



PQM-700

АНАЛИЗАТОР КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Версия 1.20 авг.2023г.

В связи с продолжающейся разработкой продукции Производитель оставляет за собой право вносить изменения в их функциональность, эксплуатацию и технические параметры. В этом руководстве описаны анализаторы версии прошивки 1.15 и ПО Sonel Analysis версии 4.4.8.

1	БЕЗОПАСНОСТЬ	7
2	ПОДГОТОВКА ИЗМЕРИТЕЛЯ К РАБОТЕ.....	8
3	ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ.....	8
3.1	Питание анализатора	11
3.2	Степень защиты и условия эксплуатации	12
3.3	Монтаж на DIN-рейку.....	13
3.4	Измеряемые параметры	13
3.5	Соответствие стандартам	16
4	ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПРИБОРА	17
4.1	Светодиоды сигнализации	17
4.2	Включение измерителя.....	18
4.3	Функция автоматического выключения	18
4.4	Синхронизация с ПК	18
4.5	Сигнализация ошибки подключения	19
4.6	Предупреждение о высоком напряжении или токе	20
4.7	Измерение	20
4.7.1	Начало и остановка регистрации.....	20
4.7.2	Ориентировочное время регистрации.....	21
4.8	Измерение пускового тока.....	22
4.9	Блокировка клавиш.....	22
4.10	Режим ожидания («спящий» режим)	22
4.11	Обновление ПО	23
4.11.1	Автоматическое обновление	23
4.11.2	Ручное обновление.....	23
5	ПО «SONEL ANALYSIS»	24
6	ПОДКЛЮЧЕНИЕ АНАЛИЗАТОРА.....	24
7	КОНСТРУКЦИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ.....	28
7.1	Входы по напряжению.....	28
7.2	Входы по току	29
7.2.1	Цифровой интегратор.....	29

7.3	Дискретизация сигнала	30
7.4	Синхронизация ФАПЧ	31
7.5	Измерение частоты	32
7.5.1	Метод измерения гармонических составляющих	32
7.6	Обнаружение событий	33
8	РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ	36
8.1	Расчётные формулы для различных видов сети	36
8.2	Методы усреднения параметров	46
9	РУКОВОДСТВО ПО ПАРАМЕТРАМ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	47
9.1	Общая информация	47
9.1.1	Жёсткие клещи (СТ) для измерения переменного тока (AC)	48
9.1.2	Токовые клещи для измерения переменного и постоянного токов (AC/DC)	49
9.1.3	Гибкие клещи Роговского	49
9.2	Мерцание света (фликер)	51
9.3	Измерение мощности	52
9.3.1	Активная мощность	52
9.3.2	Реактивная мощность.....	53
9.3.3	Реактивная мощность в 3-х проводных схемах.....	57
9.3.4	Реактивная мощность и счётчики реактивной энергии.....	58
9.3.5	4-квadrантные счётчики реактивной энергии	60
9.3.6	Полная мощность.....	61
9.3.7	Мощность искажения DB и эффективная полная мощность искажения SeN	63
9.3.8	Коэффициент мощности.....	64
9.4	Гармоники	64
9.4.1	Характеристика гармоник в трёхфазных сетях	66
9.4.2	Коэффициент гармонических искажений (THD).....	68
9.4.3	Коэффициент искажения тока TDD.....	68
9.5	Асимметрия	69
9.6	Провалы, перенапряжения и прерывания напряжения	71
9.7	Линии СВEMA и ANSI	73
9.8	Усреднение результатов измерений	75
10	ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	78
10.1	Входы	78

10.2	Дискретизация и часы реального времени RTC	79
10.3	Измеряемые параметры – точности, разрешения и диапазоны	79
10.3.1	Условия для поверки	79
10.3.2	Напряжение.....	80
10.3.3	Ток	80
10.3.4	Частота	81
10.3.5	Гармоники	81
10.3.6	Мощность и энергия.....	82
10.3.7	Фликер	84
10.3.8	Асимметрия.....	85
10.4	Регистрация событий – действующие значения напряжения и тока	85
10.5	Регистрация событий – дополнительные параметры	85
10.6	Гистерезис регистрации событий	86
10.7	Измерение пускового тока.....	87
10.8	Регистрация	87
10.9	Питание, аккумулятор и нагреватель.....	88
10.10	Поддерживаемые сети	89
10.11	Поддерживаемые токовые клещи.....	90
10.11.1	Клещи С-4	91
10.11.2	Клещи С-6А	92
10.11.3	Клещи С-7	94
10.11.4	Клещи F-1, F-2А, F-3А	95
10.11.5	Клещи F-2АНД, F-3АНД	96
10.11.6	Клещи F-1А6, F-2А6, F-3А6.....	96
10.11.7	Клещи F-1А1, F-2А1, F-3А1.....	97
10.12	Интерфейс.....	97
10.13	Условия окружающей среды и другие технические данные.....	97
10.14	Безопасность и электромагнитная совместимость.....	97
10.15	Стандарты	98
11	КОМПЛЕКТАЦИЯ.....	98
11.1	Стандартная комплектация	98
11.2	Дополнительная комплектация	99
12	ОБСЛУЖИВАНИЕ ПРИБОРА.....	99

13 УТИЛИЗАЦИЯ	100
14 СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗГОТОВИТЕЛЕ.....	100

1 БЕЗОПАСНОСТЬ

PQM-700 – разработан для проведения анализа основных параметров качества электрической энергии. Для обеспечения правильного обслуживания прибора и достоверности полученных результатов измерений необходимо придерживаться следующих рекомендаций:



Перед работой с прибором необходимо изучить данное Руководство, тщательно соблюдать правила защиты, а также рекомендации Изготовителя.

Применение прибора, несоответствующее указаниям Изготовителя, может быть причиной поломки прибора и источником серьёзной опасности для Пользователя.

