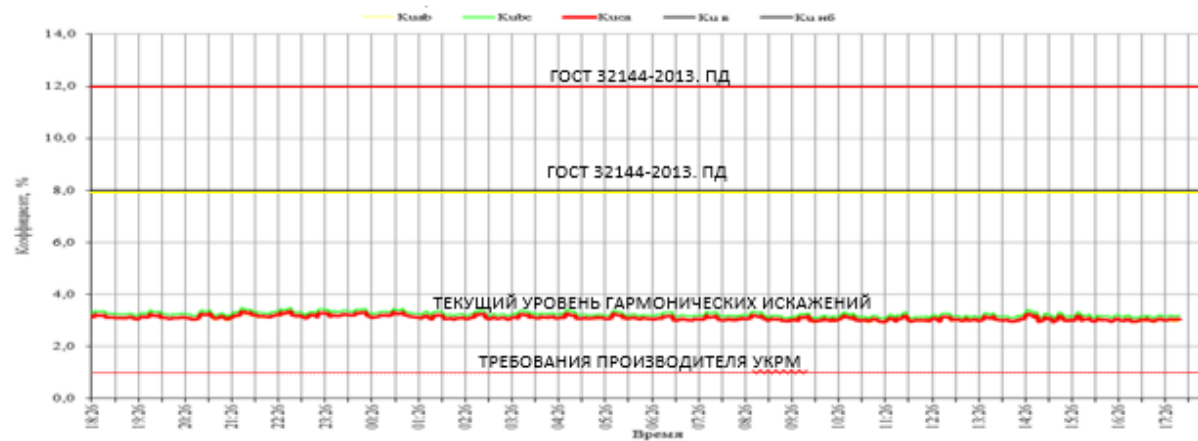


График коэффициентов искажения синусоидальности междофазных напряжений

**ВЫВОД: ЗАПРЕТ ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ УКРМ,
ТРЕБУЕТСЯ РАЗРАБОТКА КОРРЕКТИРУЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ.**

Общество с ограниченной ответственностью «КВАР»
02 февраля 2018г. №10 по
64 от 02.02.18

ЗАМЕСТИТЕЛЮ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА,
ГЛАВНОМУ ИНЖЕНЕРУ,
ООО «АЭРОМАШФИТ-ИНВЕСТСЕРВИС»
Савинскому А.В.
Роскош, 117218, Москва, ул. Ермаковского, д. 14,
корп. 3

Уважаемый Александр Павлович!

Настоящим сообщаем, что в результате анализа контрольных замеров качества электроснабжения в контрольных точках Московского НПЗ, представленных в Приложении 1, выявлено применение преобразовательных напряжений с несинусоидальной формой волны, с результатами искажения напряжения на частотах гармоник 5, 7, 11, 13 до 2,5-3 %, в данной ситуации не может быть гарантирована безаварийная эксплуатация УКРМ производства ООО «КВАР», установленных на ТЭЦ-14, ТЭЦ-14А, ТЭЦ-14Б, ТЭЦ-15А и ТЭЦ-14В. Применение значений коэффициента гармоник по напряжению при эксплуатации приводит к снижению надежности электроснабжения частоты УКРМ на частотах гармоник, в как правило приводит к увеличению тока на соответствующих частотах, с последующим перегревом конденсаторов и, как следствие, выходу их из строя в последствии.

Для обеспечения безаварийной эксплуатации УКРМ при текущих уровнях гармонических искажений в распределительной сети Вашего предприятия ООО «КВАР» настоятельно рекомендует вам обратиться к нашим специалистам для установления фактора компенсации тока в устройстве компенсации.

Модуляция данных существующих УКРМ экономически нецелесообразна, так как требуется замена практически всех элементов.

В зависимости от уровня коэффициента гармоник напряжения (ТНВ) на ООО «КВАР» принята следующая классификация типов оборудования:

1) ТНВ - 1-2 % - применяется УКРМ классического исполнения ООО «КВАР».

2) 2%-ТНВ-6% - УКРМ с факторно-компенсирующей цепью (с усилителями компенсации и защитными дросселями), в зависимости от доминирующей гармоника в спектре напряжения.

3) гармоника (210Гц) и выше не должна быть не более - 180 Гц.
11 гармоника (231Гц) и выше не должна быть не более - 110 Гц.

