



Кафедра

Автоматизированные
Электрические Системы



Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б. Н. Ельцина

Уральский
энергетический
институт

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕЖИМА В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ И СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВСЛЕДСТВИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

В.О. Самойленко, Г.И. Уздяев

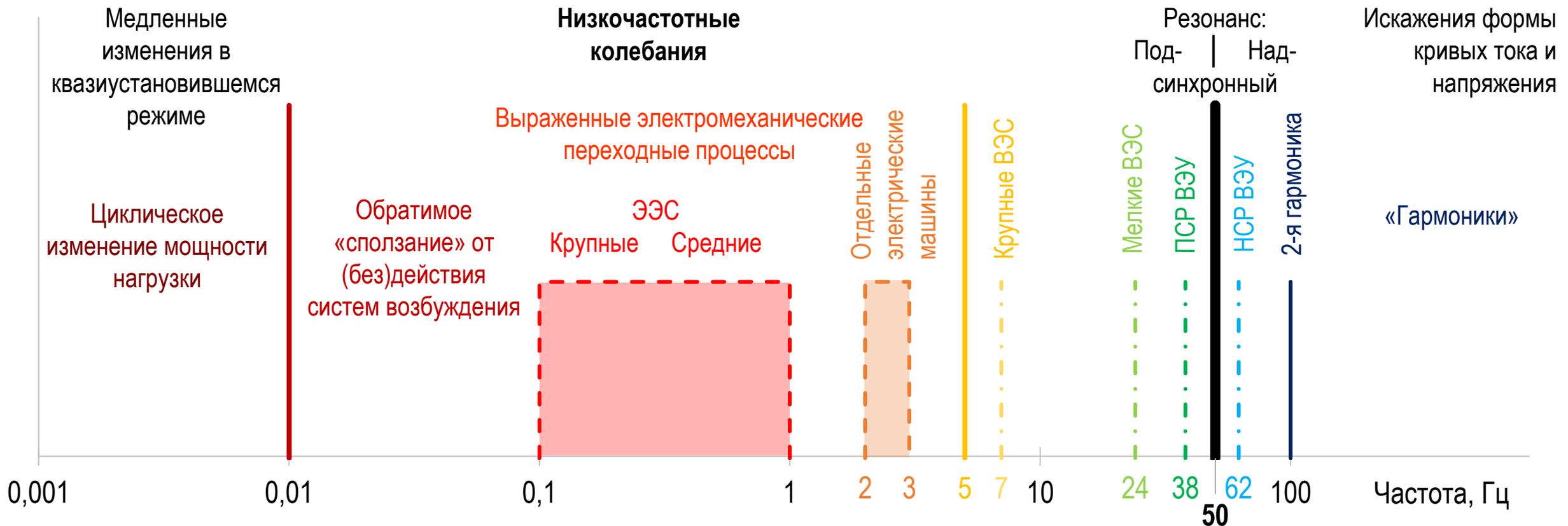
Екатеринбург, 2021



НЕМНОГО ТЕОРИИ



СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТОТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЭЭС



ГОСТ Р 57114-2016: Низкочастотные колебания (НЧК) – периодические изменения параметров электроэнергетического режима с частотой от 0,01 Гц до 5,00 Гц, возникающие в результате **взаимных качаний роторов синхронных машин**.

← Автоколебательные процессы исключаются? ↓ Электромеханический процесс? → Где АД, ЧРП, ВИЭ (FSC, DFIG) и накопители?



ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ НЧК. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

В СССР и РФ – крупные энергосистемы

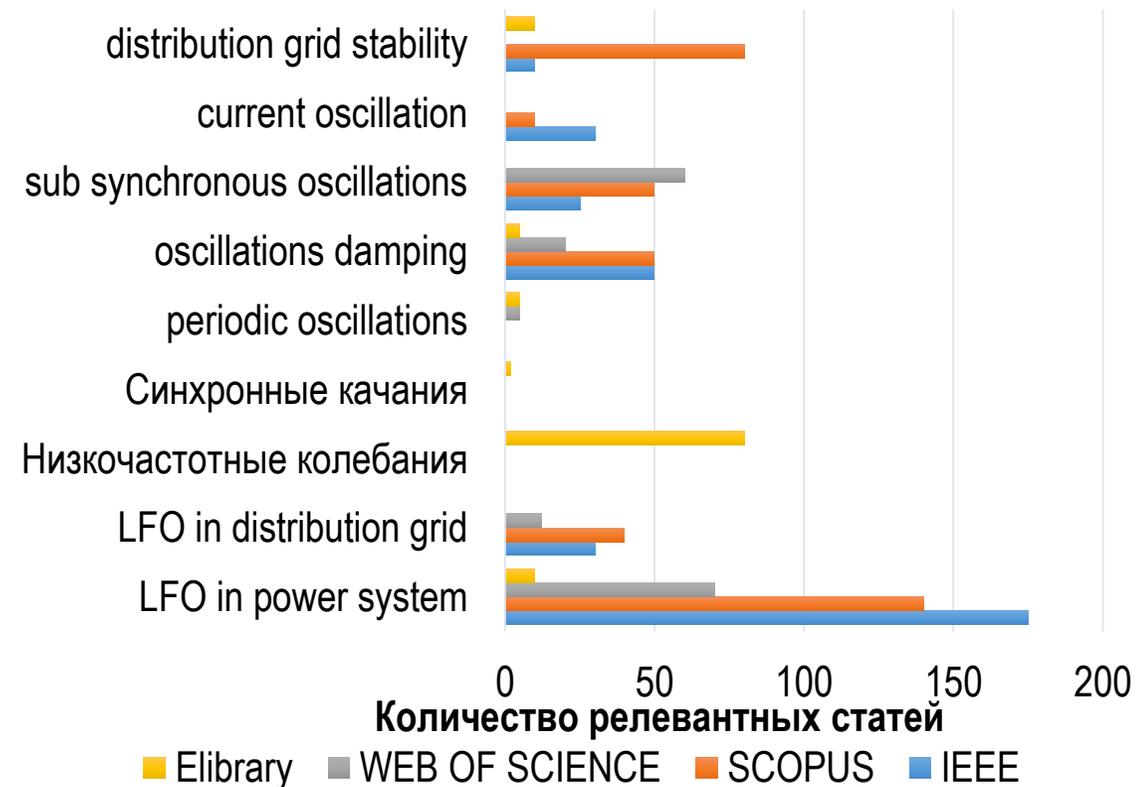
Различные аспекты проявления и влияния НЧК, борьбы с ними изучали и изучают научные школы:

- Московская
- Иркутская
- Новосибирская
- Екб
- СПб
- Нижегородская
- Новочеркасская
- Самарская
- Ивановская
- Южноуральская
- Казанская
- и другие

В СССР и РФ – распределительные сети и системы электроснабжения

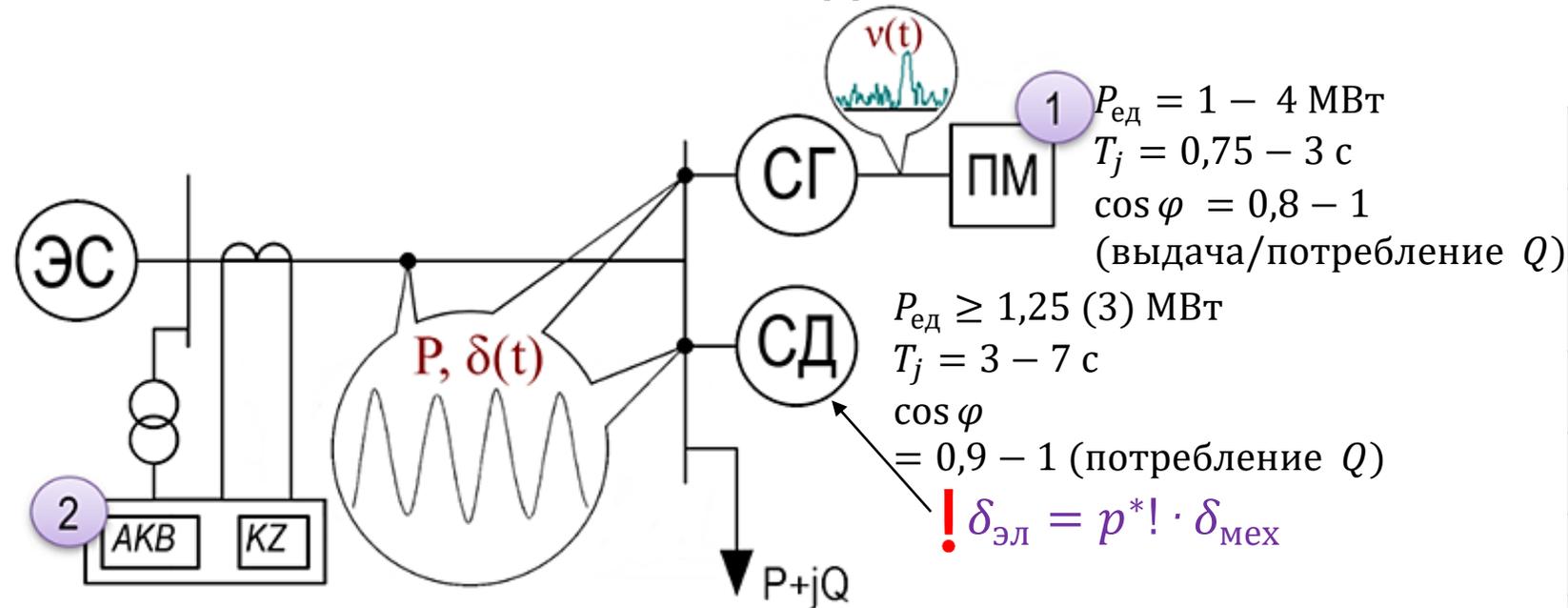
- 1960-1970-е. – опыты с синхронной двигательной нагрузкой в Запорожской и Донецкой областях УССР по определению численных параметров протекания ЭМХ переходных процессов
- 2015-2017 гг. – публикации за авторством Т. Г. Климовой (НИУ «МЭИ», М. В. Савватина (филиал АО СО «ЕЭС» – Московское РДУ) о моделировании НЧК мощности нагрузки

Международные публикации



Количество релевантных статей про НЧК ~15

ПРИЧИНЫ ВЫНУЖДЕННЫХ НЧК В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ



Синхронные машины в промышленности:

Металлургическая отрасль	
Прессы, молоты, станки	$p^* = 6 - 10$
Горнодобывающая отрасль	
Мельницы	$p = 10 - 40$
Дробилки	$p = 10 - 40$
Нефтегазовая отрасль	
Станок-качалка	$p = 2 - 6$
Компрессоры	$p = 6 - 8$
Насосы	$p = 1 - 15$
Установки малой и собственной генерации	
ГПУ, ГТУ, ДГУ	$p = 1 - 4$

p^* – число пар полюсов синхронной машины

Причины НЧК в системах электроснабжения:

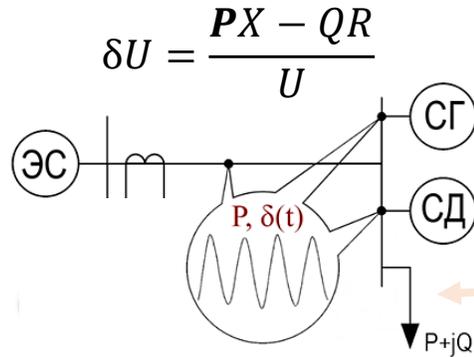
- Технологические отклонения и нарушения в производственных линиях и механизмах, приводимых синхронными двигателями;
- Режим работы промышленных производств с циклическими резкопеременными характеристиками нагрузки;
- Неисправности систем электропривода производственных механизмов;
- Подключение собственной синхронной генерации на предприятии.



ПРИМЕРЫ НЧК ПРИ ОТДЕЛЬНЫХ ВИДАХ НАГРУЗОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ



АНАЛИЗ НАГРУЗОК СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ПРЕДМЕТ ПОТЕНЦИАЛА НЧК



относительно энергосистемы и межмашинные; параллельно с сетью и автономно

относительно энергосистемы; формально только параллельно

Поиск по типу технологич. процесса

Поиск по технологии привода

Непрерывные с неизменной скоростью

Непрерывные с изменяемой скоростью

Циклические

«Твердые»

«Жидкие»

«Газообразные»

Мощные: синхронные двигатели

Мощные: машины постоянного тока за преобраз-ми

Средней и небольшой мощности: асинхронные двигатели с ЧРП

Обработка: многополюсные синхронные двигатели

Перекачка: асинхронные или синхронные двигатели 4 п.

