ФГБОУ ВПО МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Г.И. НОСОВА

Карпеш Антон Алексеевич
Спирова Екатерина Дмитриевна

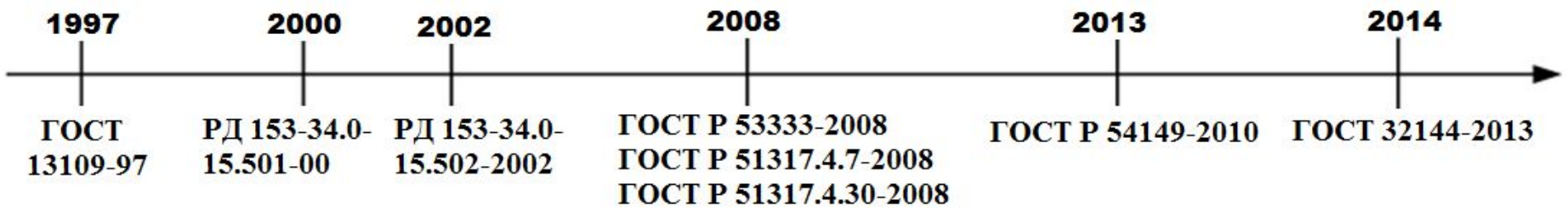
Разработка математической модели анализатора качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ Р 32144-2013 на базе программного пакета Matlab с приложением Simulink для анализа качества напряжения в системах электроснабжения мощных дуговых сталеплавильных печей

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

НИКОЛАЕВ Александр
Аркадьевич.

Магнитогорск 2015

Особенности ГОСТ на качество электроэнергии. Хронология принятия стандартов на ПКЭ.



1) ГОСТ 13109-97 - определял основные показатели качества электрической энергии, их нормативные значения, интервалы усреднения и отчетный период.
2) РД 153-34.0-15.501-00 и РД 153-34.0-15.502-2002 – «Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», которые определили процедуры выполнения измерений, обработки и представления результатов.
3) В 2008 году на смену РД 153-34.0-15.501-00 и РД 153-34.0-15.502-2002 пришел ГОСТ Р 53333-2008, устанавливающий основные положения по организации и проведению контроля качества электроэнергии, который в том числе описывал формы протоколов измерений. Также на базе международных стандартов были приняты в России ГОСТ Р 51317.4.7-2008 (методы измерения гармоник и интергармоник) и ГОСТ Р 51317.4.30-2008.
4) Новый стандарт КЭ ГОСТ Р 54149-2010 был разработан с учетом положений принятых стандартов ГОСТ Р 51317.4.30-2008, ГОСТ Р 51317.4.7-2008 и европейского стандарта EN50160, а также специфических требований к электрическим сетям в России.
5) В 2013 году на основе ГОСТ Р 54149-2010 был разработан международный стандарт по качеству электроэнергии - ГОСТ 32144-2013. Он был введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июля 2014 г.

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТ 13109-97

Наиболее часто используемые:

1. Установившееся отклонение напряжения:

$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%$, где $U_{ном}$ - номинальное линейное напряжение питающей сети;

$U_y = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N} U_{yi}^2\right] / N}$ - значение усредненного напряжения на интервале 1 мин (число N>18).

$U_{yi} = (1/3) \cdot (U_{AB(1)i} + U_{BC(1)i} + U_{BC(1)i})$ - усредненное напряжение на i-ом интервале времени.

2. Размах изменения напряжения:

$\delta U_t = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{ном}}$, где U_i и U_{i+1} – значения следующих один за другим экстремумов среднеквадратичных значений напряжения основной частоты, вычисленных на каждом полупериоде.

3. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения:

на i-ом интервале времени результирующее значение за 3 сек.

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U^2_{(n)i}}}{U_{(1)i}} \cdot 100\%; \qquad K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} K_{Ui}^2}{N}}; \qquad N > 9.$$

4. Коэф. несимметрии напряж. по обратной последовательности :

на i-ом интервале времени результирующее значение за 3 сек.

$$K_{2Ui} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100\%; \qquad K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} K_{2Ui}^2}{N}}; \quad N > 9.$$

5. Кратковременная и длительная дозы фликера:

P_{St} и P_{Lt}

Другие показатели качества:

6. Коэф. n-ой гармонической составляющей напряжения:

на i-ом интервале времени результ. значение за 3 сек.

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{(1)i}} \cdot 100\%; \qquad K_U = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N} U^2_{(n)i}\right] / N}; \quad N > 9.$$

7. Коэф. несимметрии напряж. по нулевой последов-сти:

на i-ом интервале времени результ. значение за 3 сек.

$$K_{0Ui} = \frac{\sqrt{3} U_{0(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100\%; \qquad K_{0U} = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N} K^2_{0Ui}\right] / N}; \quad N > 9.$$

8. Отклонение частоты:

$\Delta f = f_y - f_{ном}$, где $f_{ном}$ - номинальная частота;

$f_y = \left[\sum_{i=1}^{N} f_i\right] / N$; - усредненное значение частоты на интервале 20 с (число N>15)

9. Длительность провала напряжения:

$\Delta t_п = t_к - t_н$, где $t_к$ и $t_н$ - нач. и кон. моменты времени провала напряжения ниже $0{,}9U_{ном}$

10. Импульсное напряжение $U_{имп.}$ - максимальное значение напряжения при резком его изменении (длительность фронта импульса не более 5 мс)

11. Коэффициент временного перенапряжения:

$K_{пер.U} = \frac{U_{a.max}}{\sqrt{2} U_{ном.}}$, где $U_{a.max}$ - максимальное амплитудное значение.

Нормально и предельно допустимые значения показателей качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ 13109-97

Значения коэффициента искажения синусоидальной кривой напряжения

Нормально допустимое значение при $U_{ном}$, кВ				Предельно допустимое значение при $U_{ном}$, кВ			
0,38	6-20	35	110-330	0,38	6-20	35	110-330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Значение коэффициента n--ой гармонической составляющей напряжения

Нечетные гармоники, не кратные 3, при $U_{ном}$, кВ					Нечетные гармоники, кратные 3**, при $U_{ном}$, кВ					Четные гармоники при $U_{ном}$, кВ				
n*	0,38	6-20	35	110-330	n*	0,38	6-20	35	110-330	n*	0,38	6-20	35	110-330
5	6,0	4,0	3,0	1,5	3	5,0	3,0	3,0	1,5	2	2,0	1,5	1,0	0,5
7	5,0	3,0	2,5	1,0	9	1,5	1,0	1,0	0,4	4	1,0	0,7	0,5	0,3
11	3,5	2,0	2,0	1,0	15	0,3	0,3	0,3	0,2	6	0,5	0,3	0,3	0,2
13	3,0	2,0	1,5	0,7	21	0,2	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,3	0,3	0,2
17	2,0	1,5	1,0	0,5	>21	0,2	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,3	0,3	0,2
19	1,5	1,0	1,0	0,4						12	0,2	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,0	1,0	0,4						> 12	0,2	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1,0	1,0	0,4										
> 25	0,2+ +1,3 × ×25/n	0,2+ +0,8× ×25/n	0,2+ +0,6× × 25/n	0,2+ +0,2 × × 25/n										

*n-номер гармонической составляющей напряжения.

** Нормально допустимые значения, приведенные для n, равных 3 и 9, относятся к однофазным электрическим сетям. В трехфазных трехпроводных электрических сетях эти значения принимают вдвое меньшими приведенных в таблице

Величина предельно допустимого значения будет равна: $K_{U(n)\text{пред.}} = 1{,}5 \cdot K_{U(n)\text{норм.}}$

Установившееся отклонение напряжения

$$\delta U_{\text{t норм.}} = \pm 5\%; \quad \delta U_{\text{t пред.}} = \pm 10\%$$

(на выводах приемника эл.энергии)

Кратковременная (10 мин.) и длительная (2 часа) дозы фликера

$$P_{\text{St пред.}} = 1{,}38; \quad P_{\text{Lt пред.}} = 1{,}0;$$

$$P_{\text{St пред.}} = 1{,}0; \quad P_{\text{Lt пред.}} = 0{,}78;$$

(для потребит. с лампами накаливания в помещениях, где требуется зрит. напряжение)

Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности

$$K_{2U\text{норм.}} = 2{,}0\%; \quad K_{2U\text{пред.}} = 4{,}0\%$$

(В точках общего присоединения всех электрических сетей)

$$K_{0U\text{норм.}} = 2{,}0\%; \quad K_{0U\text{пред.}} = 4{,}0\%$$

(Четырехпроводные электрические сети с напряжением 0,38 кВ)

Отклонение частоты

$$\Delta f_{\text{норм.}} = 0{,}2\,\text{Гц}; \qquad \Delta f_{\text{пред.}} = 0{,}4\,\text{Гц}$$

Длительность провала напряжения

$$\Delta t_{\text{пров.пред.}} = 30\,\text{с};$$ (в сетях до 20 кВ)

Приборы для измерения значений показателей качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ 13109-97

При анализе ПКЭ необходимо использовать специализированные измерительные приборы-анализаторы, что служит юридической гарантией достоверности результатов измерений и позволяет использовать их при разрешении споров между энергоснабжающей организацией и потребителем электроэнергии.