- Прибором могут пользоваться лица, имеющие соответствующую квалификацию и допуск к данным работам;
- Во время измерений Пользователь не может иметь непосредственного контакта с открытыми частями, доступными для заземления (например, открытые металлические трубы центрального отопления, проводники заземления и т.п.); для обеспечения хорошей изоляции следует использовать соответствующую спецодежду, перчатки, обувь, изолирующие коврики и т. д.;
- Нельзя касаться открытых токоведущих частей, подключенных к электросети;
- **Недопустимо применение:**
 - измерителя, повреждённого полностью или частично;
 - проводов с повреждённой изоляцией;
 - измерителя, продолжительное время хранившийся в неправильных условиях (например, в сыром помещении);
- Ремонт прибора может выполняться лишь авторизованным Сервисным Центром.



Не выполнять измерения во взрывоопасной среде (например, в присутствии горючих газов, паров, пыли и т.д.). Использование измерителя в таких условиях может вызвать искрение и взрыв.

Настоящее изделие относится к универсальным измерительным приборам для измерения и контроля электрических величин (напряжения, силы тока, сопротивления и мощности).



Анализатор оснащён внутренней литий-ионной батареей, которая была проверена независимой лабораторией и сертифицирована для проверки соответствия параметров качества стандарту ООН 38.3 – «Рекомендации ООН по перевозке опасных грузов. Справочник исследований и критериев», 5-е издание. Опубликовано ООН (ST/SG/AC.10/11/Rev.5). Таким образом, анализатор разрешён для воздушных, морских и автомобильных перевозок.

Символы, отображённые на приборе:



Клавиша для включения и выключения питания измерителя.



Измеритель защищён двойной и усиленной изоляцией.



Перед работой с прибором необходимо изучить данное Руководство, тщательно соблюдать правила защиты, а также рекомендации Изготовителя.

MAX 760 V~ - Внимание, максимальное напряжение на измерительных входах не более 760В переменного тока.



Сертификат безопасности Европейского стандарта.



Измеритель, предназначенный для утилизации, следует передать Производителю. В случае самостоятельной утилизации ее следует проводить в соответствии с действующими правовыми нормами.

CAT IV 300V - Маркировка на оборудовании означает, что оно используется в сетях напряжением до 1000 В, относится к **IV** категории монтажа и максимальное импульсное напряжение, к воздействию которого должно быть устойчиво — 8000 В.

2 ПОДГОТОВКА ИЗМЕРИТЕЛЯ К РАБОТЕ

После покупки измерителя следует проверить комплектность содержимого упаковки.

Перед тем как приступить к измерениям, необходимо:

- убедиться, что состояние элементов питания позволяет выполнять измерения;
- проверить целостность корпуса измерителя и изоляции измерительных проводов.



Подключение несоответствующих или повреждённых проводов может привести к поражению опасным током.

3 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Развитие промышленности во второй половине XX века привело к потреблению больших мощностей, что в свою очередь привело к ухудшению качества электрической энергии. В связи с этим был принят ГОСТ 13109-67 «Нормы качества электрической энергии», который в последующие года претерпевал ряд изменений и в ГОСТ 13109-97 включал в себя уже 11 параметров. С внедрением современного высокотехнологичного оборудования потребителей наблюдалось несоответствие отдельных

показателей качеств, что в последствии 2013 году был принят ГОСТ 54149-2010 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.» Однако не соответствие требованиям национальным стандартам, таким как IEC 61000-4-30:2008 (ГОСТ 30804.4.30-2013), IEC 61000-4-7:2009 (ГОСТ 30804.4.7-2013), IEC 61000-4-15:2010 (ГОСТ Р 51317.4.15-2012) и европейскому стандарту EN 50160:2010 привело к созданию государственного стандарта ГОСТ 32144-2013 (введён 01.07.2014г.).

Анализатор параметров качества электрической энергии PQM-700 (Рис.1) – это передовой высокотехнологичный продукт, позволяющий проводить всесторонние измерения, анализ и регистрацию параметров качества электрической энергии в соответствии с ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Анализатор полностью соответствует ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.» класса S.



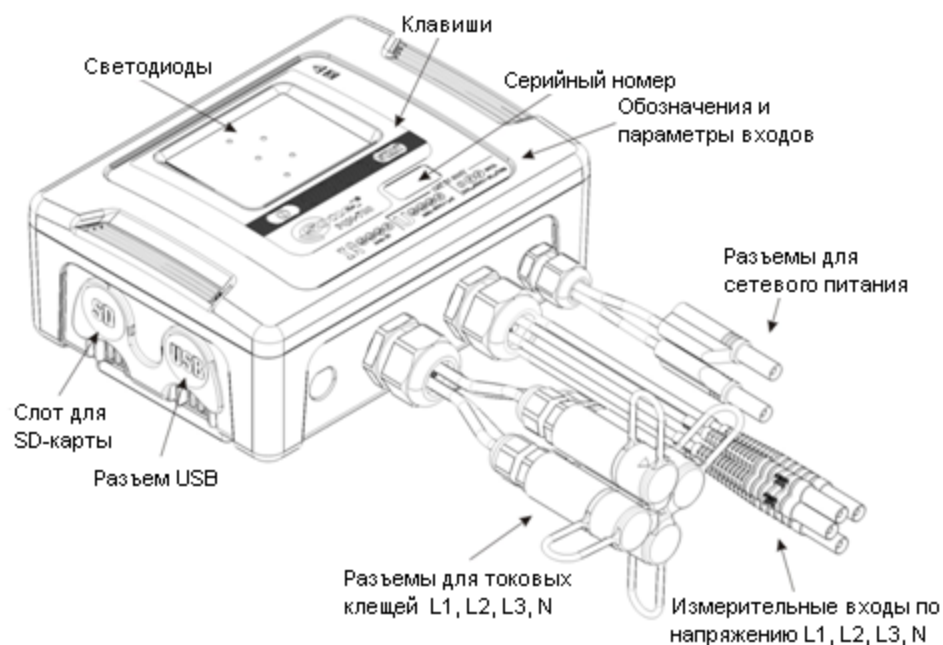


Рис.1 Анализатор качества электрической энергии PQM-700. Общий вид.