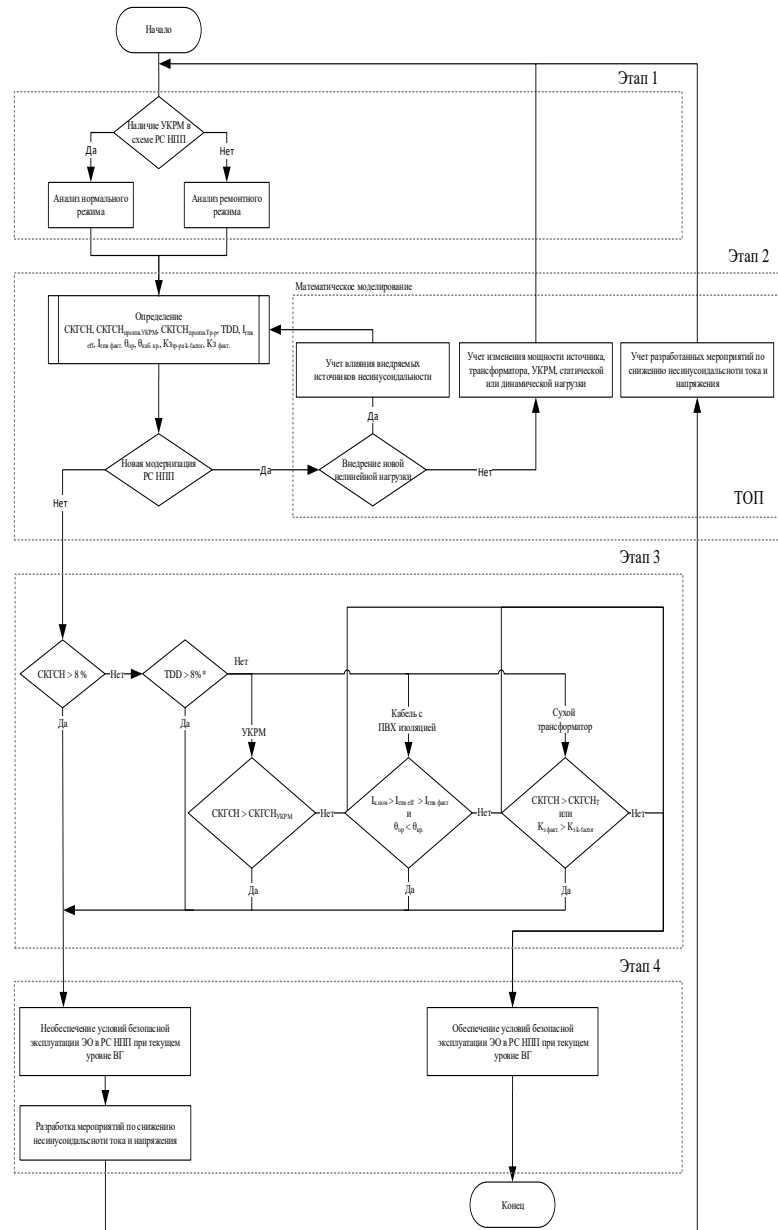
3) ТНВ-6% (показатель ГОСТ 2833) - требуется применение фактора вытеснения гармоник активного или пассивного характера.

УКРМ, установленные на ТЭЦ-13, на основании предоставленного анализа контрольных замеров качества электроснабжения рекомендуется ввести в работу, искажения напряжения на частотах гармоник не более 1%.

Заместитель директора по СТО

А.В. Романовский

Предлагаемый алгоритм анализа влияния уровня гармонических искажений тока и напряжения в ТОП на стадии эксплуатации и модернизации СЭС НПП



Апробация предлагаемый алгоритм анализа влияния уровня гармонических искажений тока и напряжения в ТОП на стадии проектирования, эксплуатации и модернизации СЭС НПП (1/3)

Анализ технической возможности ввода в эксплуатацию низковольтных конденсаторных



ПРЕДПОСЫЛКИ

Предназначенные для компенсации реактивной мощности конденсаторные установки (КУ), установленные на ТП – ОТКЛЮЧЕНЫ, т.к. ранее, в период их эксплуатации, фиксировались случаи отключения конденсаторных батарей 0,4 защитой регулятора реактивной мощности из-за нарушения их теплового режима, перегрузки по току, превышения допустимого уровня гармонических искажений, а в некоторых случаях зафиксированы случаи выхода их из строя.