В качестве примера на рисунке приведены фотографии приборов для измерения показателей качества электроэнергии в трехфазных электрических сетях – американского анализатора ПКЭ Fluke 433 и отечественного измерительного комплекса «НЕВА ИПЭ».

В обоих анализаторах имеются блоки гальванической развязки сигналов, быстродействующие аналого-цифровые преобразователи и микропроцессоры, осуществляющие обработку измеряемых мгновенных значений напряжений и токов и расчет основных показателей качества электроэнергии. Благодаря наличию внешней флэш-памяти или жесткого диска имеется возможность записи и сохранения большого объема измеренной информации, включая синусоиды токов и напряжений, снятых с высокой частотой дискретизации 0,4 – 100 МГц.

Но, так как данные приборы не работают в соответствии с новым стандартом, то возникает необходимость создания виртуального анализатора ПКЭ на основе среды MATLAB Simulink.

Сравнительный анализ ГОСТ 13109-97 с ГОСТ 32144-2013

Основные отличия между новым и старым стандартом:

1. В раздел «Термины и определения» включены новые термины и уточнены прежние

- Сетевая организация
- Пользователь электрической сети
- Потребитель электрической энергии
- Точка передачи электрической энергии
- Согласованное напряжение электропитанияUc
- Качество электрической энергии
- Маркированные данные

2. Согласно ГОСТ Р 54149-2010 все измерения должны проводиться согласно ГОСТ 51317.4.30-2008.

3. В новом стандарте есть отличия по времени интеграции показателей качества электроэнергии. Время интеграции ПКЭ согласовано с ГОСТ 51317.4.30-2008 и составляет:

- Частота – время интеграции 10 секунд, вместо 20 секунд в ГОСТ 13109-97
- Медленные отклонения напряжения– время интеграции 10 минут, вместо 1 минуты
- Несимметрия напряжений – время интеграции 10 минут вместо 3 секунд
- Гармонические составляющие напряжения– время интеграции 10 минут вместо 3 секунд

4. Добавлены таблицы классификации провалов напряжения, прерываний напряжения и перенапряжений

5. Для медленных отклонений напряжения убраны режимы наименьших и наибольших нагрузок и нормально допустимые значения. В стандарте указываются только предельно допустимые значения, определяемые границами ±10% от номинального напряжения.

6. Введены новые категории событий:

- Прерывания напряжения (кратковременные – до 3 минут, длительные – более 3 минут)
- Напряжения сигналов, передаваемых по электрическим сетям (допустимые уровни и методы оценки соответствия требованиям находятся на рассмотрении)
- Интергармонические составляющие напряжения (допустимые уровни находятся на рассмотрении).

7. Гармонические составляющие напряжения должны измеряться в соответствии с ГОСТ 51317.4.7-2008.

8. В пункте «колебания напряжения и фликер» убран показатель «размах изменения напряжения». В данном случае, если напряжение во время изменения пересекает пороговое значение начала провала напряжения или перенапряжения, то одиночное быстрое изменение напряжения классифицируют как провал напряжения или перенапряжение.

9. Вместо коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, в новом стандарте несинусоидальность напряжения характеризуется суммарным коэффициентом гармонических составляющих.

10. В новом стандарте значения импульсных напряжений, вызываемых молниевыми разрядами, приводятся только на напряжение до 220 кВ, в отличие от старого, в котором данные значения приводились на напряжение до750 кВ.

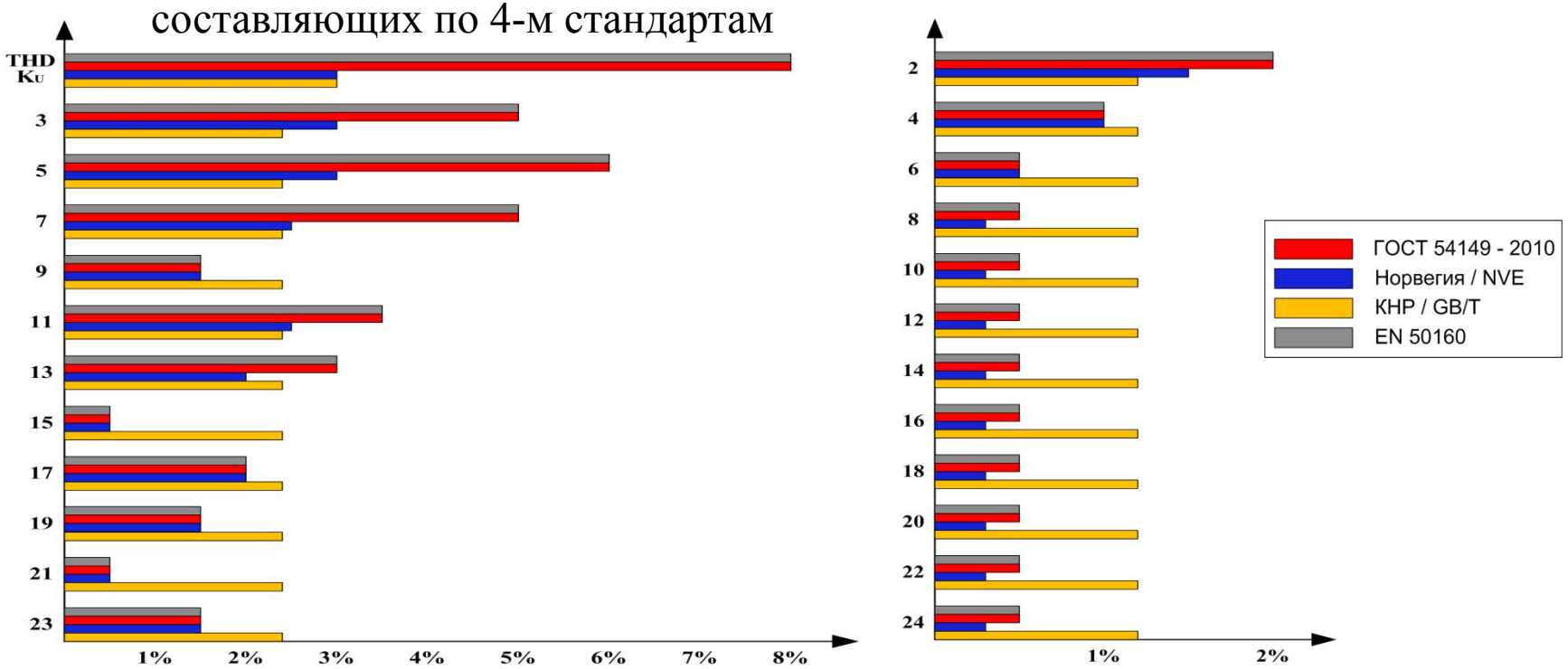
Сравнение предельных значений ГОСТ 13109-97 и ГОСТ 32144-2013