Перекачка: синхронные турбодвигатели

Средней и небольшой мощности: асинхронные двигатели

Средней и небольшой мощности: асинхронные двигатели с ЧРП

Средней и небольшой мощности: асинхронные двигатели

Перемещение: асинхронные двигатели с ЧРП

Подача: асинхронные двигатели

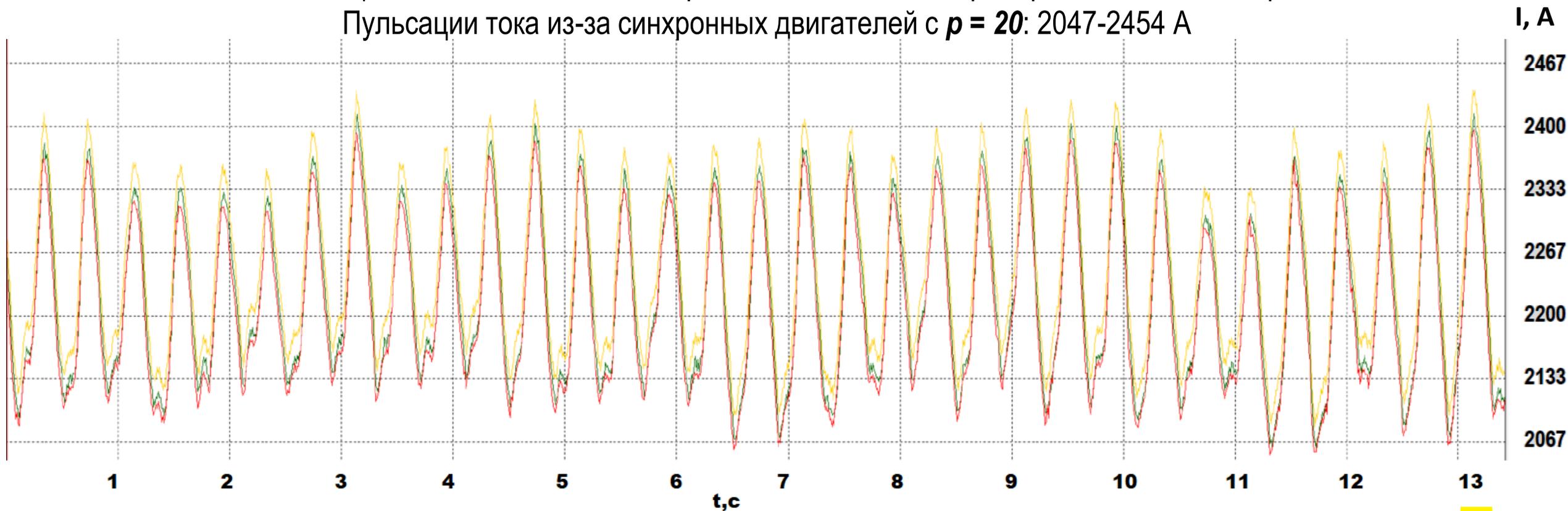
Компрессия: асинхронные двигатели с ЧРП



НЕПРЕРЫВНЫЕ «ТВЕРДЫЕ» НАГРУЗКИ. МЕЛЬНИЦЫ С ПРИВОДОМ ОТ СД

Понижающая ПС 110/6 кВ 25 МВА горно-обогатительного предприятия в Челябинэнерго

Пульсации тока из-за синхронных двигателей с $p = 20$: 2047-2454 А



Размах колебаний: 407 А; 5,44 МВт

Изменение модуля напряжения
в цикле качания 0,8 %

$T = 0,4 \text{ с}$

$\omega = 2,5 \text{ Гц}$

Дисперсия 2,2 %

Срабатывание пусковых органов
II ступени МТЗ подключенных
синхронных двигателей

■ - ф. А
■ - ф. В
■ - ф. С



НЕПРЕРЫВНЫЕ «ТВЕРДЫЕ» НАГРУЗКИ. МЕЛЬНИЦЫ – ЧАСТЫЙ ИСТОЧНИК НЧК

Неполная загруженность барабана в мельницах сухого помола, неполная заливка в мельницах мокрого помола

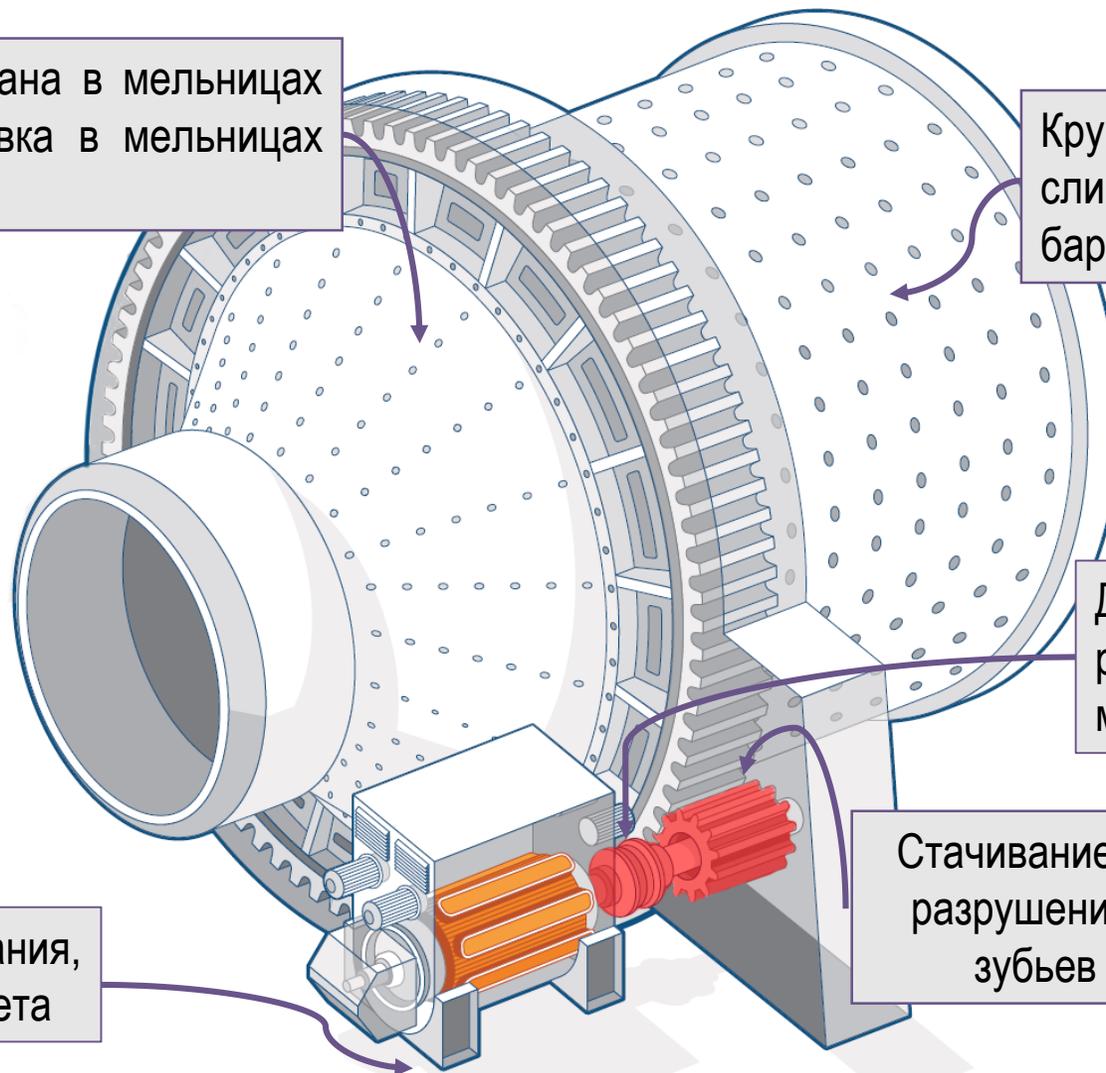
Крупные куски породы и слипнувшаяся, мерзлая масса на барабане

Предельные погрешности в энергостроительстве	δ
Установка анкерно-угловой опоры ВЛ 110-220 кВ	1,0-1,5 м
Установка фотоэлектрической струны на СЭС	8-30 мм
Установка механической части системы электропривода	0,7-1 мм

Неровная заливка основания, нарушение эксцентриситета

Динамические потери в редукторе, смещения валов и муфт валов

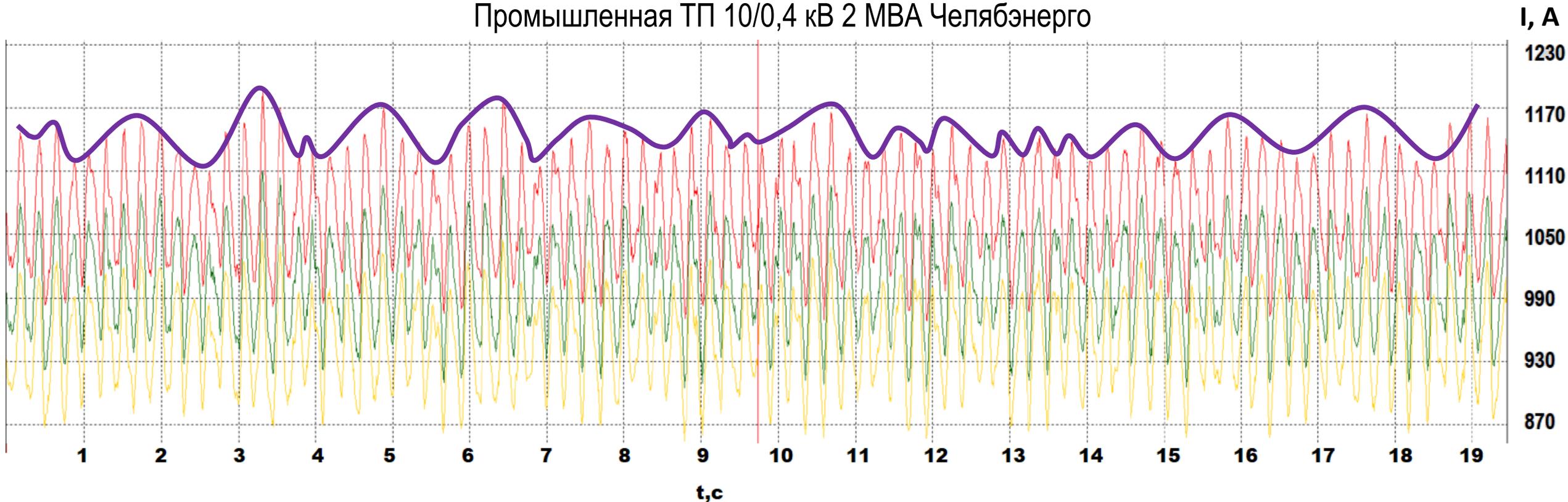
Стачивание, усталостное разрушение (крошение) зубьев шестерен





НЕПРЕРЫВНЫЕ «ТВЕРДЫЕ» НАГРУЗКИ. ДРОБИЛКИ И МОЛОТИЛКИ. ЧРП

Промышленная ТП 10/0,4 кВ 2 МВА Челябэнерго



Размах колебаний: 62 А; 86 кВт;

$T=0,2$ с; $\omega=5$ Гц

Также имеется модуляция 50 А; 70 кВт;

$T=1,5$ с; $\omega=0,7$ Гц

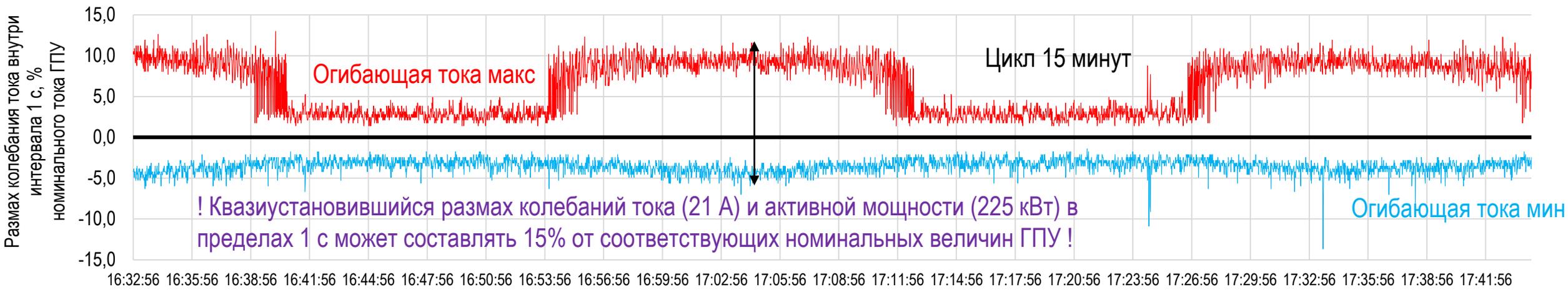
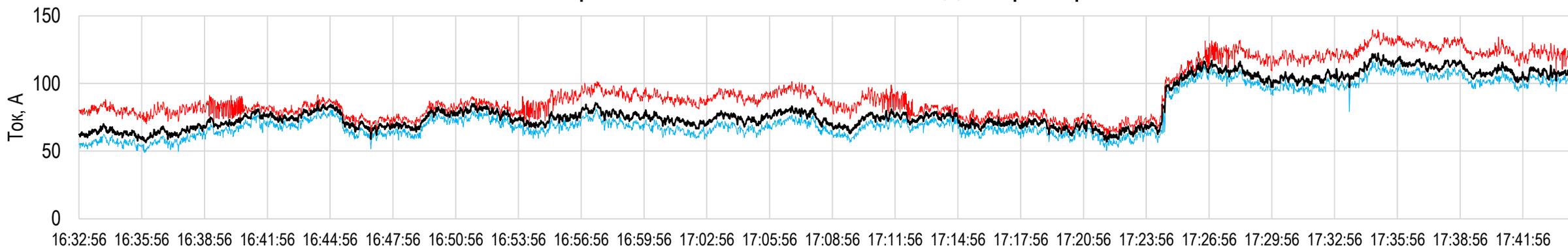
- ЧРП являются источником всех видов возмущений параметров электроэнергетического режима от 0 до 2500+ Гц;
- Обратимые электроприводы схожи с back-to-back преобразователями ВЭУ и склонны к под(над)синхронным резонансам

■ - ф. А
■ - ф. В
■ - ф. С



НЕПРЕРЫВНЫЕ И ЦИКЛИЧЕСКИЕ. «ТВЕРДЫЕ» НАГРУЗКИ. ТРАНСПОРТЕРЫ. ЧРП

Промышленный РП 6 кВ Владимирэнерго

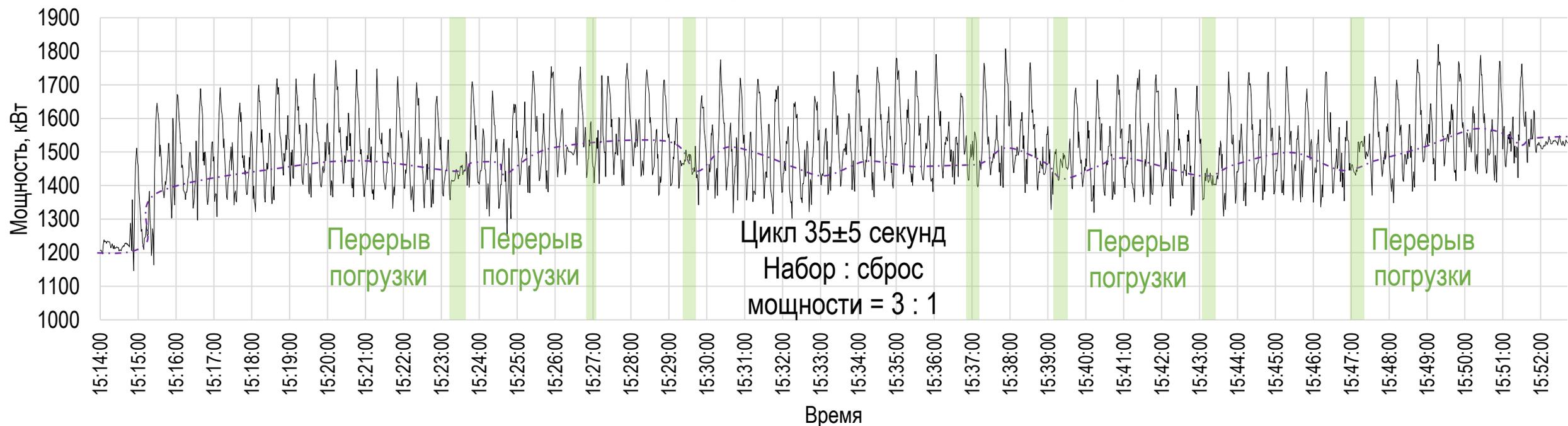


- Особенностью транспортеров является изменение степени загрузки в темпе процесса + циклическое включение-отключение механизмов разгрузки и очистки. Транспортеры совмещают черты непрерывных и циклических нагрузок