ПРОБЛЕМЫ ТЕКУЩЕГО РЕЖИМА, СВЯЗАННЫЕ С ОТКЛЮЧЕНИЕМ УКРМ НА МНПЗ

- Высокая доля потребления реактивной мощности из внешней сети.
- Неэффективное использование электрооборудования (УКРМ) для оптимизации режима сети и повышения надежности и качества электроснабжения технологических установок.
- Отсутствие онлайн-мониторинга параметров качества ЭЭ в распределительной сети 0,4-6кВ, затрудняющее быструю оценку ситуации и принятие решений электротехническим персоналом.
- Высокая доля установленной мощности нелинейной нагрузки (ЧРП).

ПОСЛЕДСТВИЯ ТЕКУЩЕГО РЕЖИМА, СВЯЗАННЫЕ С ОТКЛЮЧЕНИЕМ КУ НА НПЗ

- Увеличение потерь электроэнергии, снижение пропускной способности линий и трансформаторов, ускоренный износ электрооборудования.
- Снижение уровней напряжения во внутризаводских сетях.
- Снижение устойчивости электротехнической системы к внешним провалам напряжения.
- Ухудшение условий для пуска и самозапуска электродвигателей.



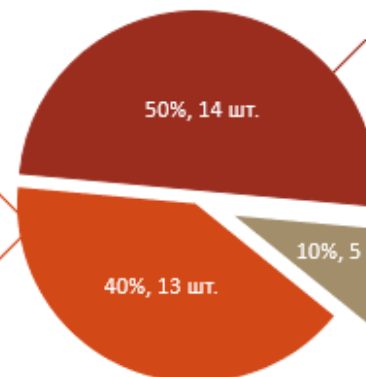
Пример компоновки УКРМ, оснащенной антирезонансным проселом



ООО «К-Электроникс»

Апробация предлагаемый алгоритм анализа влияния уровня гармонических искажений тока и напряжения в ТОП на стадии проектирования, эксплуатации и модернизации СЭС НПП (2/3)

Анализ технической возможности ввода в эксплуатацию низковольтных конденсаторных

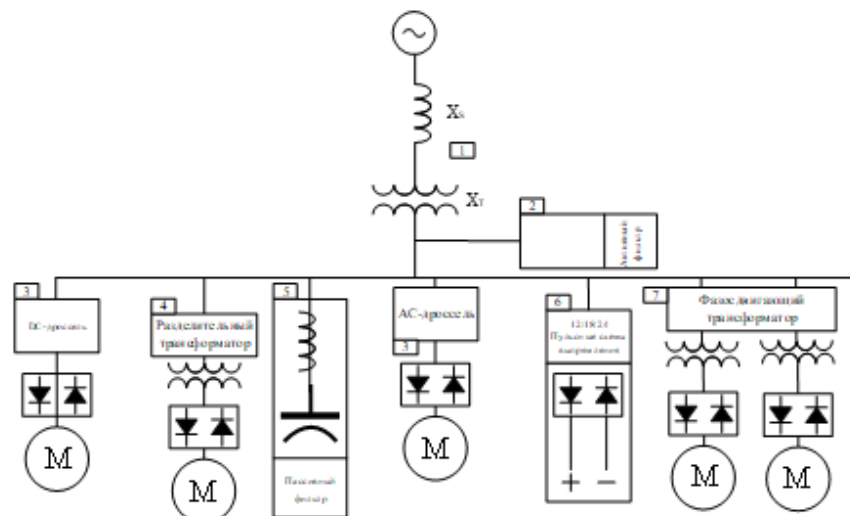


- Рекомендуется ввести в работу.
- УКРМ оснащены антирезонансными дросселями.

- Требования производителя к качеству ЭЭ соблюдены.
- УКРМ не оснащены антирезонансными дросселями.
- Не рекомендуется ввод в работу, т.к. на МНПЗ применяется переменная нелинейная нагрузка и отсутствует онлайн мониторинг параметров качества ЭЭ для оперативного принятия решения.