Показатели качества электроэнергии	ГОСТ 13109-97	ГОСТ 32144-2013
1. Медленные изменения напряжения (установившееся отклонение напряжения)	$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%,$ Uном - номинальное линейное напряжение питающей сети; Uy - значение усредненного напряжения на интервале 1 мин.	$\delta U_{(-)} = \left[\left(U_0 - U_{m(-)}\right)/U_0\right] \cdot 100\%,$ $\delta U_{(+)} = \left[\left(U_0 - U_{m(+)}\right)/U_0\right] \cdot 100\%,$ Um(+), Um(-) - значения напряжения электропитания, меньшие и большие U0 соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин. U0 – напряжение, равное стандартному номинальному напряжению Uном или согласованному напряжению Uc;
2. Отклонение частоты	± 0,2 Гц – нормально допустимое значение отклонения частоты ± 0,4 Гц – предельно допустимое значение отклонения частоты	± 0,2 Гц в течение 95 % времени интервала измерения частоты в одну неделю - в синхронизированных системах ± 0,4 Гц в течение 100% времени интервала измерения частоты в одну неделю - в синхронизированных системах ± 1 Гц в течение 95 % времени интервала измерения частоты в одну неделю - в изолированных системах ± 5 Гц в течение 100% времени интервала измерения частоты в одну неделю - в изолированных системах
3. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям	2 % – нормально допустимое значение коэффициента несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям 4 % – предельно допустимое значение коэффициента несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям	2 % - значение коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям в течение 95 % времени интервала в одну неделю 4 % - значение коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям в течение 100 % времени интервала в одну неделю

Сравнительный анализ ГОСТ 32144-2013 с иностранными стандартами

ГОСТ 54149 -2010	EN 50160	Норвегия / NVE	КНР / GB/T
1. Гармонические составляющие напряжения Нормируются значения коэффициентов гармонических составляющих до 40-го порядка 95% времени интервала измерения в неделю	**1. Гармонические составляющие напряжения** Нормируются значения коэффициентов гармонических составляющих до 25-го порядка 95% времени интервала измерения в неделю	**1. Гармонические составляющие напряжения** Нормируются значения коэффициентов гармонических составляющих до 25-го порядка Среднее значение за 10 минут	**1. Гармонические составляющие напряжения** Нормируются значения коэффициентов гармонических составляющих до 25-го порядка Среднее значение за 10 минут
2. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям 2 % - в течение 95 % времени интервала в одну неделю 4 % - в течение 100 % времени интервала в одну неделю	**2. Несимметрия напряжения питания** < 2% в течение 95% времени интервала измерения в неделю	**2. Несимметрия напряжения питания** < 2% в течение 100% времени интервала измерения	**2. Несимметрия напряжения питания** < 4% в течение 95% времени интервала измерения
3. Медленные изменения напряжения ±10% в течение 100% времени интервала измерения в неделю	**3. Колебания напряжения питания** ±10% в течение 95% времени интервала измерения в неделю	**3. Колебания напряжения питания** ±10% в течение 100% времени интервала измерения в неделю	**3. Колебания напряжения питания** ±10% в течение 100% времени интервала измерения в неделю
4. Колебания напряжения Не нормируется	**4. Быстрые изменения напряжения** Не нормируется	**4. Быстрые изменения напряжения** 6% - при 1 изменении в день 4% - до 24 изменений в день 3% - более 24 изменений в день	**4. Быстрые изменения напряжения** 4% – при скорости изменений до 1000 в час 2% – другие
5. Отклонение частоты ± 2% в течение 95 % времени интервала измерения частоты в одну неделю ± 4% в течение 100% времени интервала измерения частоты в одну неделю	**5. Частота сети** ±1% В течение 95% времени интервала измерения в неделю от +4% до -6% в течение 100% времени интервала измерения в неделю	**5. Частота сети** ±2% в течение 100% времени интервала измерения	**5. Частота сети** ±1% в течение 100% времени интервала измерения

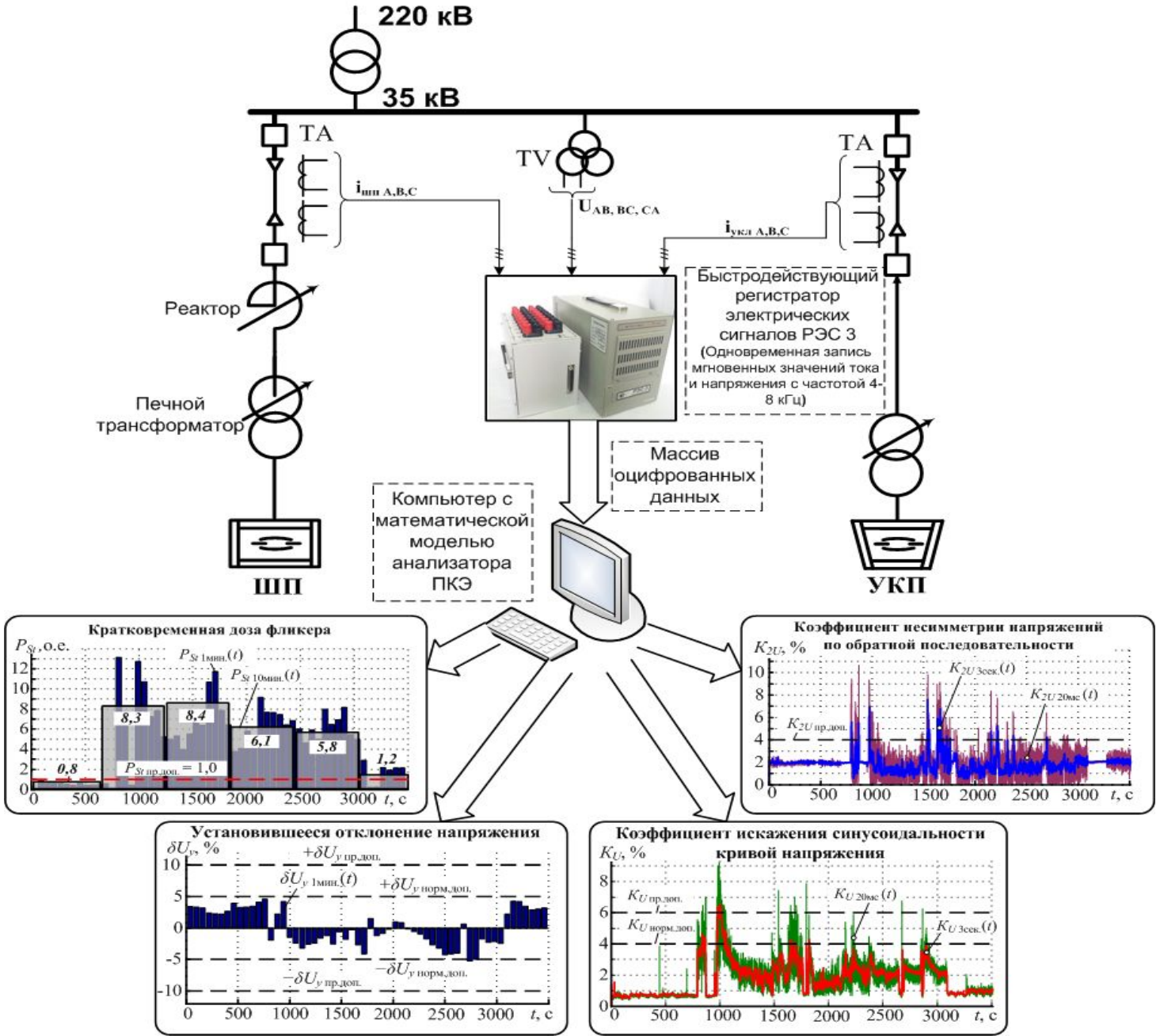
Сравнение нормируемых значений коэффициентов гармонических составляющих по 4-м стандартам