ЦИКЛИЧЕСКИЕ «ТВЕРДЫЕ» НАГРУЗКИ. КАРЬЕРНЫЕ ЭКСКАВАТОРЫ

На примере работы ЭКГ-5А в Челябинэнерго

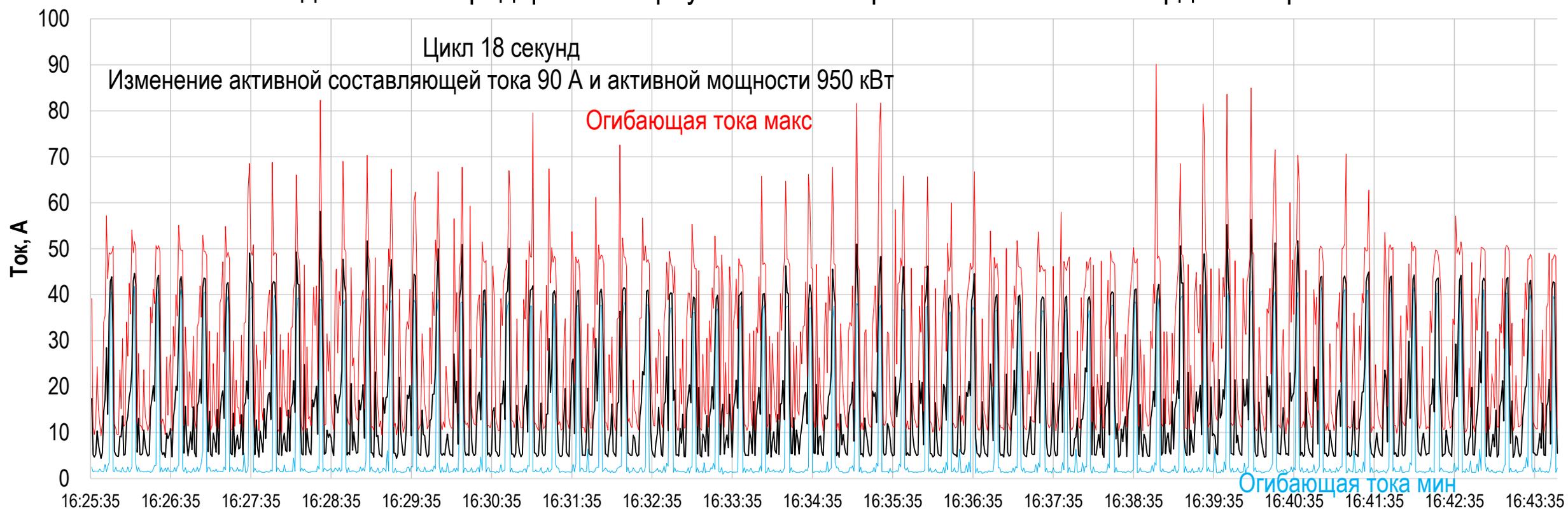


Назначение	Марка	Мощность, кВт	Назначение	Марка	Мощность, кВт	Назначение	Марка	Мощность, кВт
Привод генератора	АЭ113-4У2 или АЭ4-400 L	250 (275)	Напор	ДПЭ-52У1	54	Открытие ковша	ДПЭ-12У2	3,6
Подъем	ДЭ-816У2	200	Ход	ДПЭ-52У1	54	Блок токовых отсечек для стопорных токов	БТ ХХ	-
Поворот	ДПВ-52У1	2 x 60	Охлаждение	ЭК-7В	5,5 кВт			



ЦИКЛИЧЕСКИЕ «ТВЕРДЫЕ» НАГРУЗКИ. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ И СТАНЫ, СБОРОЧНЫЕ КОНВЕЙЕРЫ. ЧРП

Ввод 6 кВ с РП предприятия тароупаковочной промышленности в Свердловэнерго

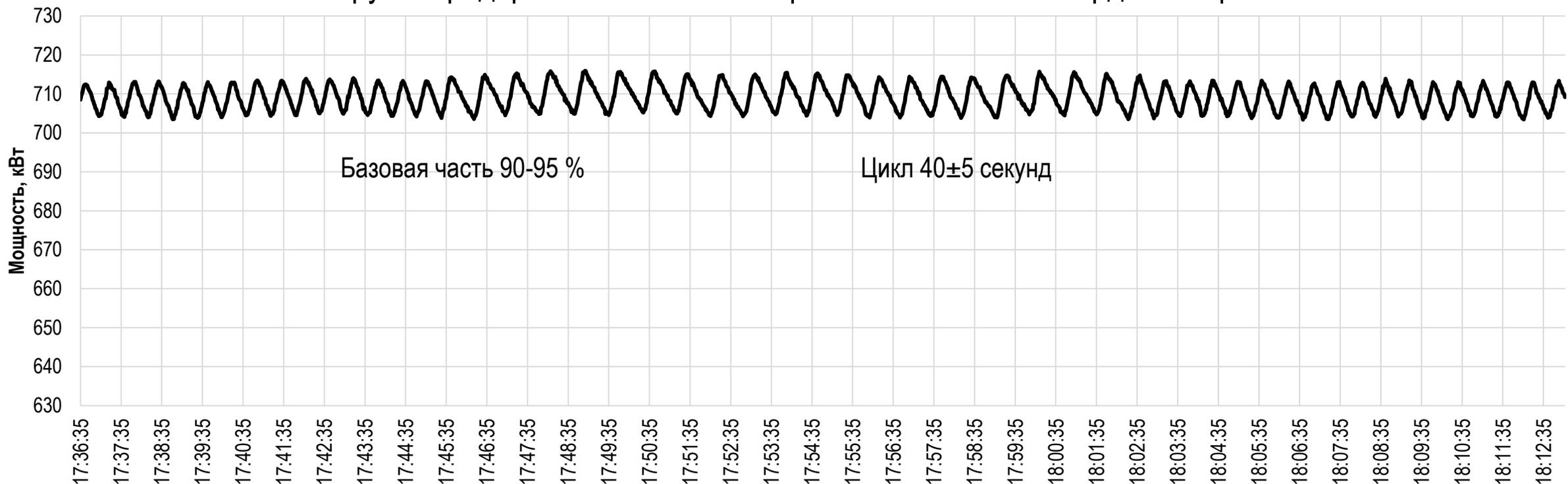


- Мехатронная нагрузка является наиболее проблемной нагрузкой собственной генерации из циклических нагрузок. Электроснабжение подобных нагрузок в автономном режиме в ряде случаев невозможно без дополнительных мероприятий.



НЕПРЕРЫВНЫЕ «ГАЗООБРАЗНЫЕ» НАГРУЗКИ. ПЕРЕКАЧКА И ПОДАЧА. СД

Нагрузки предприятия химической промышленности в Свердловэнерго

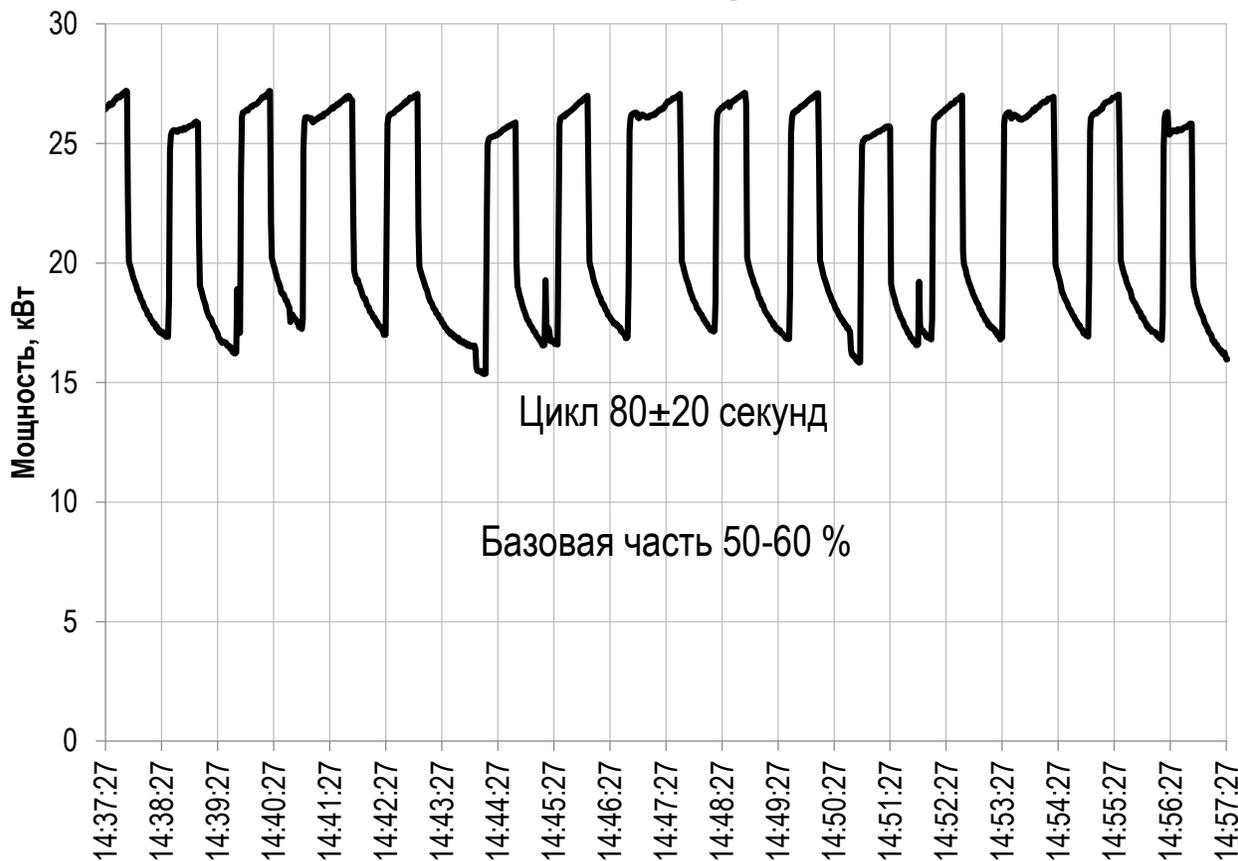


- Периодические автоколебания в газоздушном тракте теоретически возможны, но промышленные системы вентиляции и перекачки газов короткие и относительно не склонны к волновым процессам, а в газопроводных имеется большое затухание;
- Чаще наблюдается циклическое изменение мощности вследствие работы технологической автоматики поддержания давления, при которой постепенно накапливаемое избыточное давление периодически «сравливаются» через байпас или обходной клапан