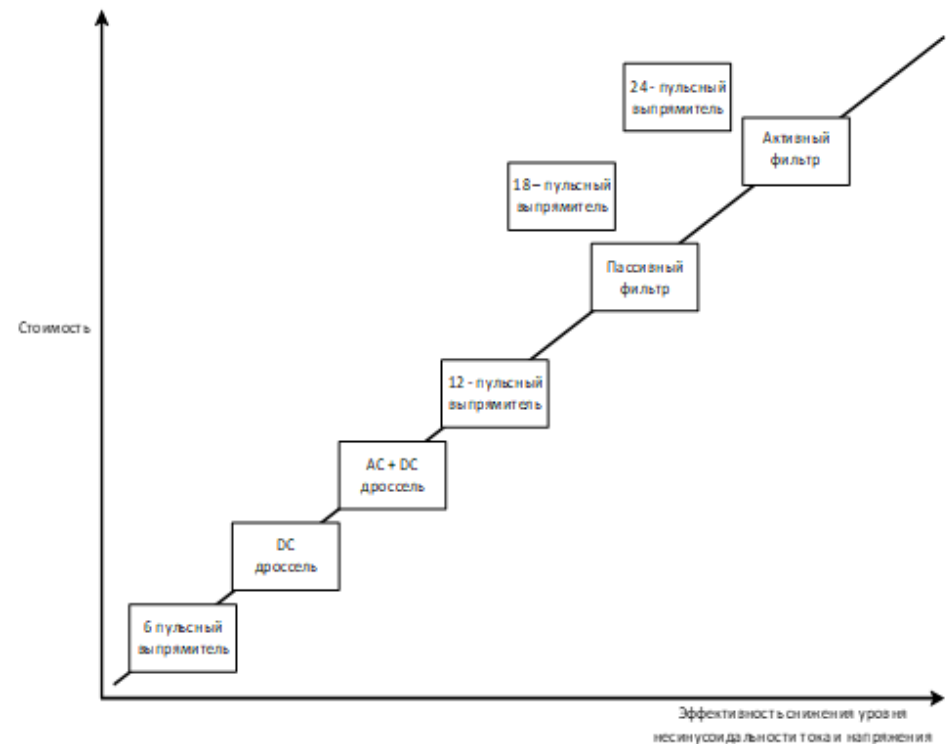
- УКРМ нельзя ввести в работу по причине не обеспечения безаварийной эксплуатации существующих УКРМ при текущем уровне гармонических искажений тока и напряжения.
- Данные УКРМ не оснащены антирезонансными дросселем.

Средства и методы по снижению уровня несинусоидальности в низковольтной СЭС НПП



Структура технических средств, обеспечивающих электромагнитную совместимость электроустановок в низковольтной СЭС НПП, где

- 1- снижение полного сопротивления системы;
- 2- активный фильтр (АФ);
- 3 - AC/DC дросселями;
- 4 - разделительный трансформатор;
- 5- пассивный фильтр;
- 6- преобразователь повышенной пульсности;
- 7 - трансформаторов с различными группами соединения обмоток с многотактными схемами выпрямления



Зависимость эффективности мероприятия по снижению несинусоидальности в сети СЭС НПП и его стоимостью

Заключение

❑ **Выполнен анализ тенденций роста и распределения установленной мощности нелинейных электроприемников нефтеперерабатывающего производства между технологическими установками (на примере Московского НПЗ), выявлены системы электроснабжения с наиболее плохой электромагнитной обстановкой.**

❑ **Выполнен анализ и обоснован выбор системных показателей нормирования гармонических составляющих напряжения и тока для узлов нагрузки и индивидуальных показателей основных элементов систем электроснабжения НПП.**

❑ **Показаны недостатки существующих методик и подходов к анализу уровня гармонических искажений в СЭС НПП, содержащих нелинейную нагрузку, для обеспечения безопасной продолжительной эксплуатации электрооборудования, которые связаны с отсутствием нормирования гармоник тока в системе и нормирования индивидуальных показателей влияния качества электроэнергии на основное электрооборудование.**

❑ **Предложена разработанная на основе отечественной и международной базы стандартов методика принятия решений по ограничению влияния гармонических искажений тока и напряжения на электрооборудование промышленных систем электроснабжения на стадии проектирования, эксплуатации и модернизации, позволяющая сбалансировать применение ЧРП и другой преобразовательной техники в промышленных системах электроснабжения с учетом электромагнитной обстановки для основных видов электрооборудования и системы в целом. Применение методики позволяет выявлять проблему возможного увеличения уровня гармонических искажений тока и напряжения на стадии принятия решения по внедрению новой преобразовательной техники, сокращая риски экономических потерь из-за отказов электрооборудования.**

❑ **Разработанные методические рекомендации апробированы и внедрены в промышленности (ПАО «Газпром нефть – МНПЗ»), а также используются в учебном процессе РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.**



Чернев Максим Юрьевич
аспирант гр. ЭТА-16-01
кафедры ТЭЭП

Благодарю за внимание!



8-916-096-12-61



makcchernev@gmail.com