Анализатор имеет 4 (четыре) входа по напряжению, обозначенных L1/A, L2/B, L3/C, N. Максимальное значение напряжения на данных входах не должно превышать ± 1150 В (пиковое значение). При совместном использовании с трансформаторами напряжения, анализатор можно применять в сетях с более высоким напряжением.

Для измерения тока используются четыре токовых входа, заканчивающихся разъёмами для подключения токоизмерительных клещей. К ним можно подключить: гибкие клещи F-1, F-2A/F-2AHD, F-3A/F-3AHD, с номинальным диапазоном до 3000 А (отличаются только диаметром обхвата), жёсткие клещи C-4 (диапазон до 1000 А переменного тока), C-5 (диапазон до 1000 А переменного и постоянного тока), C-6A (диапазон до 10 А переменного тока) и C-7 (диапазон до 100 А переменного тока). Также, как и при измерении напряжения, диапазон по току может быть изменён с помощью дополнительных трансформаторов тока, например, при применении трансформатора тока с коэффициентом 1000/5 с клещами C-6 можно измерять токи до 1000 А.

Прибор имеет съёмную карту памяти стандартной ёмкости 4 Гб. Данные с карты памяти могут быть переданы на ПК с помощью USB-соединения или внешнего считывающего устройства (card reader).



Извлечение карты памяти microSD производится при выключенном анализаторе.

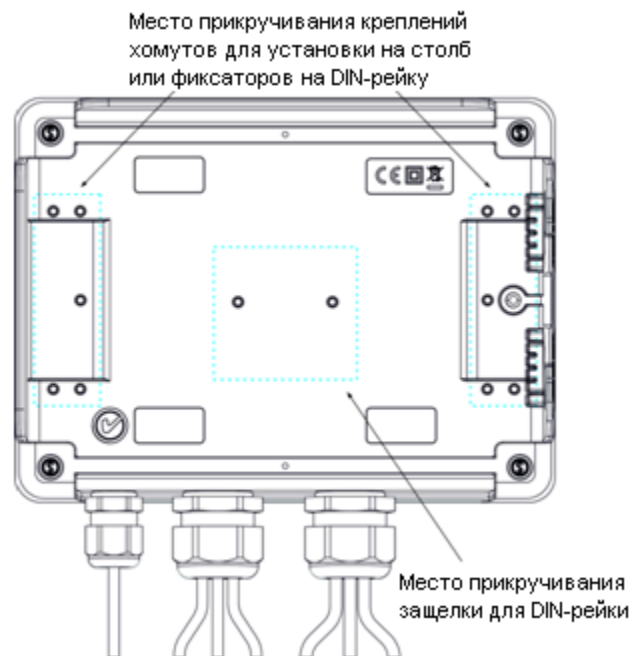


Рис.2 Задняя панель анализатора PQM-700.

Регистрируемые параметры разделены на группы, которые можно независимо от других включать или исключать из регистрации, что позволяет рационально использовать место на карте памяти. Не регистрируемые параметры не занимают места, тем самым можно значительно продлить время записи других параметров.

Анализатор PQM-700 содержит внутренний блок питания с широким диапазоном входного напряжения 100...415 В переменного (140...415 В постоянного), который имеет отдельные провода с разъёмами типа «банан» на концах.

Бесперебойную работу при условии пропадания напряжения питания обеспечивает встроенный литий-ионный аккумулятор.

Пользовательский интерфейс включает в себя 5 светодиодов, а также 2 клавиши.

Русифицированное бесплатное программное обеспечение «SONEL ANALYSIS» позволяет использовать все возможности измерителя (настройка и анализ полученных значений).

Интерфейс с компьютером осуществляется через USB с оптической развязкой, обеспечивающий высокую скорость передачи данных (до 921,6 кбит/с).

3.1 Питание анализатора

Анализатор имеет встроенный блок питания с диапазоном номинальных входных напряжений 100...415 В переменного или 140...415 постоянного тока. Блок питания имеет отдельные входы (красного цвета), обозначенные буквами **P** (от англ. power - питание). Для защиты источника питания от повреждений при попытке его подключения к напряжению нижеуказанного диапазона он выключается при входном напряжении менее 80 В переменного тока или 110 В постоянного тока.

При отключении напряжения питания работа анализатора поддерживается за счёт внутреннего аккумулятора. Он заряжается, когда на разъёмах блока питания присутствует напряжение.

Он поддерживает автономное питание до 6 часов при температуре -20...55 °С. В случае более длительного отсутствия напряжения на входе питания анализатор выключается. При последующем подключении питания, если ранее продолжалась регистрация, анализатор её возобновит.

В случае длительного хранения, без подключения к источнику питания (более 3 месяцев), аккумуляторная батарея полностью разрядится и некоторые данные могут быть потеряны: текущее время, настройки измерительных программ, PIN-код, пароль блокировки и т.д. После возобновления работ с анализатором рекомендуется восстановить настройки, используя ПО «SONEL ANALYSIS».



Замена аккумулятора должна производиться только в авторизованном Сервисном Центре.

3.2 Степень защиты и условия эксплуатации

Анализатор PQM-700 предназначен для работы в сложных погодных условиях - он может быть установлен непосредственно на опорах линии электропередачи. Для монтажа используются два ремня с застёжками и два пластиковых крепления. Крепления привинчиваются к задней стенке корпуса. Установка ремней осуществляется согласно Рис.3.