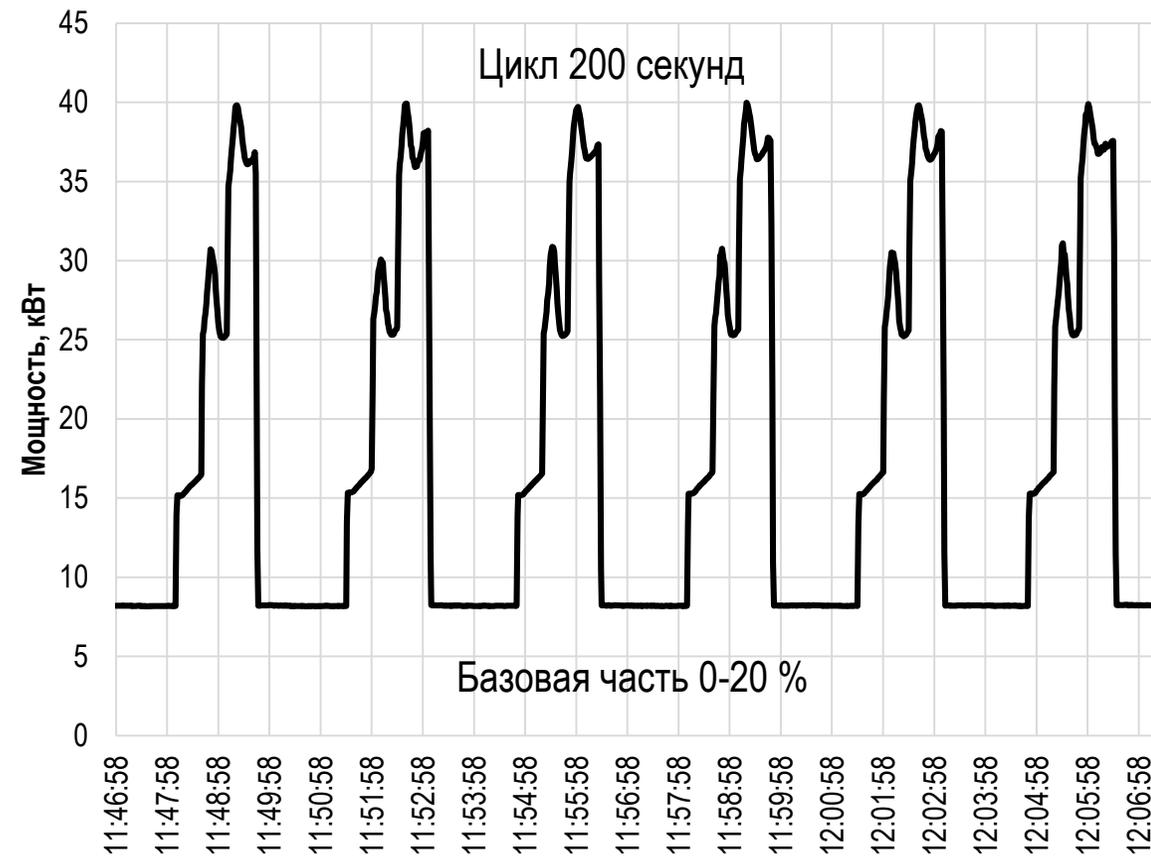


ЦИКЛИЧЕСКИЕ «ГАЗООБРАЗНЫЕ» НАГРУЗКИ. КОМПРЕССОРЫ. ЧРП

Подкачка. Ресиверы



Циркуляция. Холодильные установки и климатическая техника

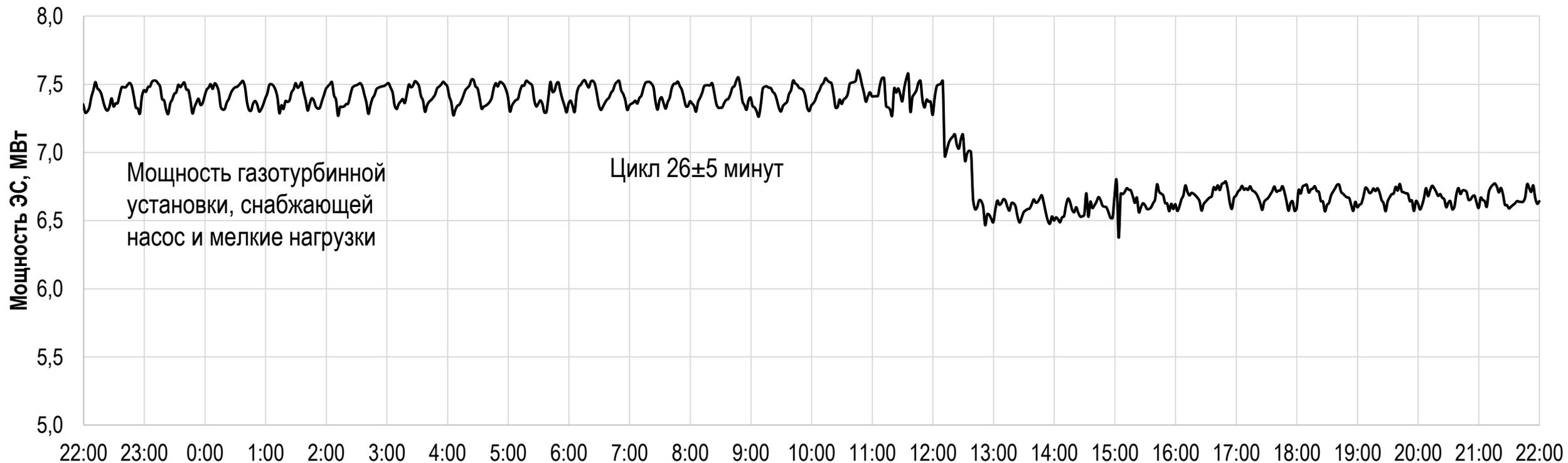


- С переходом от открытой газовой системы к замкнутой, а также со снижением расхода газа в системе, характер нагрузки плавно меняется с непрерывного на циклический с увеличением неравномерности мощности и длительности цикла



НЕПРЕРЫВНЫЕ «ЖИДКИЕ» НАГРУЗКИ. ПЕРЕКАЧКА И ПОДАЧА. СД

Энергосистема с газотурбинной генерацией на территории Тюменской области

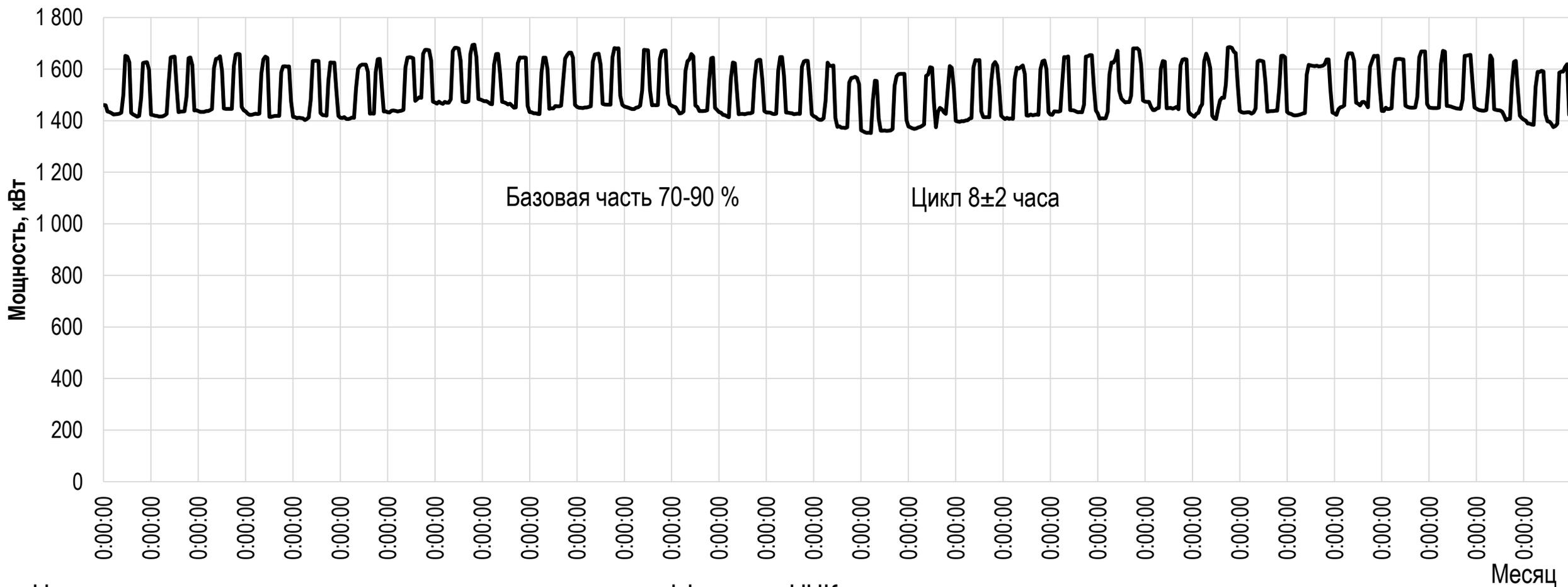


- Может регистрироваться циклическое изменение мощности вследствие работы технологической автоматики поддержания напора (давления), как и при газообразных нагрузках. Частоты изменения мощности существенно ниже порога НЧК;
- Снижение общей мощности нагрузки в системе в 12-13 ч не приводит к изменению частоты и амплитуды изменений мощности, поскольку их первоисточником являются механические причины, не АРВ и не системы возбуждения в целом.



ЦИКЛИЧЕСКИЕ «ЖИДКИЕ» НАГРУЗКИ. НАСОСЫ. АД

Ввод 10 кВ системы электроснабжения котельной в Свердловэнерго

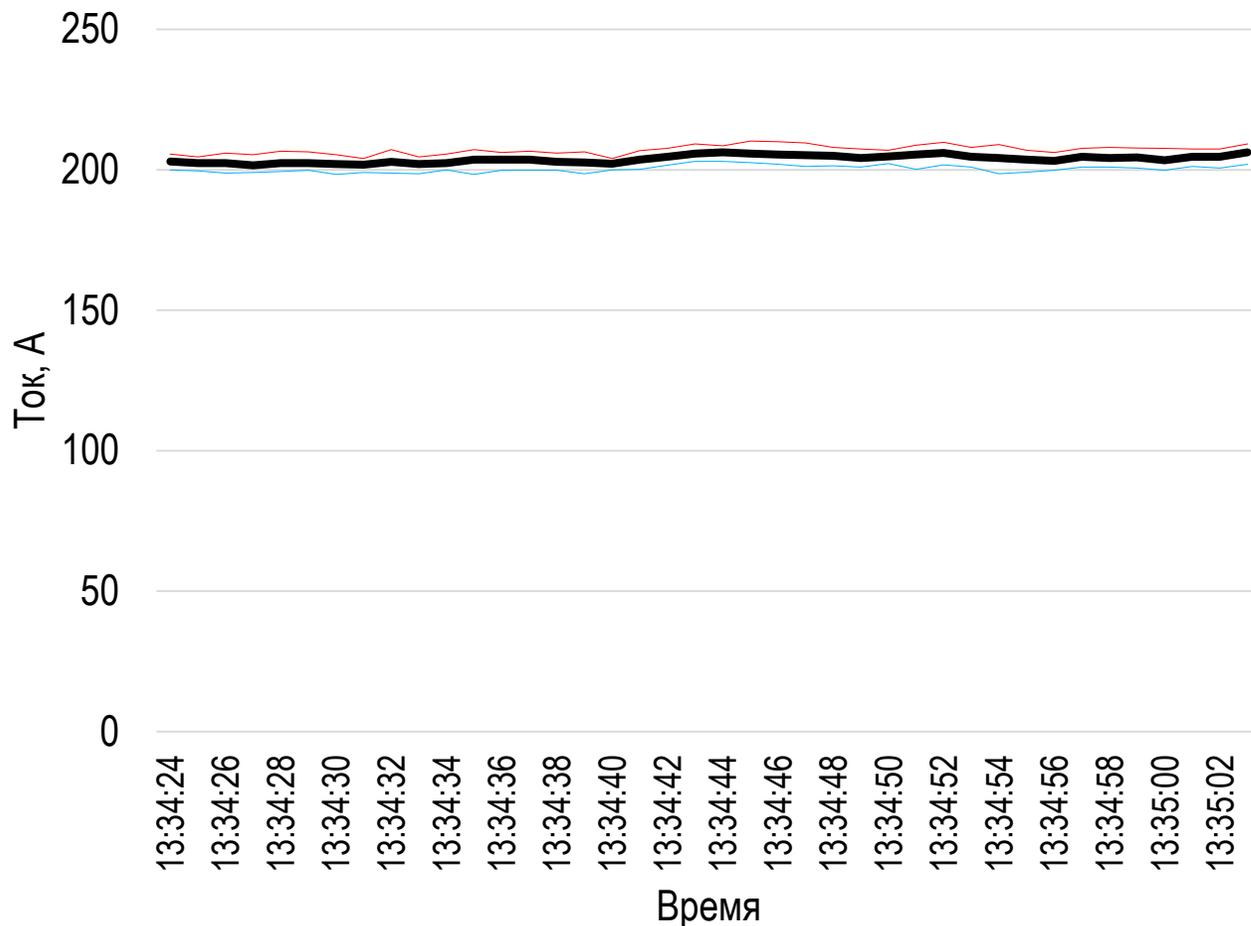


- Насосные станции и котельные за пределами временных рамок НЧК



ОПАСНЫ ЛИ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ВКЛЮЧЕНИЯ?

Промышленный РП 6 кВ Челябэнерго. Мельницы с приводом от асинхронных двигателей



Асинхронные электродвигатели непосредственного включения **опасны менее** синхронных и ЧРП:

1. Редко используются при циклических нагрузках с периодом менее 30 минут;
2. Меньше единичные мощности;
3. Зависимость активной мощности АД от скольжения (частоты вращения), а не от угла, что демпфирует моментную характеристику во времени;
4. При отклонении скорости вращения возрастает потребление реактивной мощности и полный ток двигателя – двигатель или отключится тепловой защитой, или относительно быстро выйдет из строя;
5. Легче опрокидываются при существенном перегрузе с учетом снижения напряжения в слабой сети;
6. Взаимные колебания активной мощности между синхронным генератором и асинхронным двигателем **не** выражены.

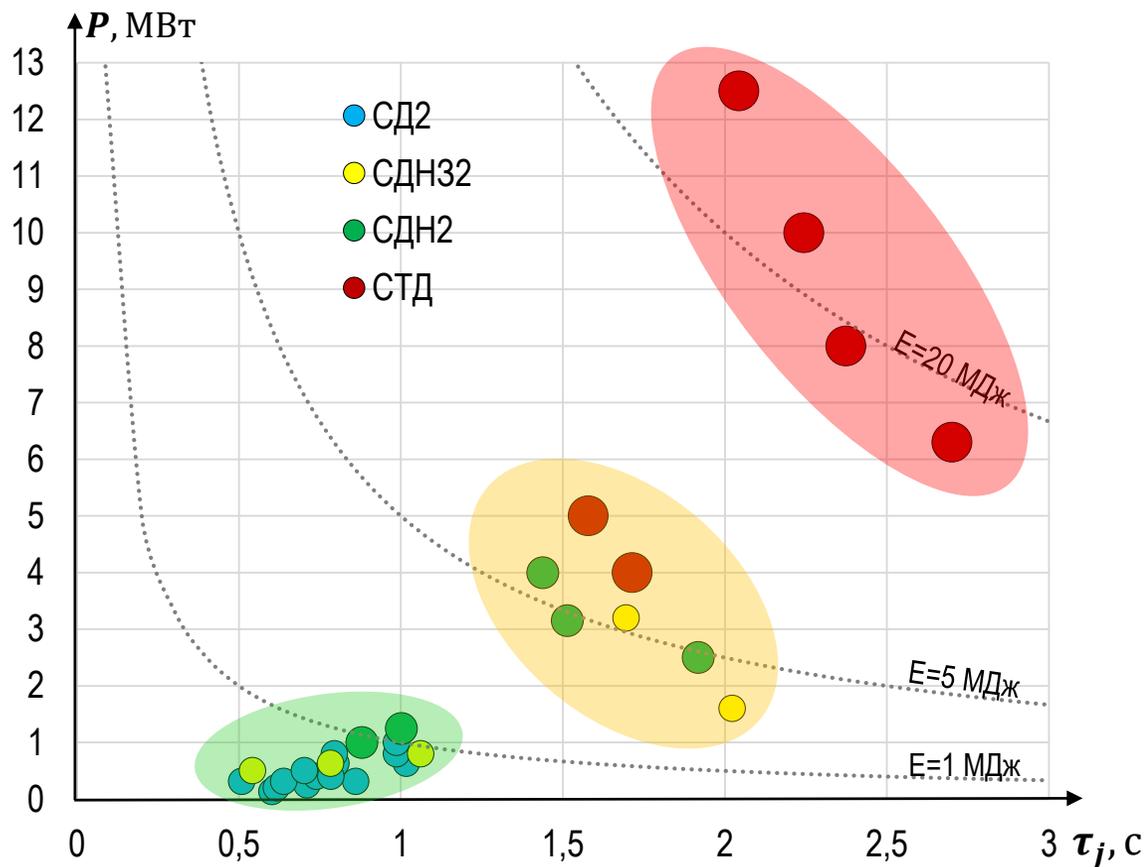


СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ КАК ИСТОЧНИКИ НЧК В РАСПРЕДСЕТЯХ И СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ



СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПРИ НЧК

Собственные (без приводимого механизма) параметры СД



1. Синхронные двигатели СД2, а также начальные в номенклатуре СДН2 и СДН32 не слишком опасны в силу умеренной мощности и небольших постоянных времени;
2. Наиболее мощные синхронные двигатели СДН2 и СДН32, а также начальные СТД встречаются при НЧК чаще всего;
3. Синхронные двигатели СТД наиболее опасны в циклах НЧК ввиду наибольшей кинетической энергии цикла качания, но реже им подвержены ввиду преимущественно газовой нагрузки;
4. Синхронные двигатели при правильном их выборе проектом **относительно сложно опрокинуть, что усугубляет НЧК:**

$$\text{Кратность}(M)_{\text{факт}} \sim \frac{M_{\text{синхр}}, M_{\text{реакт}}, M_{\text{асинхр}}}{K_{\text{загр}}}$$

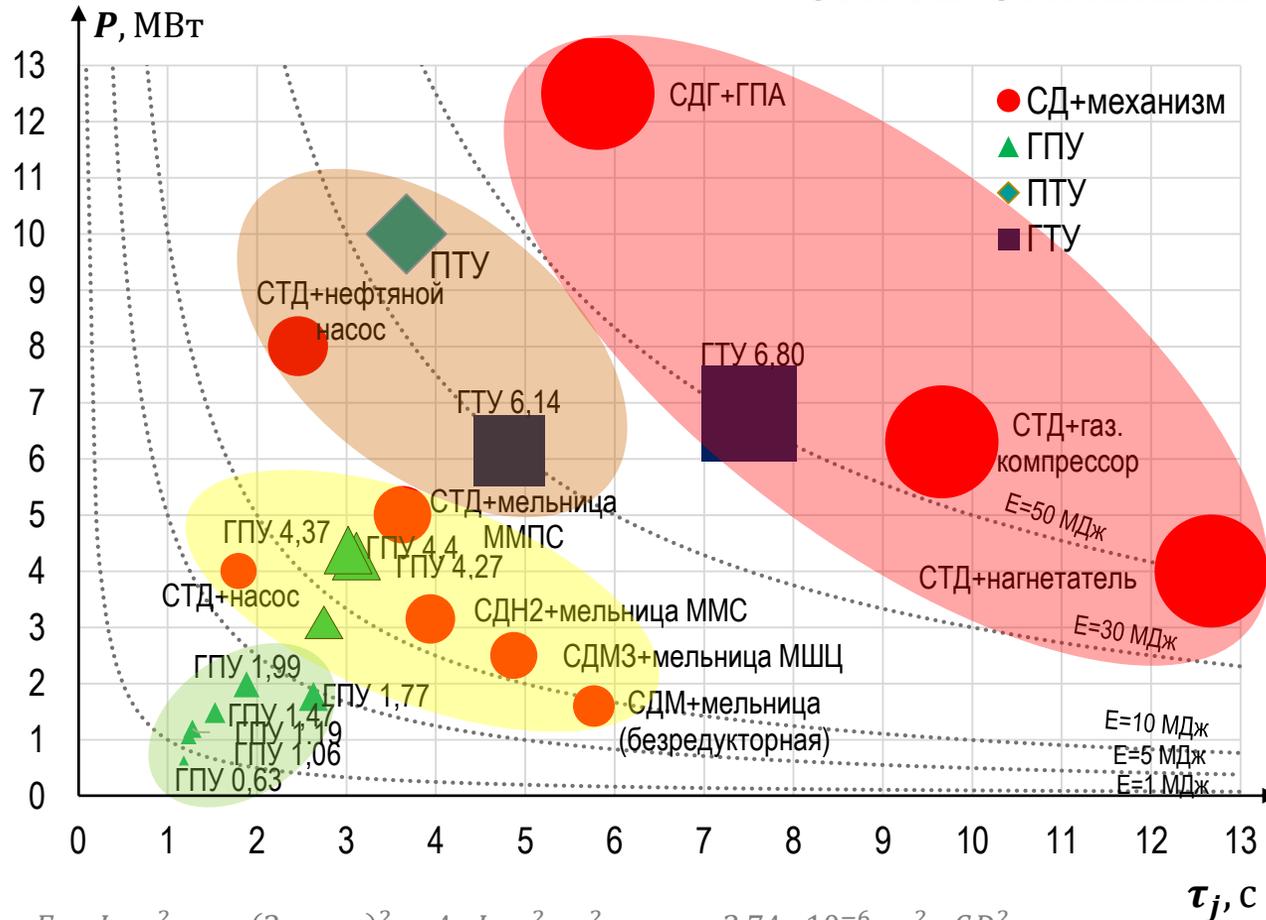
Как правило, при расчетах не учитывают **синхронный реактивный и асинхронный моменты**, а **коэффициент загрузки** выбирают 0,5-0,9. Но уровень **возбуждения ниже расчетного** ввиду физического износа щеточных систем возбуждения. **Фактическая кратность момента:**

- для неявнополюсных быстроходных 2,5-3,2;
- для явнополюсных тихоходных 3,5-4,1.

$$\tau_j = \frac{E}{P} = \frac{J \cdot \omega^2}{P} = J \cdot \frac{(2 \cdot \pi \cdot n)^2}{P} = \frac{4 \cdot J \cdot \pi^2 \cdot n^2}{P} \quad \tau_j = \frac{2,74 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 \cdot GD^2}{P}$$



СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ ПРИ НЧК



1. Мощность электроприемников **нагрузки одного порядка, а зачастую больше, чем генераторов** (с учетом коэффициентов загрузки и использования);
2. НЧК происходят не только по сечению «синхронная машина – энергосистема», но и внутри системы электроснабжения (**межмашинные взаимодействия**). В этом случае сопротивление между машинами практически отсутствует;
3. Преобладают механические источники колебаний. Электромагнитное **демпфирование носит сильный характер** (преобладает активное сопротивление, имеются демпферные клетки СД), колебания только **вынужденные**;
4. **АРВ незначительно влияют** на протекание колебаний:
 - «Слабые» и «медленные» системы возбуждения, коэффициенты мощности близки к 1;
 - АРВ на СД не применяется или выведено из-за износа щеток;
 - АРВ на СГ не введено пусконаладкой или выведено в нарушение российской НТД из-за проблем с тепловым балансом ГПУ.

$$\tau_j = \frac{E}{P} = \frac{J \cdot \omega^2}{P} = J \cdot \frac{(2 \cdot \pi \cdot n)^2}{P} = \frac{4 \cdot J \cdot \pi^2 \cdot n^2}{P}$$

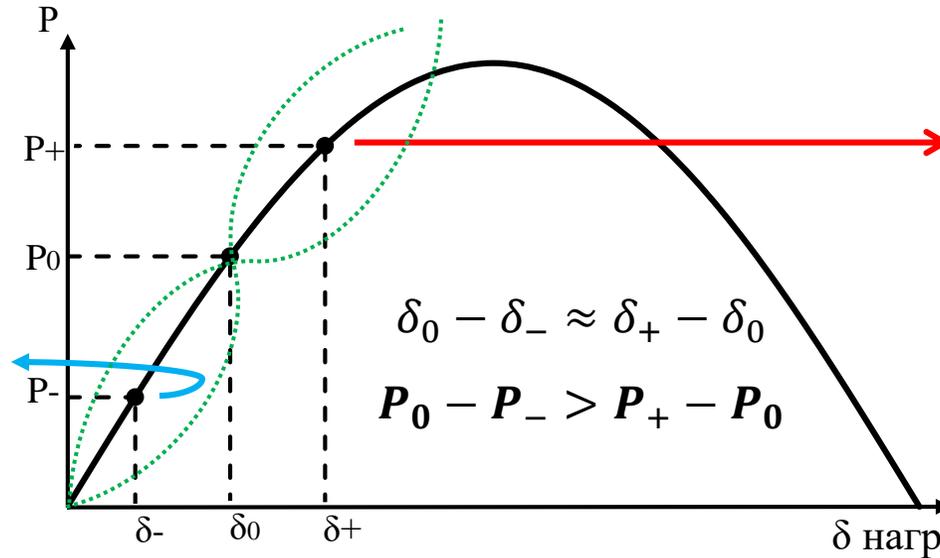
$$\tau_j = \frac{2,74 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 \cdot GD^2}{P}$$

$$GD^2 = 4J = 4 \cdot \left(\frac{m_{\text{внутр}} \cdot d^2}{8} + \frac{m_{\text{барабан}} \cdot d^2}{4} \right)$$

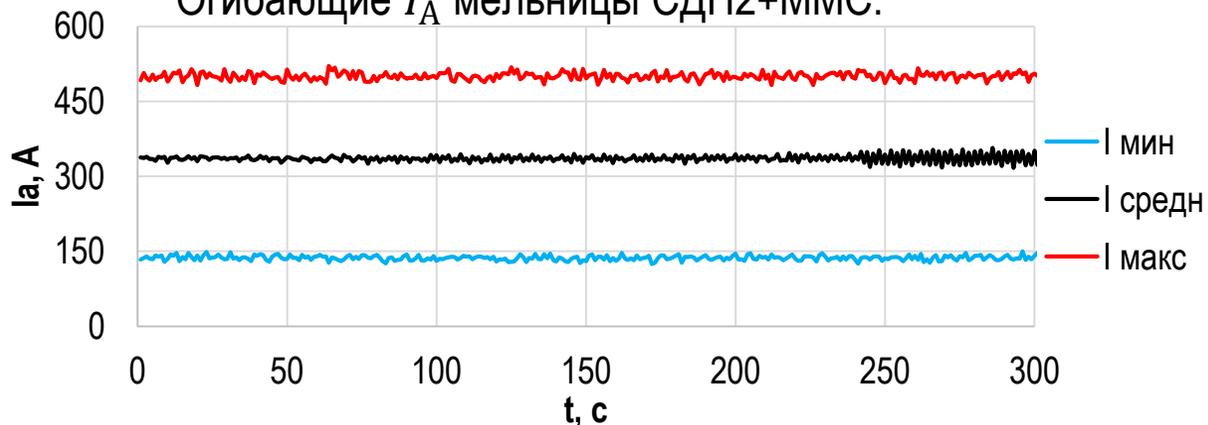
$$H = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \Rightarrow \tau_j = \frac{2 \cdot H}{\cos \varphi_{\text{ном}}}$$



АСИММЕТРИЯ НЧК В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ



Огибающие I_A мельницы СДН2+ММС:

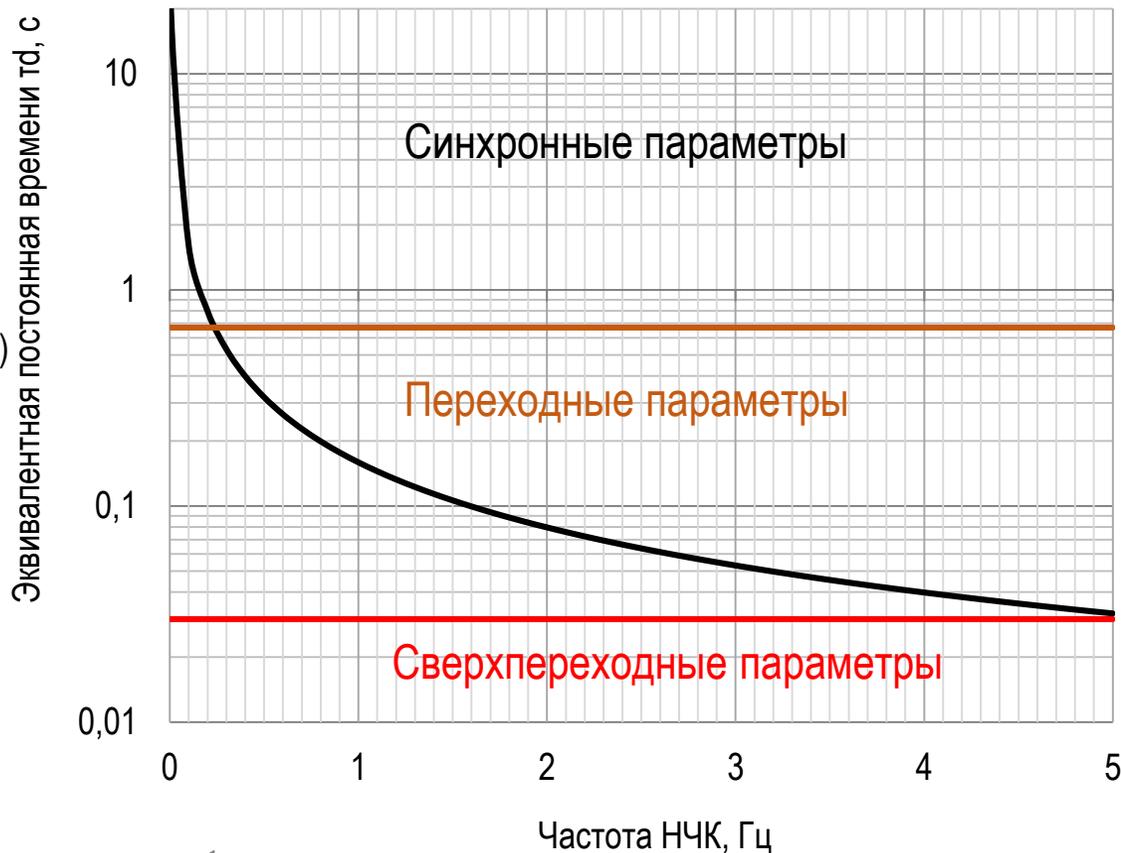


1. При «твердых» механических причинах нагрузочных НЧК первичны углы;
2. Ввиду нелинейности угловых характеристик, особенно с учетом **реактивного момента**, равенство углов приводит к неравенству мощностей;
3. Амплитуда отрицательной полувольты больше амплитуды положительной полувольты на 5-15 %.



КАКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИМЕНЯТЬ ДЛЯ РАСЧЕТА?