Нормируемый уровень фликера в различных странах и стандартах

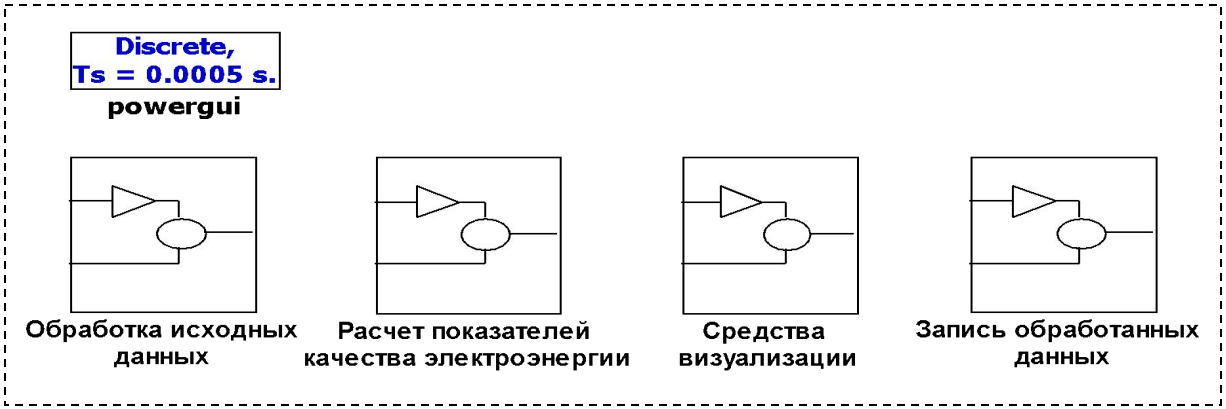
Страна/Стандарт на КЭ	Уровень фликера	Комментарии
Германия	$P_{st} < 0,8$ $P_{lt} < 0,59$	За 100% времени интервала измерения в неделю
Великобритания	$P_{stmax} < 1$	За 100% времени интервала измерения в неделю
КНР	$P_{st} < 1$ $P_{lt} < 0,8$	За 95% времени За 100% времени
Норвегия	$P_{st} < 1$ $P_{lt} < 0,8$	За 95% времени интервала измерения в неделю За 100% времени интервала измерения в неделю
Южная Африка	$P_{lt} < 1$	За 95% времени интервала измерения в неделю
Франция	$P_{lt} < 1$	За 100% времени интервала измерения в неделю
EN 50160	$P_{lt} < 1$	За 95% времени интервала измерения в неделю
ГОСТ – 54149 -2010	$P_{st} < 1,38$ $P_{lt} < 1$	За 100% времени интервала измерения в неделю

Основные этапы расчета ПКЭ с использованием регистратора электрических сигналов и математической модели анализатора ПКЭ



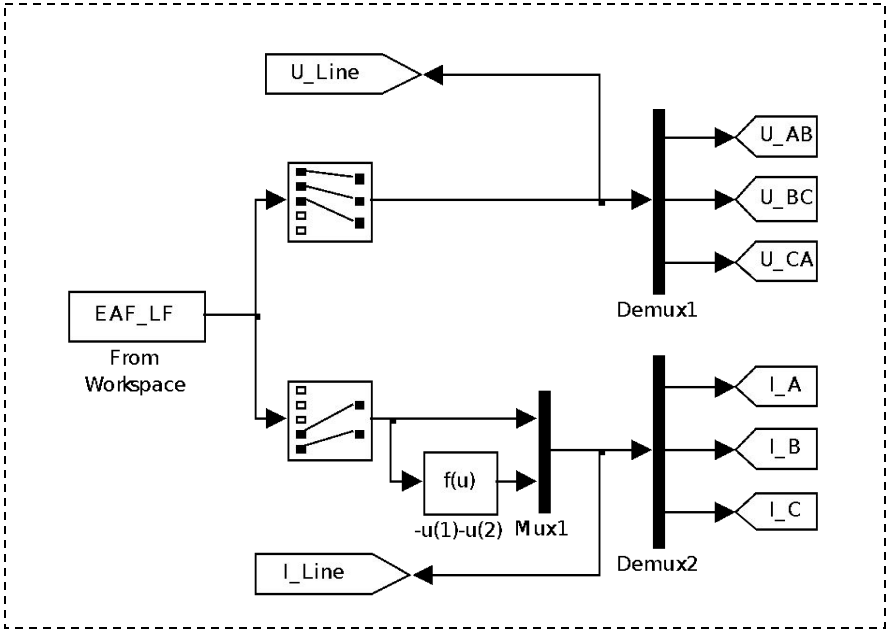
СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АНАЛИЗАТОРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЙ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Структура математической модели анализатора качества электроэнергии, реализованная в программе Matlab-Simulink



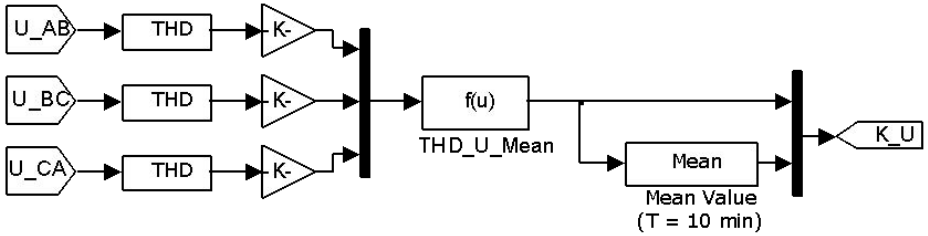
1 Структура блока обработки экспериментальных данных

(Массив мгновенных значений токов и напряжений поступает в математическую модель с использованием блока «From Workspace», затем осуществляется разделение сигналов на напряжения и токи. Линейным напряжениям и токам присваиваются уникальные обозначения)

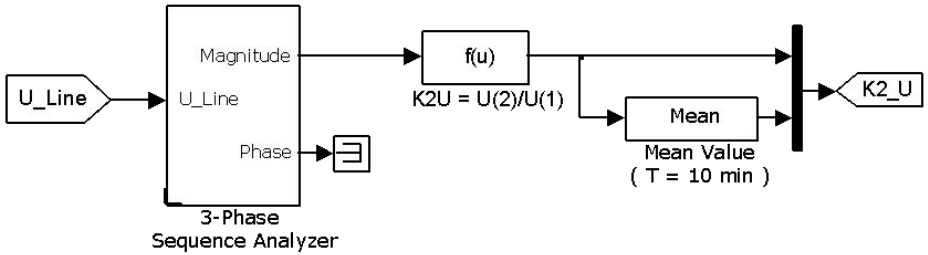


2 Структура блока расчета основных ПКЭ

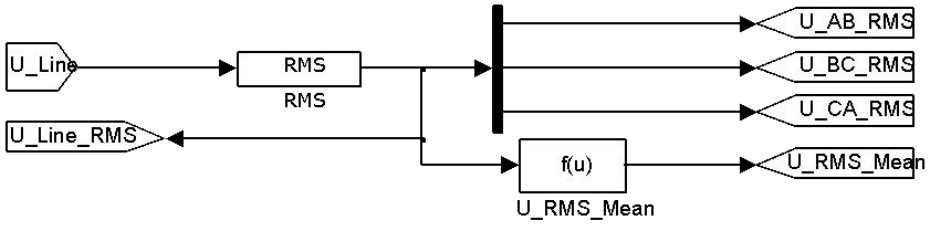
РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОСТИ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ



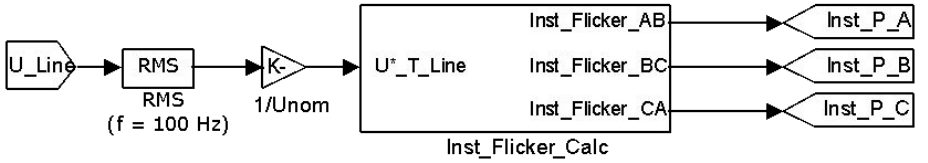
РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ



РАСЧЕТ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЗНАЧЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ



РАСЧЕТ МГНОВЕННОГО ФЛИКЕРА



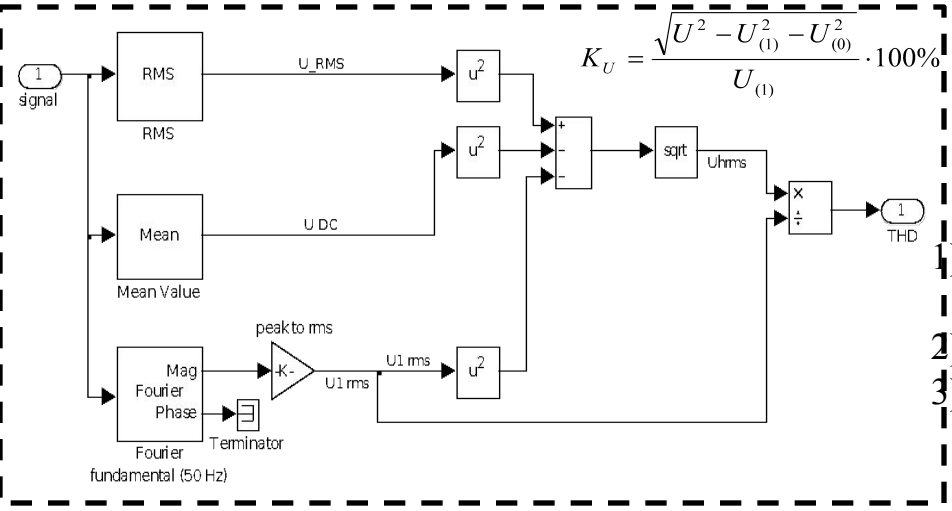
1. Расчет коэффициентов K_U выполняется по отдельности для каждого линейного напряжения. Выходные сигналы с блоков «THD» умножаются на коэффициенты K = 100 и микшируются в один канал. С помощью блока «Fnc» рассчитывается среднее арифметическое значение коэффициента K_{Ucp}, которое затем в соответствии со стандартом подвергается усреднению за 10 минут с помощью блока «Mean».