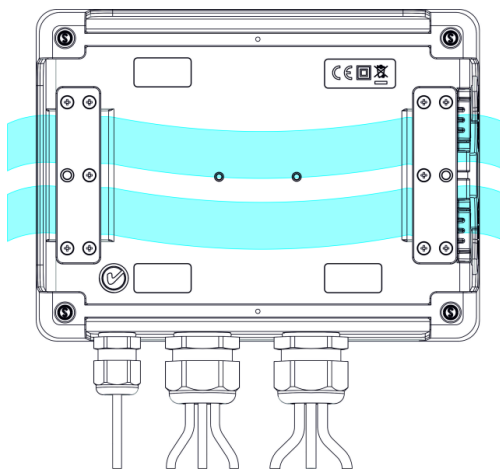


Рис.3 Крепления и ремни для монтажа анализатора.

Анализатор обеспечивает герметичность класса IP65, а диапазон рабочих температур -20...55 °С.



Для того, чтобы обеспечить декларированную герметичность класса IP65, необходимо строго соблюдать следующие правила:

- Должны быть плотно закрыты крышки разъёмов USB и SIM-карты;
- Неиспользуемые разъёмы токовых клещей должны быть закрыты силиконовыми заглушками.

При температуре окружающей среды ниже отметки 0 °С включается обогрев устройства встроенным нагревателем, задачей которого является поддержание положительной температуры анализатора при отрицательной температуре окружающей среды в диапазоне -20...0 °С.

Нагреватель питается от встроенного источника питания переменного тока, а его мощность ограничена примерно в 5 Вт.

Из-за особенностей встроенного литий-ионного аккумулятора его зарядка заблокируется, когда температура аккумулятора находится вне диапазона -10...60 °С (статус зарядки в программе «SONEL ANALYSIS» изменится на «зарядка приостановлена»).

3.3 Монтаж на DIN-рейку

В наборе поставляется крепление для установки анализатора на стандартную DIN-рейку. Защёлку нужно прикрепить к задней стенке анализатора с помощью прилагаемых винтов. Для надёжности монтажа в комплект также входят специальные крючки, которые фиксируют DIN-рейку.

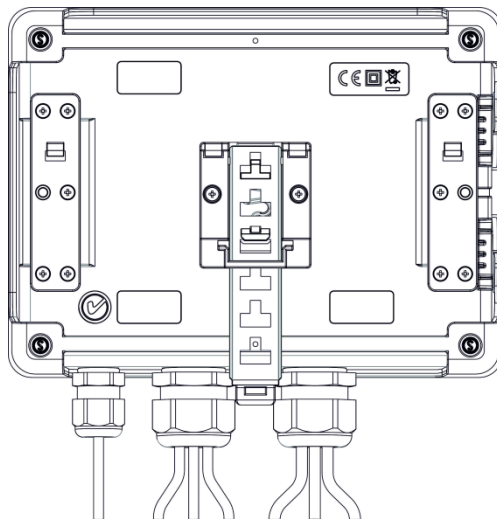


Рис.4 Задняя стенка анализатора с элементами для монтажа на DIN-рейку.

3.4 Измеряемые параметры

Анализатор PQM-700 позволяет измерять и регистрировать следующие параметры:

- Напряжение RMS фаза-нейтраль (L-N), фаза-фаза (L-L) в диапазоне до 760 В (± 1150 В пикового значения);
- Ток RMS в диапазоне до 3000 А (10 кА пикового значения) при использовании гибких клещей (F-1, F-2A/F-2AND, F-3A/F-3AND), до 1000 А (3600 А пикового значения) при использовании клещей C-4 или C-5, до 10 А (36 А пикового значения) при использовании клещей C-6A, до 100 А (360 А пикового значения) переменного тока при использовании клещей C-7;
- Коэффициент пиковых значений силы тока и напряжения;
- Частота сети в диапазоне 40...70 Гц;
- Активная, реактивная, полная мощность и энергия, мощность нелинейных искажений;
- Гармонические составляющие напряжений и токов (до 40-й);

- Коэффициент гармонических искажений THD_F и THD_R тока и напряжения;
- Коэффициент мощности $\cos\varphi$, $tg\varphi$;
- Коэффициенты несимметрии трёхфазной сети и симметричных составляющих;
- Длительная и кратковременная доза фликера P_{st} и P_{lt} ;
- Пусковой ток до 60 с.

Выбранные параметры являются обобщёнными (усреднёнными) по времени, определяемые пользователем и могут быть сохранены на карте памяти. Кроме среднего значения можно записывать минимальные и максимальные значения на протяжении интервала усреднения, а также мгновенные значения.

Расширен также блок обнаружения случайных событий. В ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» для напряжений – это прерывание (ситуация, при которой напряжение в точке передачи электрической энергии меньше 5% опорного напряжения во всех трёх фазах), перенапряжение (временное возрастание напряжения в конкретной точке электрической системы выше установленного порогового значения более 110%), а также и провалы (временное уменьшение напряжения в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения в пределах 85...90% выбранного опорного напряжения). Пользователь не должен самостоятельно вводить параметры, - программа позволяет автоматически настроить прибор в режим измерения качества электроэнергии согласно ГОСТ 32144-2013. В распоряжении пользователя остаётся режим своей собственной конфигурации - программа предлагает в этом отношении полную свободу. Напряжение — это только один из многих параметров, для которого можно определить пороги обнаружения событий. И так, для примера, можно настроить анализатор для обнаружения снижения коэффициента мощности ниже определённого порога, превышения КГИ (ТНД) выше другого порога и так же, превышение 9-й гармоникой процентного значения напряжения, установленного пользователем. Событие записывается вместе со временем его возникновения. В случае событий, касающихся превышения порогов прерывания, провалов и скачков для напряжения, а также превышения минимальных и максимальных значений для токов, можно дополнить информацию о наступлении события осциллограммами формы сигналов напряжения и тока. Может быть записано 2 периода до события и 4 после него.