На примере СДН2 мощностью 4 МВт



$$t_{d.эквив} = \frac{1}{f_{НЧК}}$$

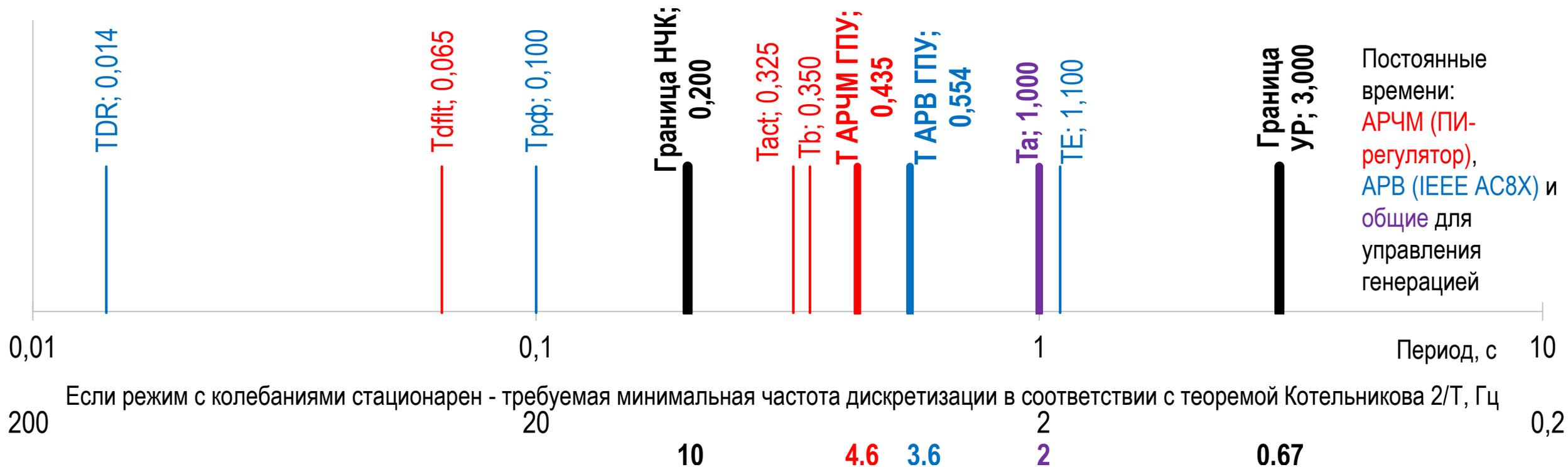
1. Необходимо применять для расчетов фактические параметры всех участников НЧК;
2. Приблизительно можно рассчитать параметры синхронных машин в НЧК с учетом заявленных сверхпереходных, переходных и синхронных сопротивлений, а также постоянных времени обмотки возбуждения и обмотки статора (для синхронных двигателей также будут влиять параметры демпферной клетки);
3. Рекомендуется идентифицировать параметры по результатам проведения фактических измерений;
4. В грубом приближении для синхронных машин 6-10 кВ в распределительных сетях и системах электроснабжения ближе:
 - при частотах менее 0,2 Гц – синхронные параметры;
 - при частотах от 0,2 до 4,5 Гц – переходные параметры;
 - при частотах свыше 4,5 Гц – сверхпереходные параметры.



ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ СОБСТВЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВОК)



ПРИМЕР ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ РЕГУЛИРОВАНИЯ АРЧМ И АРВ ГПУ



1. В отличие от крупных генерирующих агрегатов, у ГПУ до 4,5 МВт результирующие постоянные времени АРЧМ меньше, чем постоянные АРВ;
2. Среднее время отклика АРЧМ на 0,15-0,9 с меньше, чем у АРВ;
3. Запись параметров НЧК и отклика участников НЧК необходимо производить с дискретностью не хуже 10 Гц, желательно 200 Гц.



ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ СОБСТВЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Стойкость

1. Установки малой и распределенной генерации лучше переносят аperiodический характер изменения мощности (в пределах одного цикла прироста-снижения нагрузки), чем постоянный динамический переход в непрерывных НЧК;
2. Стойкость к нагрузочным НЧК можно **косвенно** оценить по соответствующим стандартам нагружения **в автономном режиме**. На примере ГПУ по **ГОСТ ISO 8528-5-2017**. ГПУ классом выше **лучше сопротивляются** НЧК, но при этом **быстрее изнашиваются**.

Параметр	Класс ГПУ 1	Класс ГПУ 2	Класс ГПУ 3
Разовые отклонения частоты, %	3,5	2	2
Установившиеся отклонения частоты, %	< 2,5	< 1,5	< 0,5
Прирост нагрузки с нормированной длительностью регулирования, %	25	15	10
Динамические колебания частоты после прироста нагрузки, %	< -25	< -20	< -15
Снижение нагрузки с нормированной длительностью регулирования, %	70	20	10
Динамические колебания частоты после снижения нагрузки, %	< +18	< +12	< +10
Время регулирования частоты после прироста или снижения нагрузки, с	< 10	< 5	< 3

Последствия

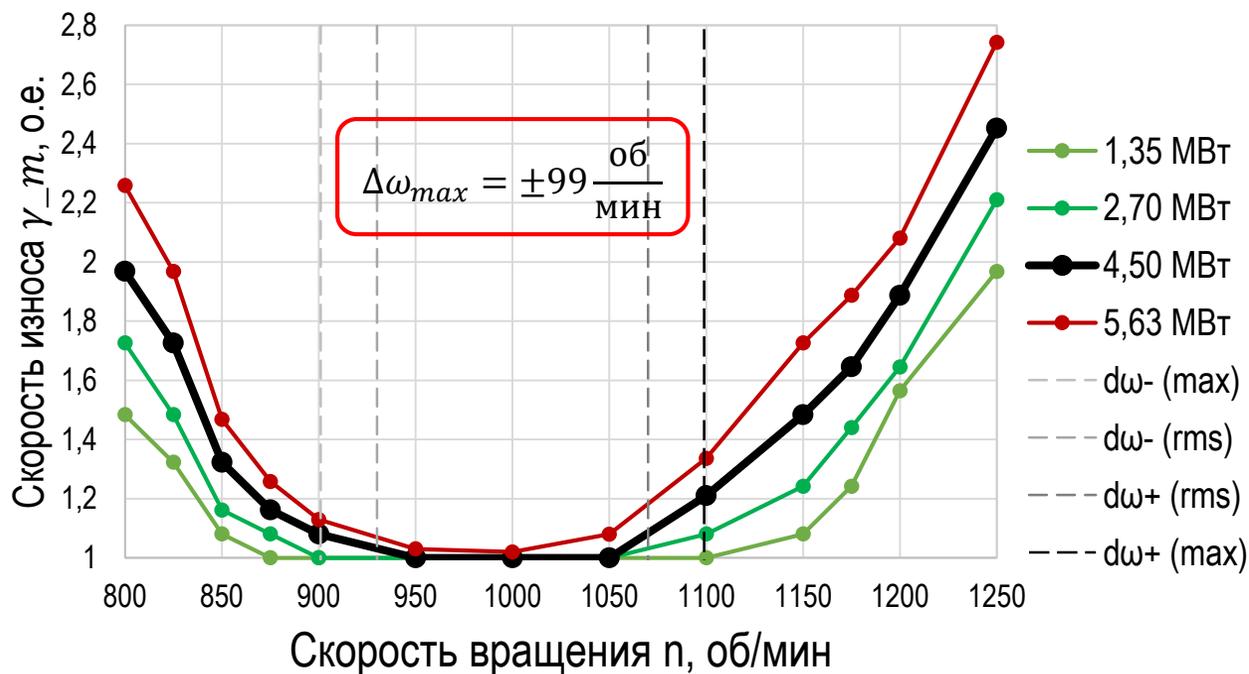
1. Срабатывание защиты по низкочастотной вибрации подключенных генерирующих агрегатов;
2. Пуск II-III ступеней МТЗ, срабатывания нет ввиду наличия выдержки времени;
3. Затрудненная синхронизация при амплитуде качаний электрического угла более 5°;
4. Отказ синхронизации или отключение защитами Vector Jump, Vector Shift при амплитуде качаний электрического угла более 8°.



ПРИКЛАДНАЯ ТРИБОЛОГИЯ ГПУ

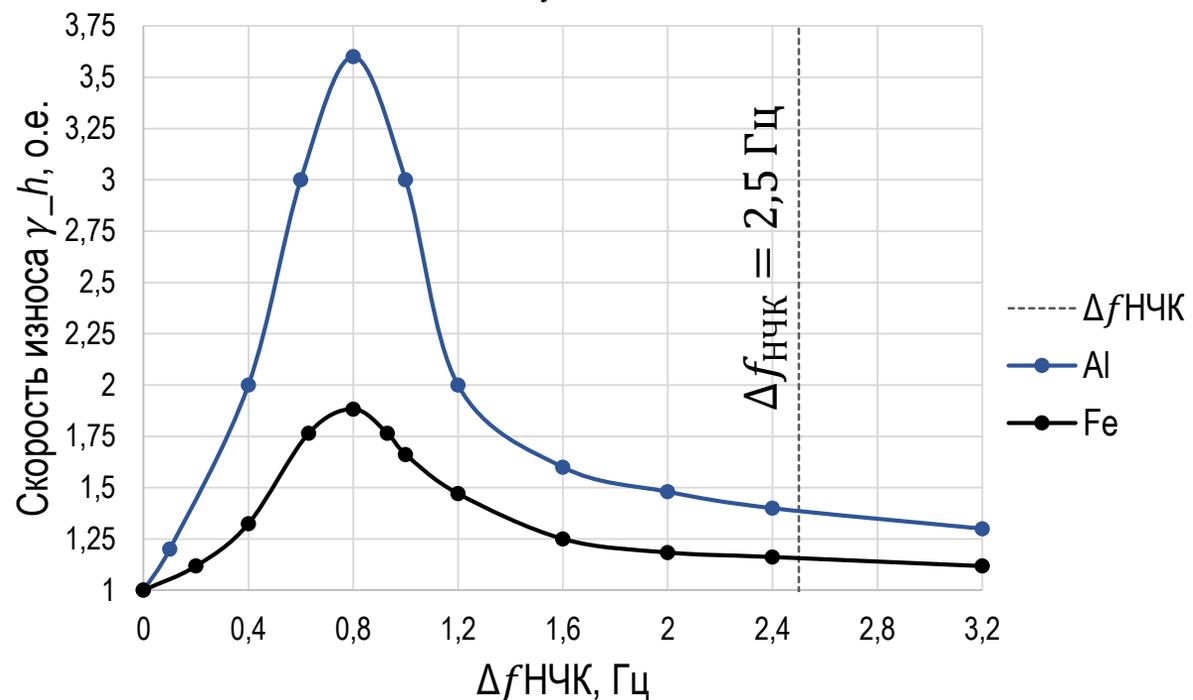
«Статический» износ

Зависимость скорости изнашивания деталей ДВС TCG 2032
4,5 МВт от **скорости вращения** при различной мощности



«Динамический» износ

Зависимость скорости изнашивания деталей (**Al** и **Fe**) ДВС
от **частоты** вынужденных колебаний



! Переходное отклонение частоты в **6%** и выше недопустимо согласно ГОСТ Р 55006-2012

! Для ГПУ установившееся отклонение частоты при неизменной нагрузке от 25% до 100% составляет **0,5%** согласно ГОСТ 33115-2014

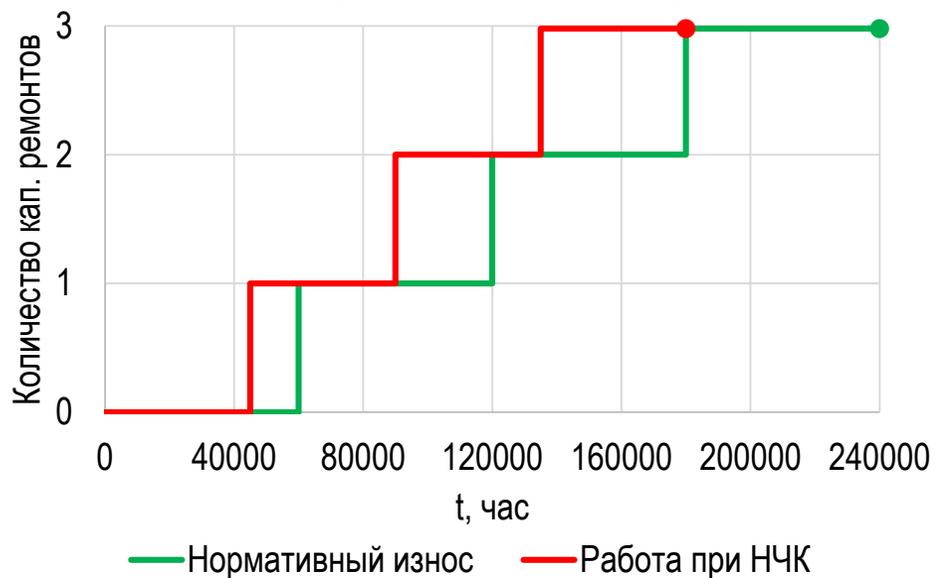
Результирующее значение износа для ГПУ 4,5 МВт:

$$\gamma = \gamma_m^{(\omega)} \cdot \gamma_h^{(\Delta f)} = 1,1 \cdot 1,36 = 1,50 \text{ о. е.} = 150\% \text{ от нормативного значения}$$



ВЛИЯНИЕ НЧК НА ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ГПУ

Жизненный цикл ГПУ и ее кап. ремонты

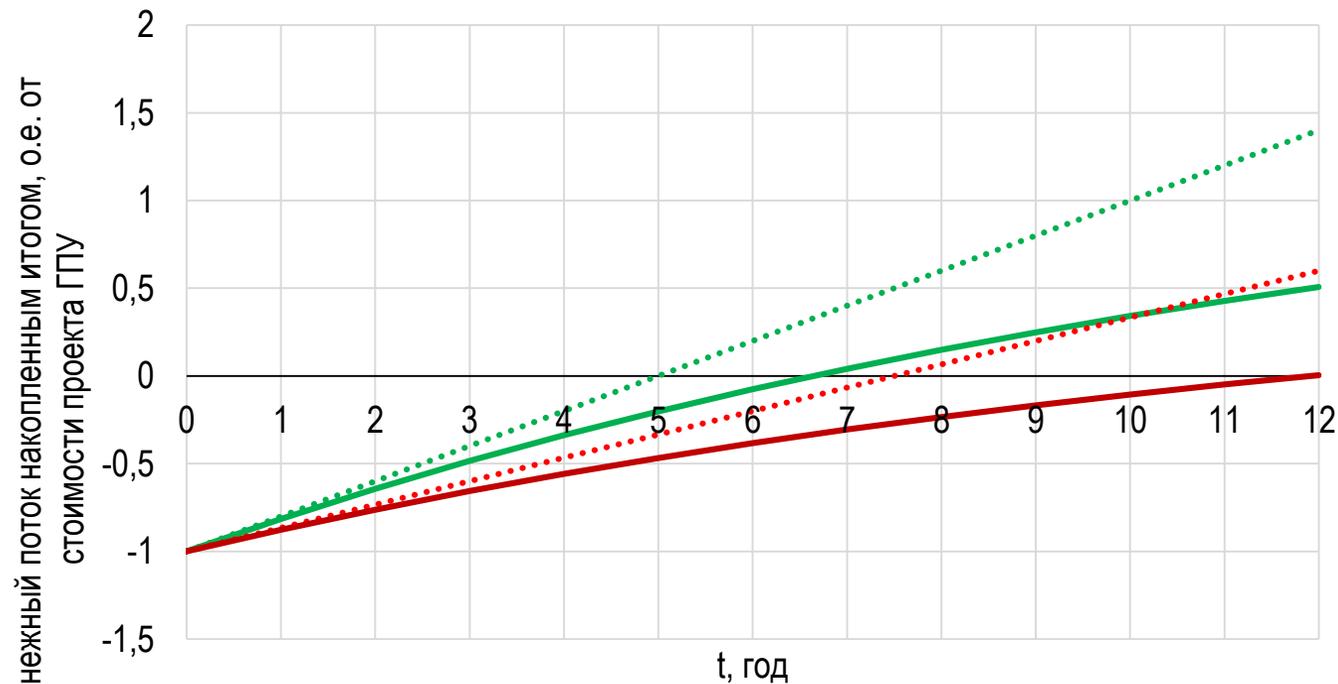


Определение простого денежного потока:

$$CF = -IC + CF_1 + \dots + CF_t$$

Определение дисконтированного денежного потока:

$$NPV = -IC + \frac{CF_1}{(1+r)^1} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$