2. В блоке «3-Phase Sequence Analyzer» осуществляется расчет симметричных составляющих. Для прямой и обратной последовательности напряжений, с помощью функционального блока «Fnc» находится их отношение и умножается на 100%. После усреднения за 10 минут (с помощью блока «Mean») получается сигнал коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности.

3. В данном блоке рассчитываются действующие значения линейных напряжений , которые затем используются для определения установившегося отклонения напряжения δUy (для него составляется вспомогательная программа , в которой для каждого минутного интервала времени выполняется расчет отклонения напряжения и для анализируемого интервала строится график δUy(t))

4. Мгновенные значения напряжения линейных напряжений $U_{AB}(t)$, $U_{BC}(t)$, $U_{CA}(t)$ поступают на вход блока «RMS», который осуществляет расчет действующих значений за половину периода питающего напряжения. Далее сигналы подвергаются нормированию путем умножения на постоянный коэффициент 1/Ulmном., где Ulmном. – номинальная амплитуда линейного напряжения. После чего, нормированные сигналы поступают на вход блока расчета мгновенного фликера.

Структура блока расчета коэффициента искажения синусоидальной кривой напряжения



Производится расчет результирующего действующего значения высших гармоник через разность результирующего действующего значения напряжения, действующего значения основной гармоники и постоянной составляющей . Для создания блока требуется три основных элемента:

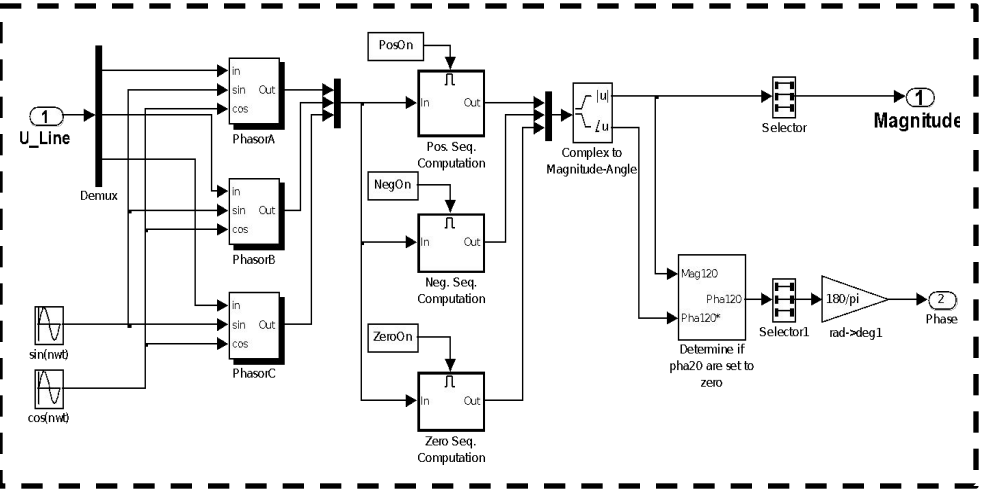
1)блока вычисления действующего значения сигнала «RMS»;

2) блока расчета среднего значения «Mean»;

3) блока преобразования Фурье «Fourier» для расчета действующего значения основной гармоники.

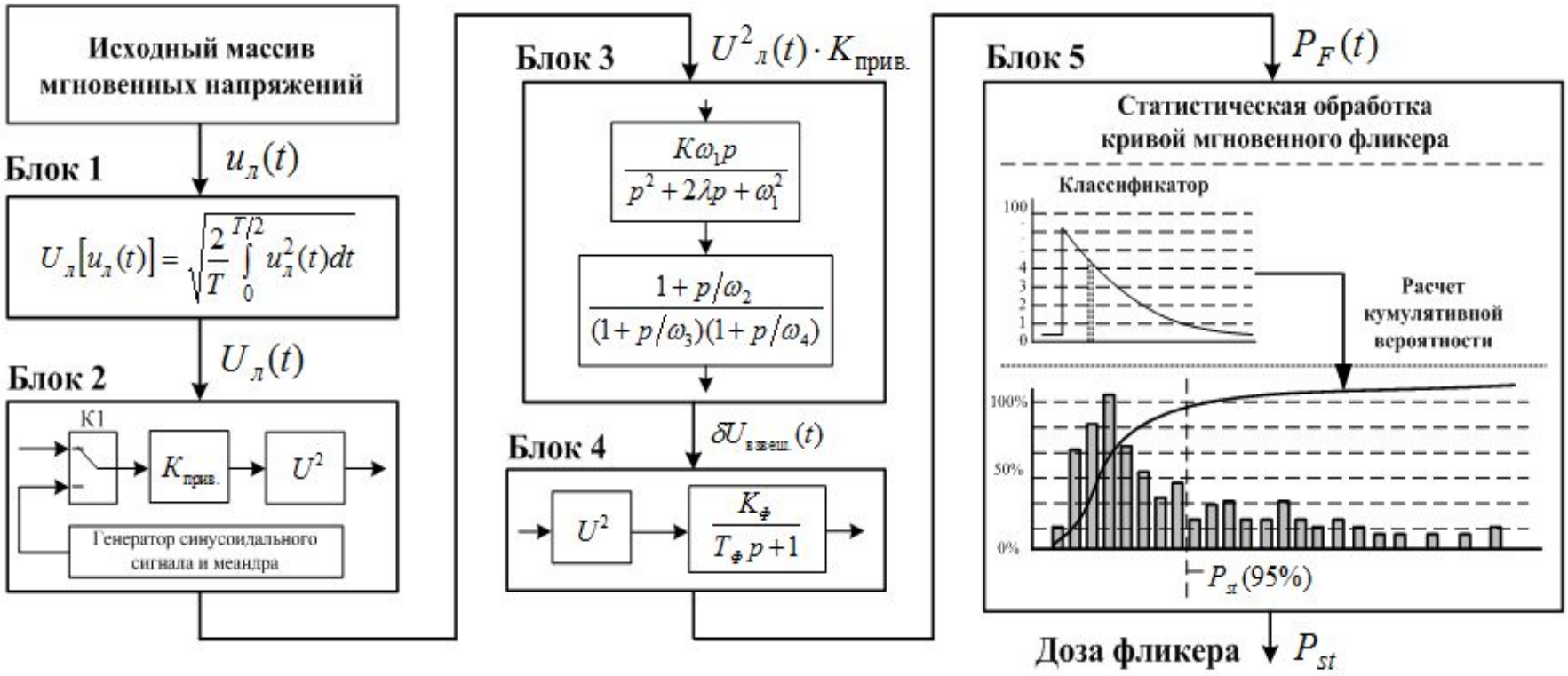
Рассмотренная структура реализована в готовом блоке «THD».

Структура блока определения симметричных составляющих линейных напряжений «3-Phase Sequence Analyzer»



Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} осуществляется на основе метода симметричных составляющих с определением прямой $U_{л1}$ и обратной $U_{л2}$ последовательностей линейных напряжений с помощью готового блока «3-Phase Sequence Analyzer» . В данном блоке мгновенные значения линейных напряжений с помощью опорных синусоидальных сигналов Sin(nwt) и Cos(nwt), а также блоков «Phasor» преобразуются в векторы и записываются в комплексной форме, а затем осуществляется расчет симметричных составляющих.