Параметр		1-фазная		2-фазная				«звезда» с N					«треугольник»/ «звезда» без N			
		L1	N	L1	L2	N	Σ	L1	L2	L3	N	Σ	L12	L23	L31	Σ
U	Действующее напряжение	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
U _{DC}	Постоянная составляющая напряжения	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
I	Действующее значение тока	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
I _{DC}	Постоянная составляющая тока	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	

f	Частота	•		•				•					•			
CF U	Коэффициент пиковых значений напряжения	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
CF I	Коэффициент пиковых значений тока	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
P	Активная мощность	•		•	•			•	•	•	•		•			•
Q ₁ , Q _B	Реактивная мощность	•		•	•			•	•	•	•		•			• ⁽¹⁾
D, S _N	Мощность искажения	•		•	•			•	•	•	•		•			
S	Полная мощность	•		•	•			•	•	•	•		•			•
PF	Коэффициент мощности	•		•	•			•	•	•	•		•			•
cos φ	Косинус угла сдвига фаз	•		•	•			•	•	•	•		•			
tgφ _{C-} , tgφ _{L+} , tgφ _{L-} , tgφ _{C+}	Тангенс φ (4-х квадрантный)	•		•	•			•	•	•	•		•			• ⁽¹⁾
THDU	Коэффициент гармонических искажений напряжения	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
THDI	Коэффициент гармонических искажений тока	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
E _{P+} , E _{P-}	Активная энергия (потребляемая и отдаваемая)	•		•	•			•	•	•	•		•			•
E _{Q1+} , E _{Q1-} , E _{QB+} , E _{QB-}	Реактивная энергия (потребляемая и отдаваемая)	•		•	•			•	•	•	•		•			• ⁽¹⁾
E _S	Полная энергия	•		•	•			•	•	•	•		•			•
U _{h1...Uh40}	Амплитуды гармоник напряжения	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
I _{h1...Ih40}	Амплитуды гармоник тока	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
Асимметрия U, I	Симметричные составляющие и коэффициент асимметрии												•			•
P _{st} , P _{It}	Доза фликера	•		•	•			•	•	•			•	•	•	

Примечания:

- L1, L2, L3 (L12, L23, L31) – обозначение фазы;
- N – означает измерение по каналу тока I_N в зависимости от типа параметра;
- Σ – означает значение для целой системы;

⁽¹⁾- в 3-х проводных сетях, в качестве суммарной реактивной мощности рассчитывается неактивная мощность $N = \sqrt{S_e^2 - P^2}$

3.5 Соответствие стандартам

Объединение измерений по интервалам времени	ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.» Класс S: <ul style="list-style-type: none"> • Основное время измерения значений параметров (напряжение, ток, гармоники, асимметрия) — это 10-периодный интервал для сетей электропитания 50Гц и 12-периодный для сетей 60 Гц; • Интервал 3 секунды (150 периодов для номинальной частоты 50 Гц и 180 периодов для 60 Гц); • Интервал 10 минут.
Погрешность хода времени часов	ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.» Класс S: <ul style="list-style-type: none"> • Встроенные часы реального времени настраиваются программой «SONEL ANALYSIS», отсутствует синхронизация времени по GPS и радио; • Точность часов - не более $\pm 0,3$ с/день.
Частота	Выполнены требования ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.» класс S, для метода и погрешности измерения.
Значение напряжения питания	Выполнены требования ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.» класс S, для метода и погрешности измерения.
Колебания напряжения (фликер)	Метод измерения и погрешность соответствует требованиям ГОСТ Р 51317.4.15-2012 (МЭК 61000-4-15:2010) "Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования."
Провалы, прерывания и перенапряжения питания	Выполнены требования ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.» класс S, для метода и погрешности измерения.
Асимметрия напряжения питания	Выполнены требования ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.» класс S, для метода и погрешности измерения.
Гармоники напряжения и тока	Метод и погрешность измерения в соответствии с ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009) «Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств.»





4 ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПРИБОРА

4.1 Светодиоды сигнализации


Анализатор оснащён пятью светодиодами, сигнализирующими различные состояния работы:

- **ON** (зелёный) – светодиод горит, когда анализатор включен. Во время регистрации с активным спящим режимом светодиод погашен.
- **LOG** (жёлтый) – сигнализирует о текущей регистрации. В ожидании запуска регистрации светодиод горит непрерывно. Во время регистрации он мигает. При регистрации с активным спящим режимом – светодиод погашен и включается на короткое время с интервалом в 10 секунд.
- **ERROR** (красный) – мигание этого светодиода сигнализирует потенциальную проблему подключения анализатора к тестируемой сети или несоответствие установленной активной конфигурации параметрам сети. Критерии контроля приведены в [главе 4.5](#). Непрерывное свечение означает одну из возможных внутренних ошибок анализатора (смотри также описание дополнительных состояний ниже).
- **MEM** (красный) – свечение сигнализирует отсутствие возможности записи данных на карту памяти. Светодиод **MEM** будет гореть непрерывно после заполнения всего места на карте памяти. Смотри также описание дополнительных состояний ниже.
- **BATT** (красный) – состояние аккумулятора. Мигание означает, что аккумулятор близок к состоянию разряда (ёмкость 20% или меньше). Когда аккумулятор будет полностью разряжен, то светодиод загорается на 5 секунд (вместе со звуковым сигналом), затем анализатор выключится.