- Простой денежный поток при нормативном износе
- Дисконтированный денежный поток при нормативном износе
- Простой денежный поток при ускоренном износе
- Дисконтированный денежный поток при ускоренном износе



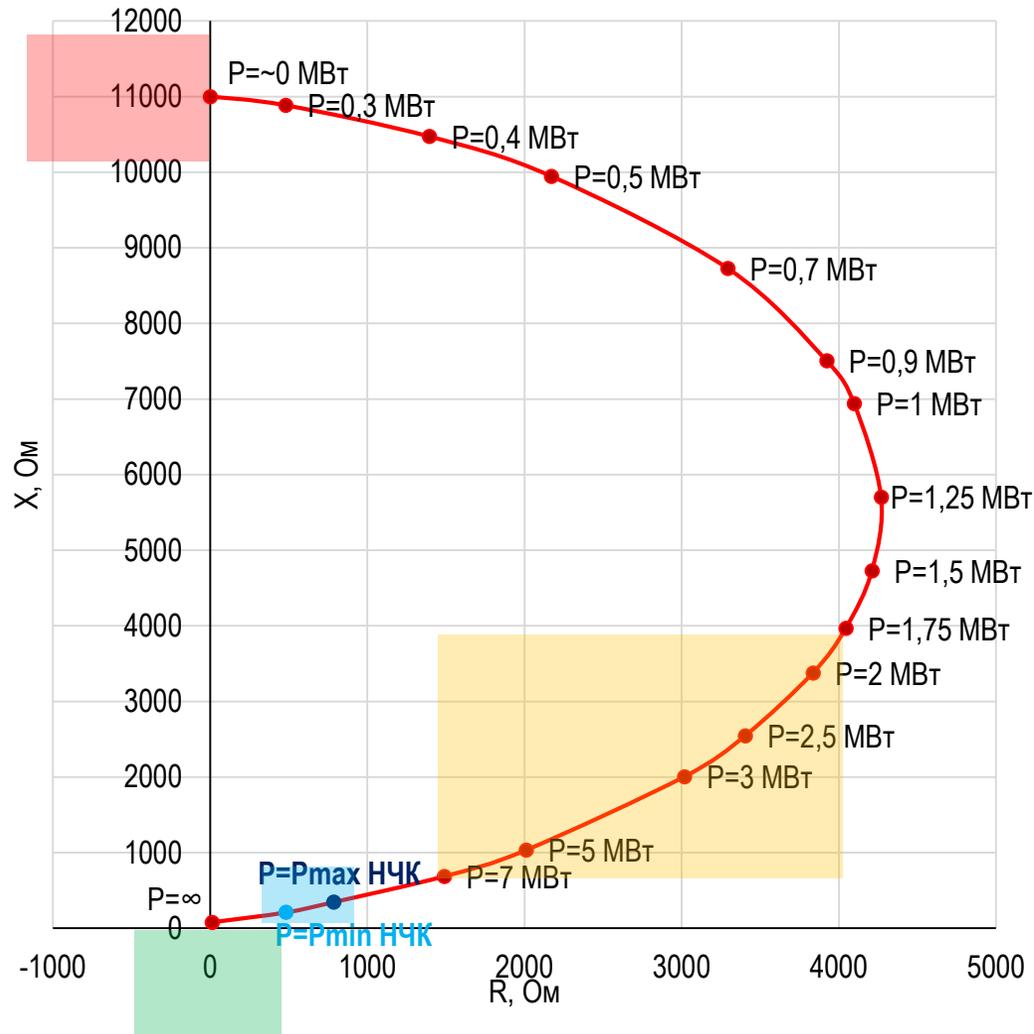
Дисконтированный срок окупаемости ГПУ при ускоренном износе в результате НЧК составляет 12+ лет вместо 6,5



ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ПРИЛЕГАЮЩЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ



ГОДОГРАФ СОПРОТИВЛЕНИЙ НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМОВ

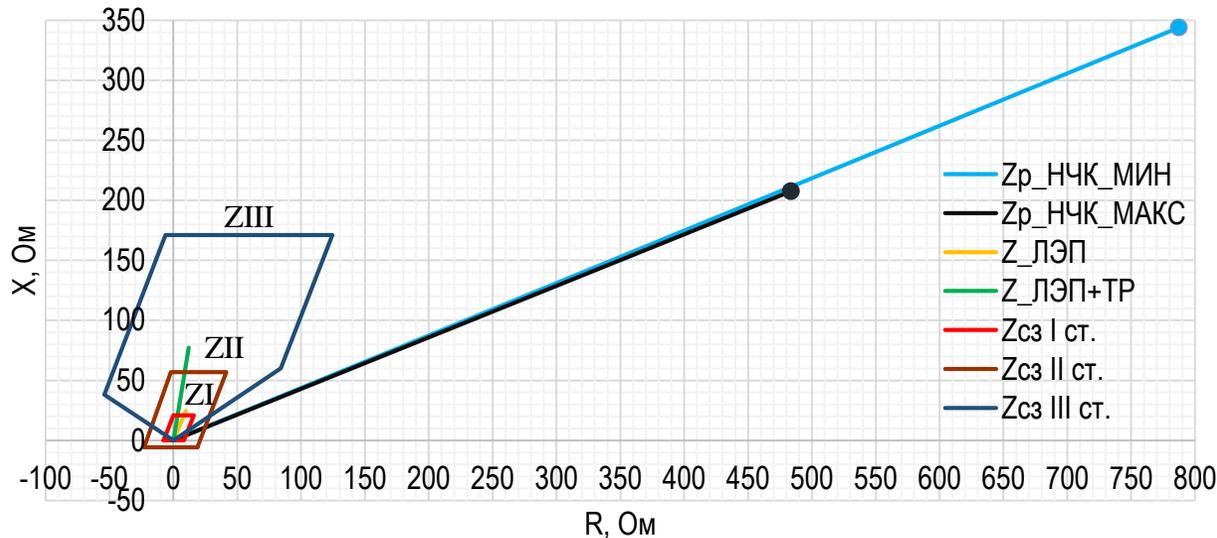


Особенности годографа сопротивлений нагрузочных режимов рассматриваемой распределительной сети и системы электроснабжения:

- Коэффициент мощности полезной нагрузки при построении принят константой;
- Токи холостого хода составляют около $0,3 + j1,0$ МВА;
- Теоретически возможен уход в область **отрицательного активного сопротивления (генерация)**, но выдача мощности запрещена ТУ на ТП;
- Теоретически возможен уход в область **отрицательного реактивного сопротивления**, но БСК и иные неуправляемые ИРМ отсутствуют;
- Переход по области ниже **технологического минимума собственной генерации** (1,8-7,2 МВт) на практике будет дискретным;
- В области 10-30 МВт, включая **область НЧК**, изменение угла φ составляет менее 1° .

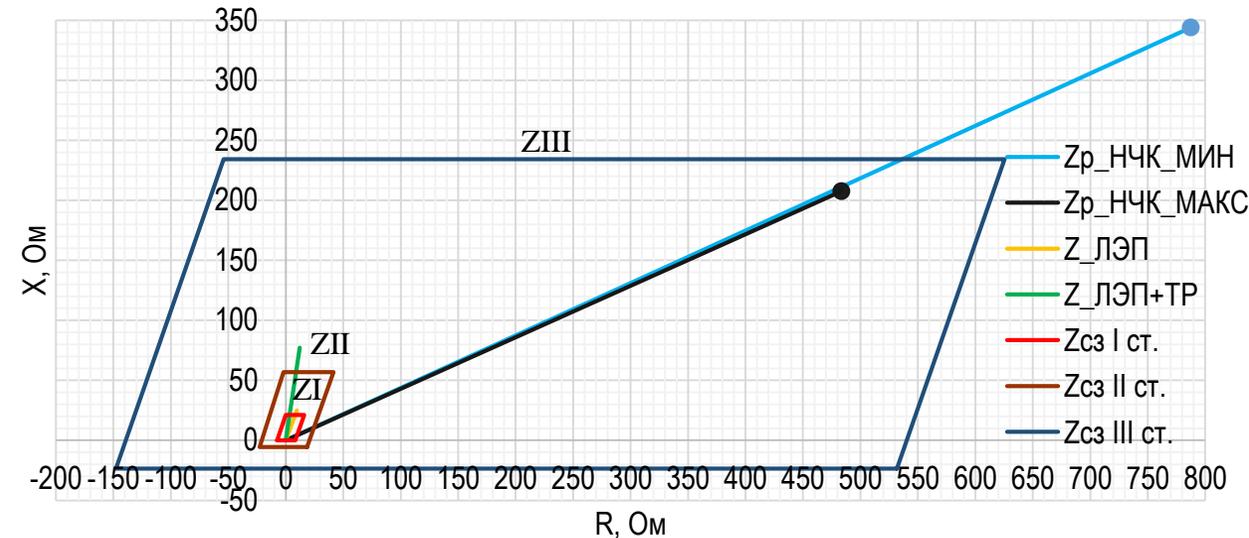
ОПАСНОСТЬ ЛОЖНОЙ РАБОТЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ ПРИ НЧК

Отстройка ДЗ-III с учетом знания факта и параметров НЧК



Например, «классическая» методика ЭКРА

Отстройка ДЗ-III от номинального нагрузочного режима



Отстройка ДЗ-III по упрощенному принципу $0,9U_{НОМ}/(1,1...1,5)I_{НОМ}$

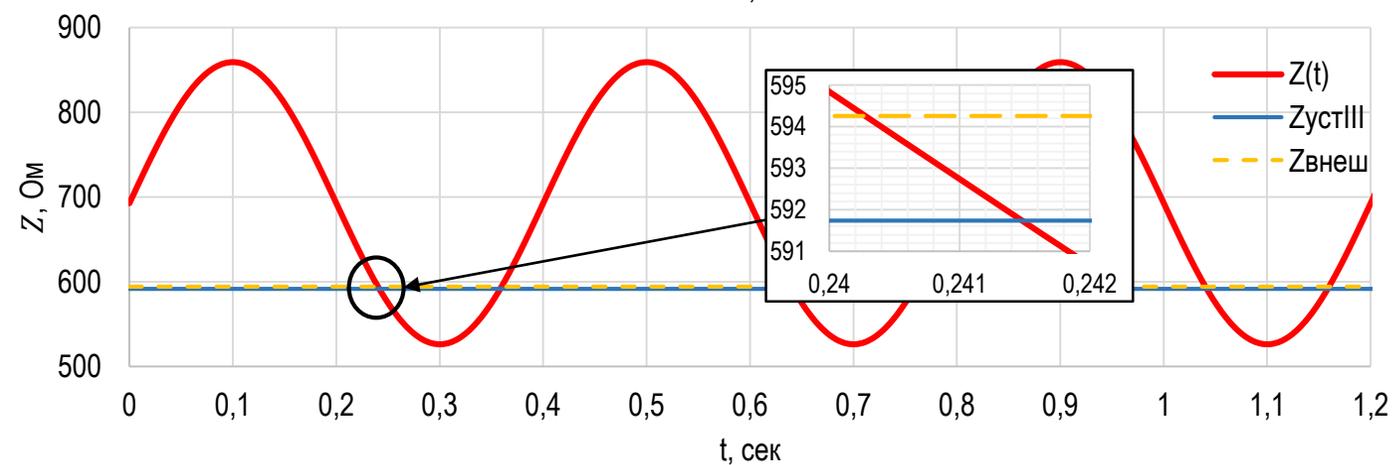
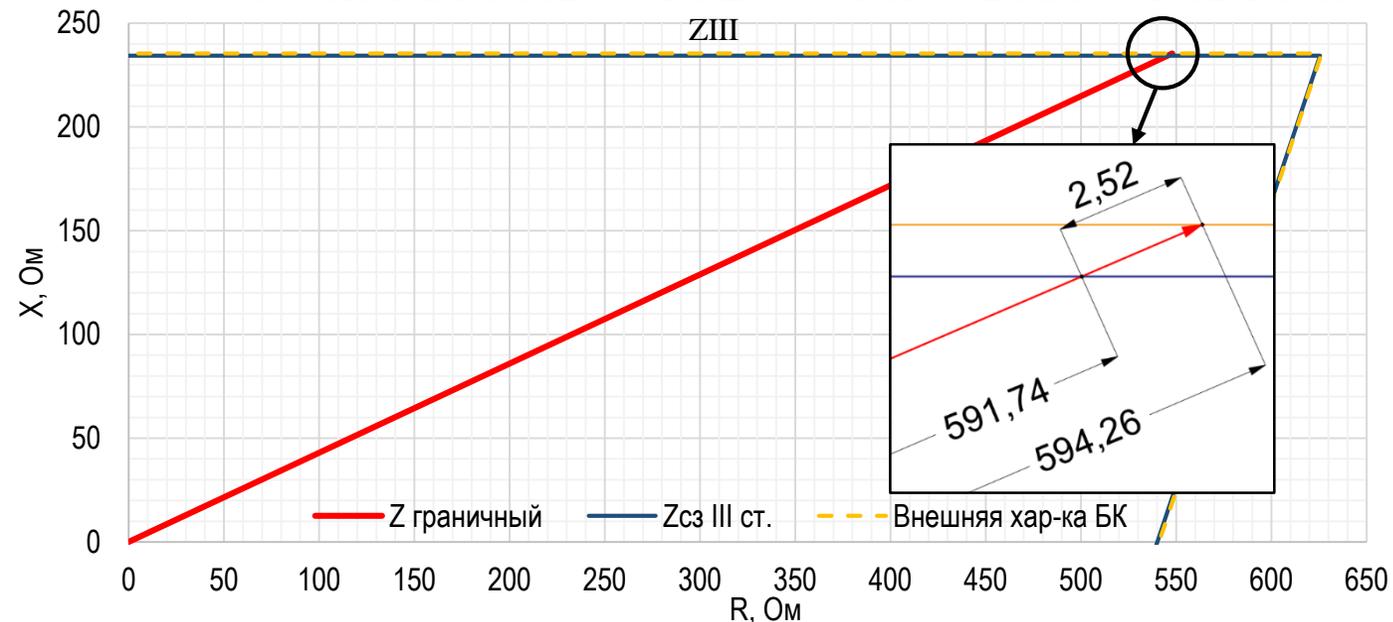
В большинстве случаев можно отстроиться от НЧК даже без использования блокировки от качаний.