Блок схема измерения фликера в соответствии с ГОСТ Р 32144-2013



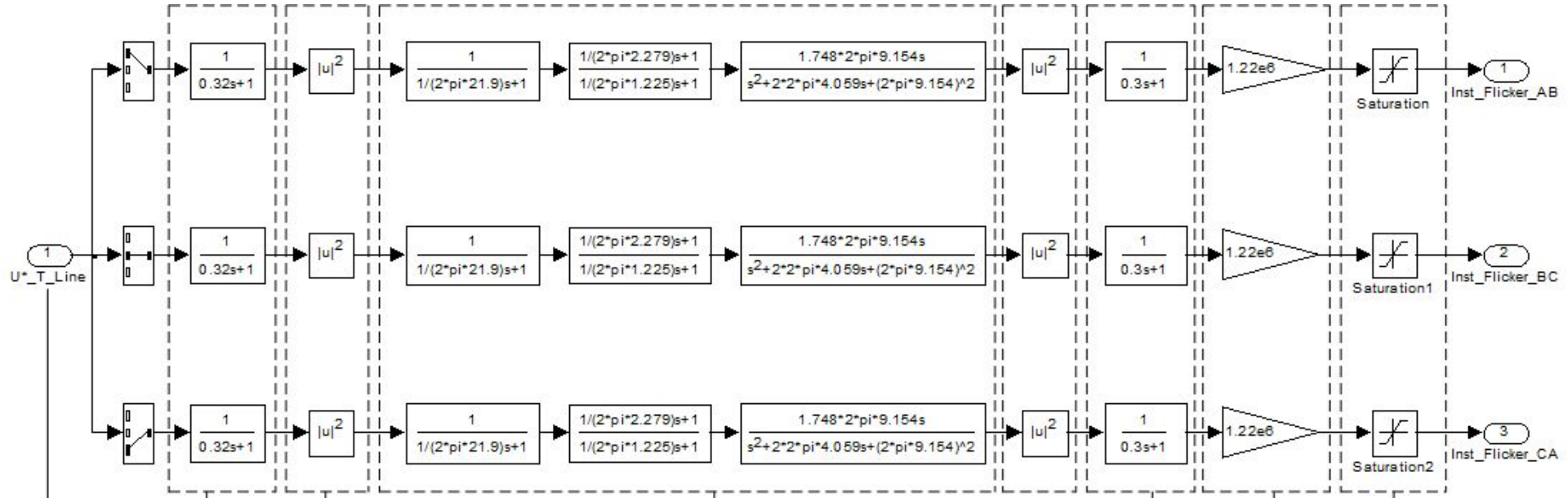
Блок 1 – блок расчета действующих значений напряжения за полпериода основной частоты.

Блок 2 – блок приведения уровня сигнала к базовому уровню напряжения фликерметра 230 В.

Блоки 3 и 4 – блоки, реализующие частотную характеристику, воспроизводящую восприимчивость человеческого глаза к мерцаниям светового потока. На выходе блока 4 формируется значение мгновенного фликера.

Блок 5 – блок статистической обработки, где происходит классификация мгновенного фликера по заранее определенным уровням, строится распределение плотности вероятности и подсчитывается кумулятивная вероятность, которая на уровне 95% определяет кратковременную дозу фликера.

Структура блока расчета мгновенного фликера

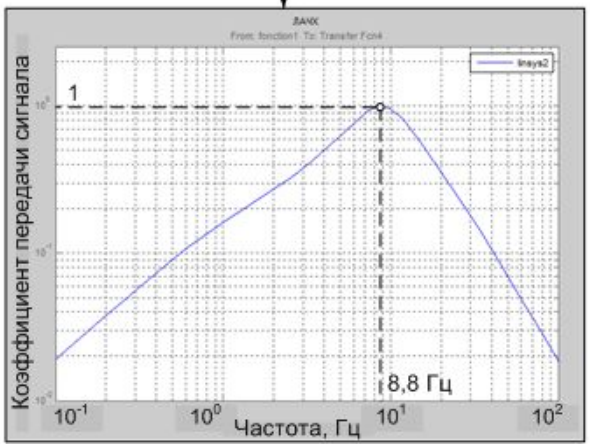


Квадратичные демодуляторы

Динамические звенья, реализующие реакцию человеческого глаза к мерцаниям светового потока

Сглаживающие фильтры с постоянной времени T = 0,3 с

Фильтры нижних частот (усреднение сигнала за 16 периодов пром. частоты)



Коэффициенты приведения мгновенного фликера к относительным единицам

Действующие значения линейных напряжений в относительных единицах, рассчитываемые за половину периода питающего напряжения

Блоки ограничения максимальной величины мгновенного фликера

Вспомогательная программа, реализующая работу классификатора фликерметра

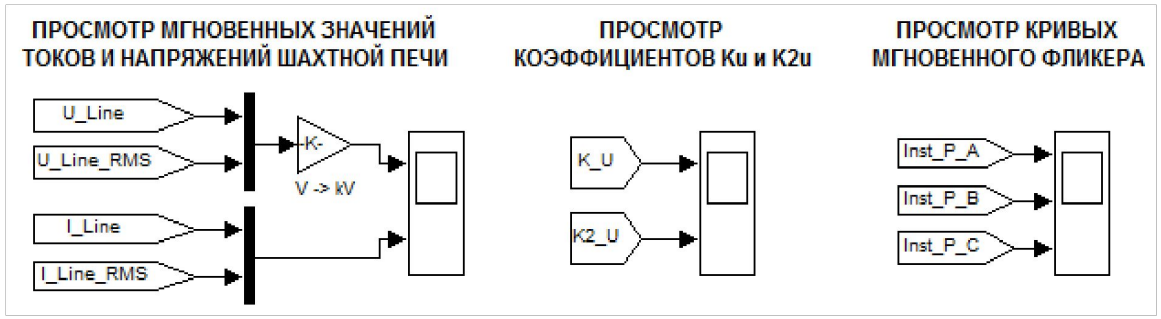
Исходной информацией для расчетов кратковременных доз фликера являются массивы мгновенных значений фликера «P_AB, BC, CA» и времени «Time_1», формируемых основной моделью анализатора качества электроэнергии.

```
% Задание числа классов (по ГОСТ Р 51317.4.15-99 не менее 64)
K = 100;
% Определение числа точек в исходном массиве мгновенного фликера
N_max = length(P_AB);
% Определение максимального значения мгновенного фликера
Max_F = max(P_AB);
% Задание исходных массивов функции плотности распределения и интегрального распределения мгновенного фликера
B = zeros(1, K); I = zeros(1, K);
% ПОЛУЧЕНИЕ ФУНКЦИИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
% Для каждого класса делаем
for  k = 1 : 1 : K
i = 0;    % рабочая переменная, показывающая количество точек в каждом классе функции плотности распределения
% Для каждого значения исходного массива «P_AB» делаем
for  n = 1 : 1 : N_max
% Если значение попадает в заданный класс, тогда для этого класса прибавляем единицу
  % верхний уровень класса     % нижний уровень класса
if (P_AB(n) <= Max_F*k/K) && (P_AB(n) > Max_F*(k-1)/K)
i = i + 1;
% Если нет, то ничего не делаем;
end; % Конец внутреннего цикла
% Определяем сколько точек попало в каждый класс
B(k) = i;
end; % Конец внешнего цикла
```

```
% ПОЛУЧЕНИЕ ФУНКЦИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ
% Определяем конечное значение функции интегрального распределения
I(K) = B(K);
% Для каждого класса функции плотности распределения выполняем следующее действие: последовательно складываем, начиная с конца массива «B», значения «n» для каждого класса, т.е. проводим интегрирование функции «B»
for k = (K-1) : -1 : 1
I(k) = I(k+1) + B(k) end;
% Находим функцию интегральной вероятности
I_per = I*100/N_max;
% ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДАННЫХ УРОВНЕЙ ФЛИКЕРА
% Для каждого класса функции интегральной вероятности делаем сравнение
for k = 1 : 1 : K
if  I_per(k) > 0.1   P0.1 = Max_P*k/K     end;
if  I_per(k) > 0.7   P0.7 = Max_P*k/K     end;
if  I_per(k) > 1.0   P1.0 = Max_P*k/K     end;
if  I_per(k) > 1.5   P1.5 = Max_P*k/K     end;
if  I_per(k) > 2.2   P2.2 = Max_P*k/K     end;
if  I_per(k) > 3.0   P3.0 = Max_P*k/K     end;
if  I_per(k) > 4.0   P4.0 = Max_P*k/K     end;
if  I_per(k) > 6.0   P6.0 = Max_P*k/K     end;
if  I_per(k) > 10    P10 = Max_P*k/K      end;
if  I_per(k) > 13    P13 = Max_P*k/K      end;
if  I_per(k) > 17    P17 = Max_P*k/K      end;
if  I_per(k) > 30    P30 = Max_P*k/K      end;
if  I_per(k) > 50    P50 = Max_P*k/K      end;
if  I_per(k) > 80    P80 = Max_P*k/K      end;
% Определение сглаженных уровней фликера
P1S = (P0.7 + P1 + P1.5)/3;
P3S = (P2.2 + P3 + P4)/3;
P10S = (P6 + P8 + P10 + P13 + P17)/5;
P50S = (P30 + P50 + P80)/3;
% РАСЧЕТ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ДОЗЫ ФЛИКЕРА
P_St = sqrt(0.0314*P0.1 + 0.0525*P1S + 0.0657*P3S + 0.28*P10S + 0.08*P50S);
```

% Уровни фликера P0.1, P0.7, P1.0 и т.д. характеризуют значения мгновенного фликера, которые были превышены в течение 0,1%, 0,7%, 1% … времени за интервал наблюдения 10 мин.