Дополнительные состояния, индицируемые светодиодами:



- Непрерывное свечение **MEM** и **ERROR** означает, что отсутствует, повреждена или не отформатирована карта памяти. Если после установки в слот карты памяти эти светодиоды горят, то возможны два сценария:
 - карта повреждена или несовместима с анализатором. В этом случае дальнейшая работа с анализатором невозможна. Клавиша  неактивна.
 - карта не отформатирована (отсутствуют файлы, необходимые анализатору или эти файлы повреждены) – в этом случае можно нажать клавишу  (она активна), что начнет форматирование карты памяти. Если этот процесс завершится успешно, то светодиоды **MEM** и **ERROR** погаснут, а анализатор будет готов к дальнейшей работе.
- Мигающий светодиод **ON** означает, что на карте памяти обнаружен файл FIRMWARE.PQF с правильным файлом обновления прошивки анализатора. Чтобы начать процесс обновления внутреннего программного обеспечения, пользователь должен нажать на клавишу . Во время обновления одновременно мигают светодиоды **ON** и **MEM**. После окончания этого процесса анализатор перезапускается. Обновление прошивки можно пропустить, если нажать на клавишу  или подождать 10 секунд.

4.2 Включение измерителя

- Анализатор включается нажатием клавиши . Загорается зелёный светодиод **ON**. Затем анализатор выполняет самотестирование и в случае обнаружения внутренних ошибок загорается светодиод **ERROR**, чему сопутствует длительный звуковой сигнал (3 секунды) – функция измерения блокируется. После самотестирования анализатор начинает проверку правильности подключения и если анализатор обнаружит ошибку, то каждые 0,5 сек. начинает мигать светодиод **ERROR**, что не блокирует возможности выполнения дальнейших измерений, а только сигнализирует о несоответствии конфигурации анализатора параметрам подключенной сети.
- Если во время теста анализатор обнаружит слишком высокое напряжение на измерительных разъёмах или слишком большой ток, то каждые 0,5 сек. будет мигать светодиод **ERROR** и слышен двухтональный звуковой сигнал.
- Если после включения анализатор обнаружит заполненную память, загорается светодиод **MEM** - измерения блокируются, работает только режим чтения текущих данных.
- Если после включения анализатор не обнаружит карту памяти или обнаружит ее повреждение, загораются светодиоды **ERROR** и **MEM**, измерения блокируются.



Аналогично мигают светодиоды **ERROR** и **MEM** после установки в анализатор новой карты памяти microSD. Чтобы отформатировать эту карту для использования в процессе регистрации данных, необходимо нажать клавишу . Анализатор подтвердит запуск форматирования тройным звуковым сигналом. Форматирование удаляет всё содержание карты памяти. Если оно завершилось успешно, то данные светодиоды погаснут, а анализатор будет готов к работе.

- Если тест подключения прошёл успешно, то после нажатия  анализатор запускает регистрацию в соответствии с запрограммированным режимом на ПК.
- Выключение анализатора производится удержанием клавиши  в течение 2 сек., если не включена блокировка клавиатуры или процесс регистрации.

4.3 Функция автоматического выключения

Если анализатор не менее 30 минут работает с питанием от аккумулятора (отсутствует сетевое питание) и не находится в режиме регистрации или не активно соединение с компьютером, он автоматически выключается для предотвращения разряда аккумулятора.

Автоматическое выключение анализатора происходит также в случае полного разряда аккумулятора. Такому аварийному отключению предшествует свечение светодиода **BATT** в течение 5 секунд, и оно происходит независимо от режима, в котором находится анализатор. В случае активной регистрации она прерывается. После восстановления питающего анализатор напряжения регистрация возобновляется.

4.4 Синхронизация с ПК



При включении анализатора клавишей  порт USB будет постоянно активен.

В режиме чтения текущих данных, в программе «SONEL ANALYSIS» на ПК обновление данных происходит чаще, чем каждые 1 сек.

Во время регистрации возможна передача данных, уже сохраненных в память. Данные считываются до момента их начала передачи на ПК.

Во время регистрации возможен просмотр параметров сети на ПК:

- Мгновенные значения тока, напряжения, всех мощностей, суммарные значения для 3-х фаз;
- Гармоники и THD;
- Асимметрию;
- Векторные диаграммы для напряжений и токов;
- Осциллограммы тока и напряжения отображаемы в режиме реального времени.

Во время соединения с ПК клавиша  блокируется, но если анализатор работает с включенным режимом блокировки клавиатуры (например, во время регистрации), то заблокирована также и клавиша .

Для того чтобы соединиться с анализатором необходимо ввести его PIN-код. Код по умолчанию это **000**. PIN-код можно изменить с помощью ПО «SONEL ANALYSIS».

Три попытки ввода неправильного PIN-кода блокируют передачу данных на 10 минут. Только после этого времени будет возможна повторная попытка ввести код.

Если в течение 30 сек после подключения к ПК не происходит никакого обмена данными между анализатором и компьютером, анализатор выходит из режима передачи данных и завершает подключение.



Удержание в течение 5 секунд клавиш  и  возвращает PIN-код по умолчанию (000).

Если включена блокировка клавиатуры во время регистрации, то она имеет более высокий приоритет (сначала нужно разблокировать клавиши, чтобы обнулить PIN-код).

USB – является постоянно действующим интерфейсом и не имеет возможности своего отключения. Для того чтобы соединиться с анализатором, необходимо соединить его кабелем USB с компьютером (разъём USB находится на левой стенке анализатора и защищен уплотнительной заглушкой). На компьютере необходимо предварительно установить программное обеспечение «SONEL ANALYSIS» вместе с драйверами.

Скорость передачи данных составляет 921,6 кбит/сек.

4.5 Сигнализация ошибки подключения

Во время работы анализатор непрерывно контролирует измеряемые параметры на соответствие текущей конфигурации. На основании нескольких критериев, перечисленных ниже, анализатор управляет индикацией светодиода **ERROR**. Если анализатор не обнаружил несоответствий, этот светодиод не горит. Когда по крайней мере один из критериев указывает на потенциальную проблему, светодиод **ERROR** начинает мигать.