При НЧК дистанционные защиты питающих распределительных сетей могут ложно срабатывать при неучете (незнании) факта НЧК и простых методах расчета уставок и отстройки от нагрузочных режимов, которые характерны для:

- Устаревающих ЭМХ защит;
- Защит территориальных и изолированных энергосистем, промышленных систем электроснабжения;
- Защит, рассчитанных не по СТО и методуказаниям ПАО «Россети» и АО «СО ЕЭС»;
- Защит и их блокировок без органа I_2 .



ЛОЖНАЯ РАБОТА БЛОКИРОВКИ ОТ КАЧАНИЙ И ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ. 1



$$\frac{dZ}{dt} = \Delta Z(t) = \Delta Z \cdot \pi \cdot f_{\text{НЧК}} \cdot \cos(2\pi f_{\text{НЧК}} \cdot t) = 2615,961 \cdot \cos(15,708 \cdot t).$$

- Более 2500 Ом/с для 110 кВ - существенное значение;
- Расчетная скорость изменения сопротивления на рассматриваемом участке составляет 2,52 Ом за 0,0015 с, или 1680 Ом/с;
- Задержка блокировки от качаний должна составлять менее 0,0015 с, при этом 0,001 с (шаг 0,001 с) – **минимальное пороговое значение в терминалах дистанционной защиты!**
- При НЧК в номинальном режиме дистанционная защита питающей линии находится в перманентно заблокированном состоянии и не сработает при КЗ;
- При отключении собственной генерации опасность отказа блокировки и ложного пуска дистанционной защиты:
 - Уменьшение сопротивления в момент отключения генерации
 - Общее снижение сопротивления режима.



ЛОЖНАЯ РАБОТА БЛОКИРОВКИ ОТ КАЧАНИЙ И ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ. 2

Соотношение сопротивлений уставки и режима	Соотношение скорости изменения сопротивлений dZ/dt уставки и режима	Пуск и срабатывание блокировки от качаний	Пуск и срабатывание дистанционной защиты	Примечание
Отстройка $Z_{уст}^{III}$ от $Z_{НЧК}^{min}$	-	Отсутствие пуска (правильно)	Отсутствие пуска (правильно)	Правильная отстройка
$Z_{НЧК}^{min} < Z_{уст}^{III}$	$\frac{dZ}{dt} \leq \frac{dZ}{dt}_{уст.}$	Пуск и срабатывание (правильно)	1. Отсутствие срабатывания при качаниях (правильно) 2. Отказ срабатывания при далеких КЗ	Перманентно заблокированное состояние защиты
$Z_{НЧК}^{min} < Z_{уст}^{III}$	$\frac{dZ}{dt} > \frac{dZ}{dt}_{уст.}$	Несрабатывание (правильно)	Пуск III ступени (правильно)	Разовый, реже циклический пуск. Отсутствие срабатывания ввиду выдержки времени

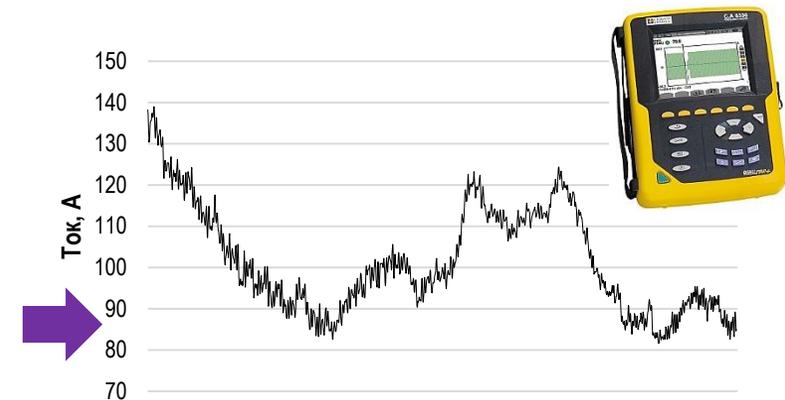
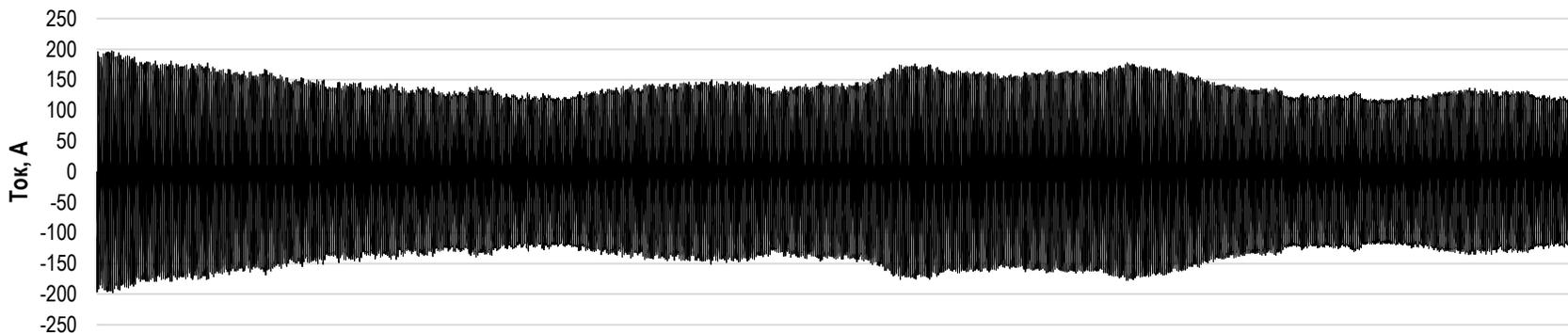


ЧЕМ РЕГИСТРИРОВАТЬ НАГРУЗОЧНЫЕ НЧК И КАК БОРОТЬСЯ



ЧЕМ РЕГИСТРИРОВАТЬ?

1. В сетях 220-750 кВ отслеживание НЧК осуществляется с помощью СМГР на основе УСВИ;
2. В сетях 35-110 кВ на узловых подстанциях отслеживание теоретически возможно на основе данных РАСП, РАСП-РЗА. Однако:
 - параметры режима при НЧК могут не достигать пусковых значений, отдельная осциллограмма COMTRADE не сохраняется;
 - мгновенные значения не наглядны и не удобны для оперативного персонала ↓



- мгновенные значения при НЧК непросто конвертировать в действующие ввиду изменения крест-фактора (пик-фактора) ↓

Режим	Пик-фактор /	Режим	Пик-фактор /
Нормальный (идеальная синусоида)	1,37-1,39 (1,41)	ЭМХ переходный процесс	1,8-2,2
Нагрузочные НЧК	1,5-1,7	ЭМГ переходный процесс	2,5-3,5

3. В сетях 0,4-10 кВ и на потребительских подстанциях 35-110 кВ единственным способом остаётся разовый высокодискретный замер действующих значений параметров электрического режима (SCADA и АСУ ТП настроены на период усреднения отображения данных 3-10 секунд). Косвенным признаком служат колебания показаний стрелочных амперметра и ваттметра.



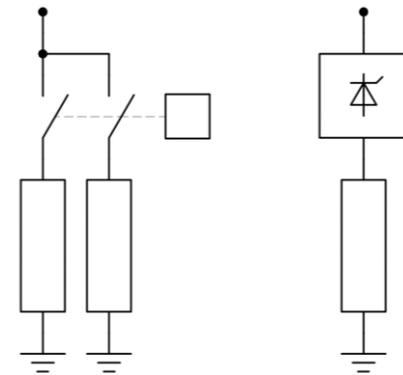
КАК БОРОТЬСЯ? 1

1. Устранить механический источник НЧК:

- Не допускать нарушений геометрии размещения технологических линий при проектировании и строительстве;
- Нормализовать технологический процесс в части полноты и равномерности загрузки оборудования;
- Проектом проверять гидравлические и газоздушные тракты на предмет автоколебаний и резонансных явлений;
- **Отремонтировать неисправное оборудование.**

2. (?) Применить электрическое торможение – имеются примеры проектов за рубежом и в РФ:

- Энергозатратно (энергорастратно);
- Безальтернативно в автономных системах электроснабжения.



$$\delta U = \frac{PX - QR}{U}$$

3. Устранить электромагнитный источник НЧК при использовании частотно-регулируемых приводов:

- **Соблюдать рекомендованные производителем длины и сечения КЛ по сторонам ЧРП;**
- Проектом проверять системы ЧРП на предмет автоколебаний и резонансных явлений.

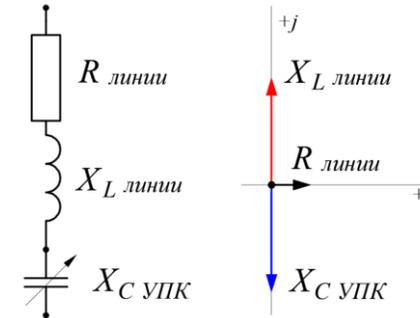
$$\delta U = \frac{PX - QR}{U}$$



КАК БОРОТЬСЯ? 2

1. (??) Уменьшить «рычаг» НЧК для уменьшения угла – частичная продольная компенсация:

- Опасна под(над)синхронным резонансом (статья CIGRE e-Session 2020 C6-115) и «гармоническими» резонансными явлениями;
- Способ нецелесообразен при межмашинных НЧК в пределах одной системы электроснабжения, где электрические расстояния X близки к 0, а колебания происходят на собственных частотах синхронных машин.



$$\delta U = \frac{PX - QR}{U}$$

2. (??) Изменить уставку АРВ по $Q/U/\cos \varphi$ или коэффициенты настройки АРВ:

- Системы возбуждения СД и СГ «слабые» и «медленные» - не оказывают влияния и не способны демпфировать.

3. (???) Применить АРВ сильного действия:

- Не предусмотрено комплектациями синхронных двигателей и генераторов.

$$\delta U = \frac{PX - QR}{U}$$

Но!

$$U = \frac{PR + QX}{U}$$

4. (???) Применить накопитель энергии – далекая перспектива:

- Теоретическая возможность показана в брошюре по результатам работы группы CIGRE WG C6-30;
- Практическая эффективность подтверждена опытом функционирования 2019-2021 энергосистемы Багамских островов (статья CIGRE e-Session 2020 C6-109), содержащей 98 МВт поршневой генерации и нагрузки, большую часть которой составляют портовые грузовые механизмы.



Кафедра

Автоматизированные
Электрические Системы



Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б. Н. Ельцина

Уральский
энергетический
институт

38

ВЫВОДЫ



ВЫВОДЫ 1. НАГРУЗОЧНЫЕ НЧК В РАСПРЕДСЕТЯХ И СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Характеристика	Крупные ЭЭС	Распредсети и системы электроснабжения
<i>Источники</i>		
Соотношение мощностей	$P_{\text{ген}} \gg P_{\text{нагр}}$	$P_{\text{ген}} \leq P_{\text{двиг}}$
Основные источники НЧК	Синхронные генераторы	Синхронные двигатели
<i>Условия протекания</i>		
Соотношение R/X	$R \ll X$	$R \geq X$
Электромагнитное и электромеханическое демпфирование	Слабое: у сети и у генераторов (отсутствуют или слабые демпферные клетки)	Сильное: у сети и у двигателей
Характер колебаний	Свободные слабо затухающие или вынужденные	Только вынужденные
<i>Постоянные времена</i>		
• $T_{\text{сист.возб.}}^{\text{реакц}}$	Десятые доли секунды (0,05-0,2 с)	Секунды (~0,5-3 с)
• $T_{\text{привода}}^{\text{реакц}}$	Десятки секунд	Десятые доли секунды (~0,1-0,4 с)
Характер колебаний определяет	АРВ и СВ; предел стат. устойчивости	Приводимый механизм СД; первичный привод СГ
Выявление НЧК с помощью	СМПР на основе УСВИ	Ожидание: SCADA, АСУ ТП Реальность: высокодискретный разовый замер, зоркий глаз оперативного персонала + <u>A</u> , <u>W</u>



ВЫВОДЫ. 2

1. **Основными источниками** НЧК параметров режима в распределительных сетях и системах электроснабжения являются **многополюсные синхронные двигатели**. Также условно-опасны частотные приводы. Наименее опасны асинхронные двигатели непосредственного включения;
2. Наиболее склонны к возникновению и развитию НЧК системы электроснабжения с **«твердыми» механическими нагрузками** – непрерывными, а также циклическими с циклом менее постоянной регулирования АРЧМ по ISO 8528-5;
3. Работа газопоршневых установок при НЧК ведет к ускоренному до 50 % износу и повышению дисконтированного срока окупаемости электростанции до 12+ лет, что **лишает проект выгоды**;
4. Расчеты уставок дистанционной защиты и блокировки от качаний ВЛ распределительной сети, произведенные в работе, показывают, что отстройка от номинального нагрузочного режима без учета НЧК может приводить **к перманентному сработавшему состоянию блокировки от качаний и заблокированной дистанционной защите**, в т.ч. при КЗ. При отстройке от фактической нагрузки (ниже номинальной) возможно несрабатывание блокировки от качаний и пуск дистанционной защиты ВЛ;
5. Информационное обеспечение в виде **высокодискретных измерений действующих значений** параметров режима является важнейшей частью борьбы с нагрузочными НЧК;
6. Наиболее эффективным средством устранения нагрузочных НЧК является **устранение механического первоисточника колебаний** или **настройка технологического процесса**.



БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!

Самойленко Владислав Олегович,
К.Т.Н.

vvsamoynenko@yandex.ru
+7-912-26-75-288

Екатеринбург, 2021