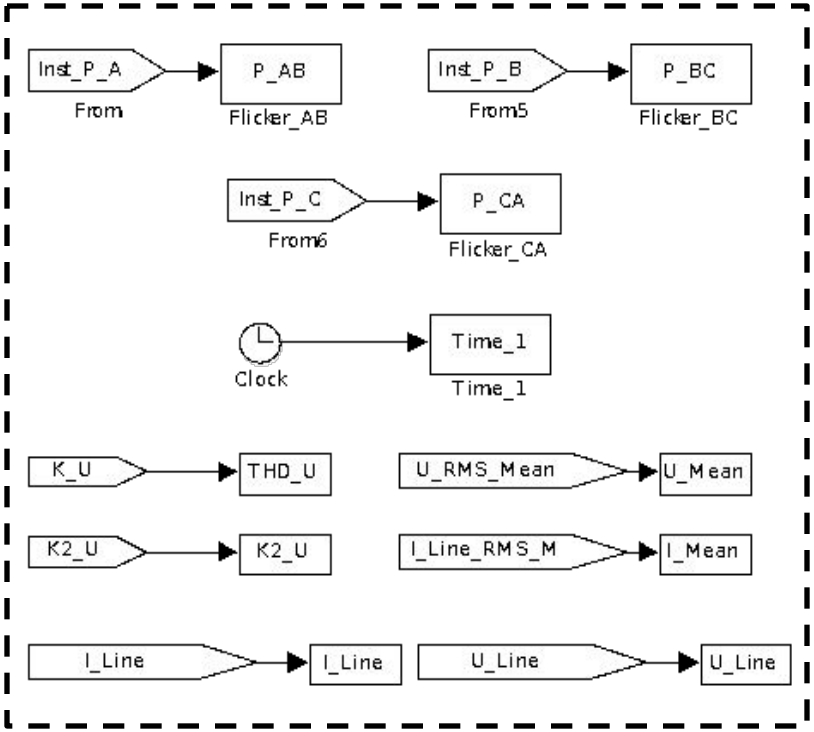
3. Структура блока визуализации сигналов



Данный блок необходим для отображения результатов расчета ПКЭ.

Отображения мгновенных значений напряжений и токов ДСП, а также рассчитанных ПКЭ осуществляется в осциллографах «Scope».

4. Структура блока записи обработанных данных

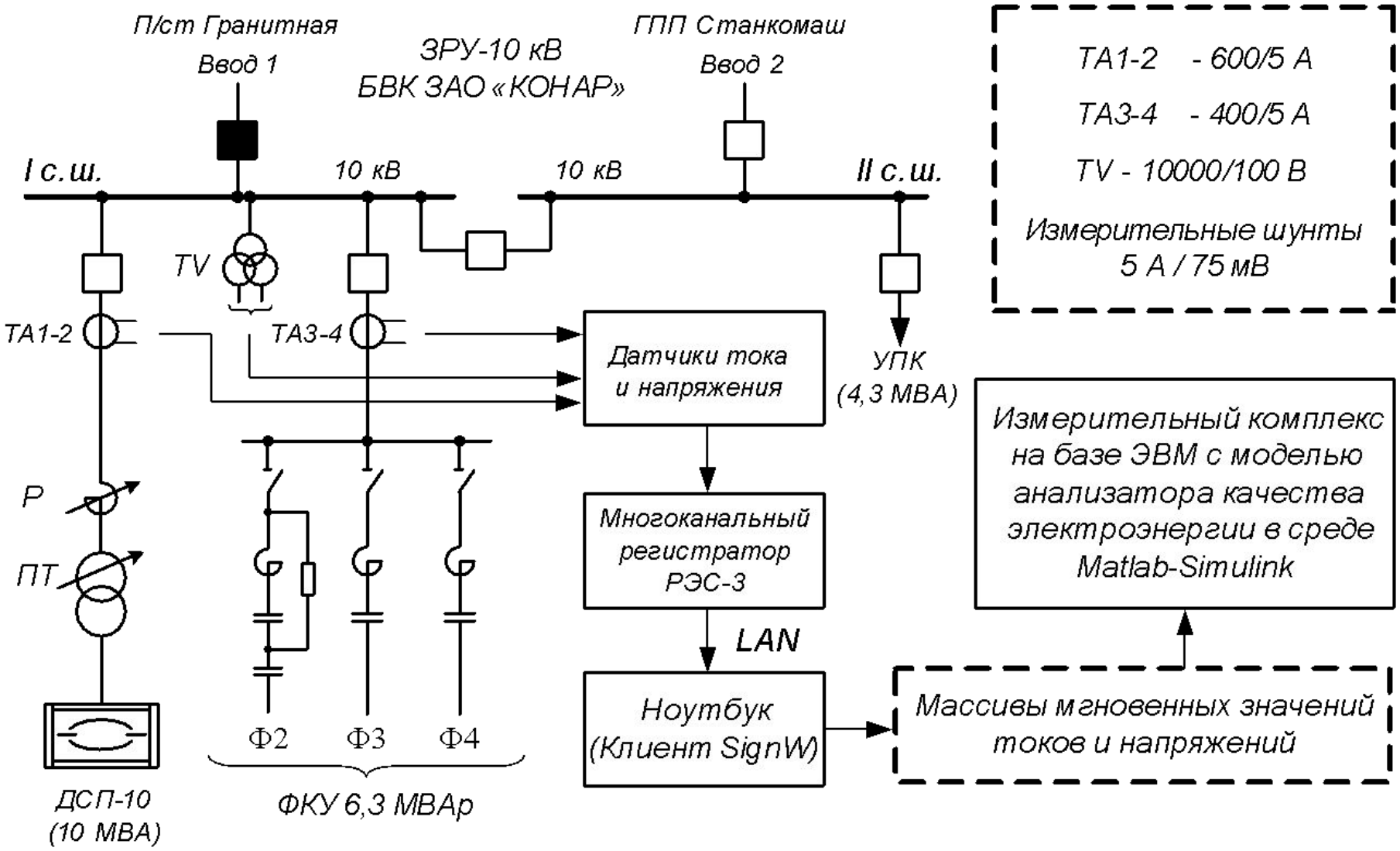


Основное назначение данного блока – запись рассчитанных ПКЭ в отдельные массивы для последующей графической обработки результатов расчетов, а также формирование исходных сигналов для вспомогательных программ вычисления установившегося отклонения напряжения и кратковременной дозы фликера.

При создании блока использовались элементы библиотеки Simulink «From», «To Workspace» и «Clock». Последний элемент служит для записи массива модельного времени «Time_1», который необходим для построения графиков сигналов с использованием внутренней команды «plot», а также для запуска программы расчета показателя δUy. Еще одним назначением рассматриваемого блока является запись массивов мгновенных значений токов и напряжений для анализа n-ых гармонических составляющих с помощью инструмента быстрого преобразования «FFT Analysis».