Критерии, используемые анализатором для обнаружения ошибки подключения, следующие:

- Отклонение действующего значения напряжения более чем на $\pm 15\%$ от номинального значения;
- Отклонение фазового угла основной составляющей напряжения более чем на $\pm 30^\circ$ от теоретического значения при резистивной нагрузке и симметричной сети (смотри примечание ниже);
- Отклонение фазового угла основной составляющей тока более чем на $\pm 55^\circ$ от теоретического значения при резистивной нагрузке и симметричной сети (смотри примечание ниже);
- Отклонение значения частоты сети более чем $\pm 10\%$ от номинального значения частоты,
- В 3-фазной 3-х и 4-х проводной системах сети, анализатор также вычисляет сумму всех токов (мгновенные значения) и проверяет, равна ли она нулю. Это помогает определить, правильно ли подключены все токовые клещи (т. е. стрелки на губках клещей направлены к нагрузке).

Если рассчитанное действующее значение суммы больше, чем $0,3\% I_{\text{НОМ}}$, это рассматривается как ошибка и мигает светодиод **ERROR**.



Обнаружение фазовой ошибки требует, чтобы основная составляющая сигнала была больше или равна 5% номинального значения напряжения или 1% диапазона номинального тока. Если это условие не выполняется, то правильность фазовых углов не проверяется.



4.6 Предупреждение о высоком напряжении или токе


Во время работы анализатор непрерывно контролирует значения напряжений и токов, подключенных к измерительным входам. Если напряжение в любой из активных фаз на 20% превысит заданного в измерительной конфигурации значения номинального напряжения ($>120\% U_{\text{НОМ}}$), то включается непрерывный двухтональный звуковой сигнал. Аналогично для токов – сигнал тревоги включается, если измеренный ток в любом из активных каналов на 20% превысит номинальный ток (диапазон клещей; $>120\% I_{\text{НОМ}}$). В этом случае проверьте, находится ли напряжение и ток в измеряемой сети в диапазоне допустимых для анализатора напряжений и токов, или проверьте правильность конфигурации анализатора и измените её.

4.7 Измерение

4.7.1 Начало и остановка регистрации



Возможны три способа запуска регистрации:

- Непосредственный запуск – вручную после нажатия клавиши  после предварительной настройки анализатора с помощью ПК, мигает светодиод **LOGG**;
- Согласно расписанию, установленному в программе ПК, в этом случае нажатие  не начинает регистрацию (анализатор ожидает ближайшего времени из установленного расписания и сам стартует) – светодиод **LOGG** горит в режиме ожидания, а после запуска мигает;

- Пороговое значение - при совершении какого-либо события, заданного в конфигурации, нажатие  переключает анализатор в нормальный режим измерений, тем не менее, запись файлов (собственно регистрация) начинается только после обнаружения первого события. Светодиод **LOGG** горит в режиме ожидания, а после запуска мигает.

Регистрация анализатора может быть запущена событием по току или напряжению, которые задаются в программе «SONEL ANALYSIS».

Окончание регистрации:

- Остановка регистрации вручную происходит после удержания нажатой клавиши  в течение секунды или из программы ПК;
- Регистрация заканчивается автоматически в режиме расписания (если установлено время окончания), в остальных случаях она продолжается до остановки пользователем (клавишей  или на уровне приложения);
- Регистрация заканчивается автоматически при заполнении всей карты памяти;
- После окончания регистрации, если прибор не находится в спящем режиме, гаснет светодиод **LOGG** и анализатор ждёт команды оператора;
- Если в процессе регистрации и после её завершения светодиоды не горят, а нажатие любой клавиши вызывает индикацию светодиода **ON**.

4.7.2 Ориентировочное время регистрации

Максимальное время регистрации зависит от многих факторов, таких как: объём карты памяти, время усреднения, тип сети, количество регистрируемых параметров, запись осциллограмм и обнаружение событий, и сами допуски событий. Некоторые выбранные конфигурации приведены в таблице. В последней колонке указано приблизительное время регистрации для карты памяти объёмом 2 Гб. Показанные примеры конфигураций предполагают включенное измерение тока I_N .

Приблизительное время регистрации для нескольких примеров конфигурации

Тип конфигурации/ регистрируемые параметры	Период усреднения	Тип сети (измерение токов)	События	Осциллограммы событий	Осциллограммы по периоду усреднения	Приблизительное время регистрации при отведённом месте 2 Гб
По ГОСТ 30804.4.30-2013	10 минут	3-фазная звезда	• (1000 событий)	• (1000 событий)		60 лет
По профилю «Токи и напряжения»	1 секунда	3-фазная звезда				270 дней
По профилю «Мощности и гармоники»	1 секунда	3-фазная звезда				23 дня
По профилю «Мощности и гармоники»	1 секунда	3-фазная звезда	• (1000 событий)	• (1000 событий)		22, 5 дня
Включены все возможные параметры	10 минут	3-фазная звезда				4 года



Включены все возможные параметры	10 секунд	3-фазная звезда				25 дней
Включены все возможные параметры	10 секунд	1-фазная				64 дня
Включены все возможные параметры	10 секунд	1-фазная	• (1000 событий)	• (1000 событий)	•	22 дня

4.8 Измерение пускового тока

Функция позволяет регистрировать полупериодные значения напряжения и тока в течение 60 сек. После этого времени регистрация будет автоматически завершена. Перед измерением необходимо выбрать время усреднения – *Половина периода*. Остальные настройки и система измерений могут быть любые.

4.9 Блокировка клавиш

В приложении «SONEL ANALYSIS» есть возможность настройки параметров блокировки клавиш после начала регистрации. Это делается для защиты анализатора от остановки регистрации посторонними лицами. Чтобы разблокировать клавиши, необходимо выполнить следующие действия:

- Три раза подряд нажать клавишу  с интервалом от 0,5 до 1 сек.;
- Затем нажать клавишу  в течение 0,5...1 сек.;


Нажатие клавиш сопровождается звуковым сигналом, даже для неактивных клавиш, а после всей последовательности действий прибор издает двойной звуковой сигнал.