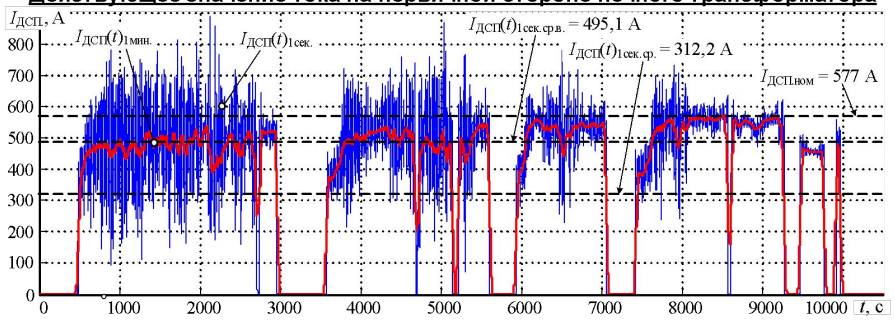
Применение виртуального анализатора ПКЭ на практике для оценки ПКЭ в системах электроснабжения ДСП различной мощности

Упрощенная схема электроснабжения металлургического завода БВК ЗАО Конар и ДСП-10



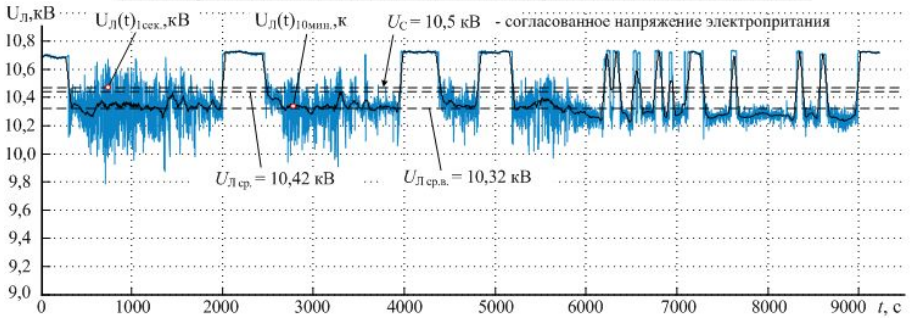
БВК ЗАО Конар: ДСП-10
ГОСТ 13109-97 и ГОСТ 32144-2013

Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора

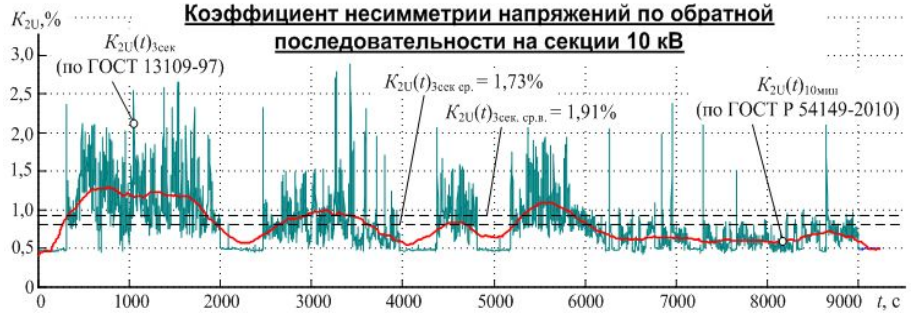


Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на секции 10 кВ

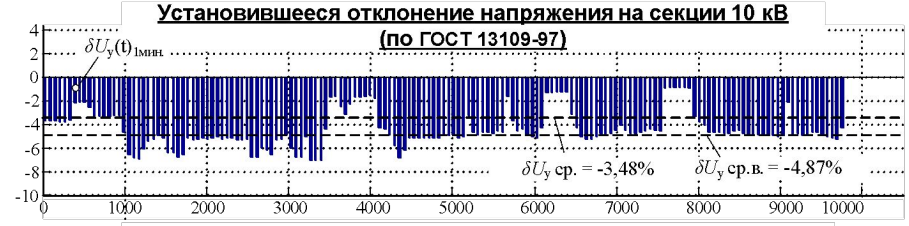
Действующее значение линейного напряжения на секции 10 кВ



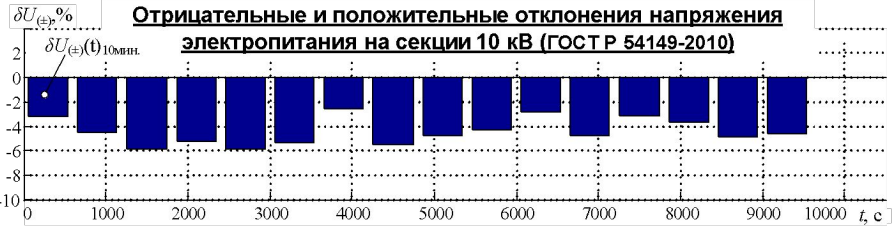
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности на секции 10 кВ



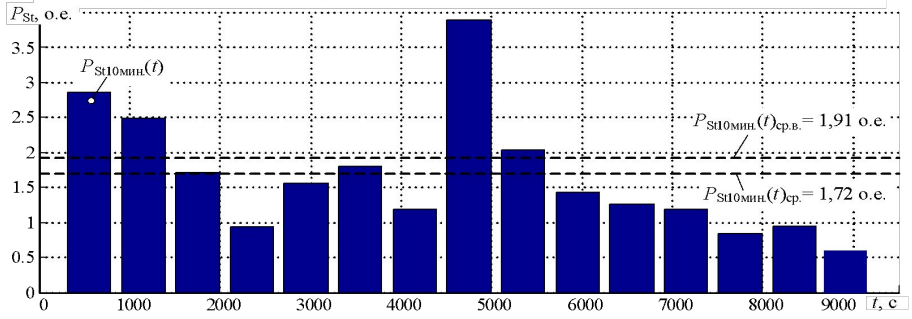
Установившееся отклонение напряжения на секции 10 кВ (по ГОСТ 13109-97)



Отрицательные и положительные отклонения напряжения электропитания на секции 10 кВ (ГОСТ Р 54149-2010)



Кратковременная доза фликера (по ГОСТ 13109-97 и ГОСТ Р 54149-2010)



Выводы

Сравнение старого и нового стандартов показало, что в новом стандарте появились новые термины (сетевая организация, качество электрической энергии и т.д.), изменилось время интеграции ПКЭ, так же были введены категории событий (прерывания напряжения, интергармонические составляющие напряжения и т.д.), а так же убраны некоторые показатели старого стандарта. Проведение сравнительного анализа с зарубежными стандартами выявило отличия в ПКЭ в зависимости от состояния электрической системы данной страны.

Разработана новая математическая модель анализатора качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ Р 54149-2010. Модель реализована в математическом пакете MATLAB с приложением Simulink. С использованием модели рассчитываются 5 основных показателей: медленное изменения напряжения, суммарное содержание гармонических составляющих линейного напряжения и тока, коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, кратковременная доза фликера, отклонение напряжения.

На основе экспериментальных данных, полученных на различных электросталеплавильных комплексах России (Шахтная печь ШП-120 (85 МВА) Череповецкого металлургического комбината ОАО «Северсталь», дуговая сталеплавильная печь ДСП-10 сталелитейного завода БВК ЗАО «КОНАР» г. Челябинск) были рассчитаны основные ПКЭ. На основе полученных результатов была выполнена оценка влияния обновленных алгоритмов расчета ПКЭ.

По результатам анализа отмечается сильное влияние изменения времени интеграции показателей качества электроэнергии, что можно увидеть на примере Челябинского металлургического комбината. Показатели усредняются в такой степени, что в итоге не достигают предельных значений. А именно:

- суммарное содержание гармонических составляющих напряжения в соответствии с результатами анализа по ГОСТ Р 54149-2010 не превышает 3%, а по ГОСТ 13109-97 доходит до значения 6%;
- коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, при анализе ПКЭ по ГОСТ Р 54149-2010, достигает 2%, в отличие от данного параметра по ГОСТ 13109-97, который в наихудшем случае достигает 7%;
- медленное изменение напряжения в результате анализа ПКЭ по ГОСТ Р 54149-2010 не превышает 2,5%, в отличие от данного параметра по ГОСТ 13109-97, который в наихудшем случае достигает 5%.

В соответствии с этим можно сказать, что при данных ПКЭ, анализируемых по ГОСТ Р 54149-2010, становится возможным режим работы электрооборудования, который при ПКЭ, анализируемых по ГОСТ 13109-97, являлся недопустимым.