4.10 Режим ожидания («спящий» режим)

Программа «SONEL ANALYSIS» даёт возможность включить режим ожидания. Через 10 секунд после начала регистрации анализатор гасит светодиоды. С этого момента возможны варианты:

- Непосредственный запуск – после активации режима, каждые 10 секунд мигает светодиод **LOGG**, сигнализирующий о регистрации;
- Запуск по событию – после активации режима, светодиод **LOGG** мигает каждые 30 секунд в режиме ожидания, в момент начала регистрации светодиод **LOGG** начинает мигать через каждые 10 секунд;
- Запуск по расписанию – после активации режима, светодиод **LOGG** мигает каждые 30 секунд в режиме ожидания, в момент начала регистрации светодиод **LOGG** начинает мигать через каждые 10 секунд.

В дополнение к указанным выше случаям:

- Если Пользователь сам прерывает регистрацию нажатием , в данном случае светодиоды включаются, если только регистрация не начнётся заново;

- Если анализатор самостоятельно закончил регистрацию, потому что закончилось место на карте памяти или завершено расписание, то светодиоды остаются погашены.

Нажатие любой клавиши (кратковременно) вызывает свечение светодиода **ON** (и, возможно, других, например, **MEM** в зависимости от состояния) и активации данной функции, если она доступна.

4.11 Обновление ПО

Внутреннее программное обеспечение анализатора (англ. firmware) необходимо регулярно обновлять, потому что обновления исправляют выявленные ошибки или вводят новые функции. Если обновляется прошивка анализатора, то следует проверить, доступна ли новая версия программы «SONEL ANALYSIS» (и наоборот) и если это так, то также необходимо обновить программу.

4.11.1 Автоматическое обновление

Автоматический метод (рекомендуется) выполняется с помощью программного обеспечения «SONEL ANALYSIS». Если в конфигурации программы пользователь включит опцию **Проверять обновления**, то приложение при запуске подключается к серверу. Если там есть доступные обновления, то они отображаются на экране (вместе со списком изменений) и пользователь может подтвердить их загрузку. Также можно запустить проверку обновлений вручную, выбрав в меню программы **Справка** → **Обновление on-line**. Если есть доступное обновление прошивки и оно успешно загружено, то можно обновить внутреннее программное обеспечение анализатора. Для этого необходимо:

- Перед обновлением скопируйте все данные из анализатора на компьютер (загрузите записанные данные и сохраните их на диске);
- Подключите цепь питания анализатора к электрической сети;
- Подключите анализатор к компьютеру кабелем USB и установите соединение приложения с анализатором. Сразу после подключения программа «SONEL ANALYSIS» покажет сообщение о возможности обновления прошивки (для этого необходимо, чтобы в конфигурации программы была включена опция «**Проверять версию прошивки анализатора при подключении**»);
- После подтверждения своего намерения обновить прошивку, дождитесь завершения процесса.





После успешного обновления необходимо заново перепрограммировать анализатор перед запуском регистрации, чтобы избежать противоречий в записываемых данных.

4.11.2 Ручное обновление

Для обновления вручную необходимо сохранить соответствующий файл прошивки на карту памяти и запустить обновление клавишей.

- Перед обновлением скопируйте все данные из анализатора на компьютер (загрузите записанные данные и сохраните их на диске);
- Подключите цепь питания анализатора к электрической сети;
- С веб-сайта <http://www.sonel.ru> загрузите файл с новой прошивкой. Если файл упакован, извлеките из архива файл с именем FIRMWARE.PQF;

- Файл FIRMWARE.PQF необходимо записать в корневой каталог карты памяти microSD с помощью внешнего card reader;
- Вставьте карту памяти в анализатор. Должен мигать светодиод **ON**, что сигнализирует распознавание файла прошивки и готовность к запуску обновления;
- Чтобы начать обновление, нажмите клавишу . Если клавишу  не нажать в течение 10 секунд, обновление игнорируется. Процесс обновления сигнализируется миганием светодиодов **ON** и **MEM**.



После успешного обновления необходимо заново перепрограммировать анализатор перед запуском регистрации, чтобы избежать противоречий в записываемых данных.

5 ПО «SONEL ANALYSIS»

ПО «SONEL ANALYSIS» является необходимым приложением для работы с анализатором PQM-700. Она позволяет:

- Производить настройку конфигурации анализатора;
- Считывать данные с регистратора;
- Просматривать параметры сети в реальном времени;
- Удалять данные из анализатора;
- Представлять данные в виде таблиц;
- Представлять данные в виде диаграмм;
- Анализировать данные по стандарту ГОСТ 30804.4.30-2013, регламенту энергосистемы и другим условиям, определяемым пользователем;
- Независимо работать с несколькими устройствами;
- Обновлять до новых версий прошивку анализатора и саму программу.

Подробное руководство пользователя программы «SONEL ANALYSIS» доступно в отдельном документе (также для скачивания с сайта <http://www.sonel.ru>).

6 ПОДКЛЮЧЕНИЕ АНАЛИЗАТОРА

Анализатор можно подключить к следующим типам сети:

- Однофазная двухпроводная (Рис.5);
- Двухфазная (с разделённой обмоткой трансформатора, англ. split phase) (Рис.6);
- Трёхфазная четырёхпроводная («звезда») (Рис.7 и Рис.12);
- Трёхфазная трёхпроводная («звезда» с изолированной нейтралью) (Рис.8);
- Трёхфазная трёхпроводная («треугольник») (Рис.9 и Рис.13);

В трёхпроводных системах возможен замер токов методом Арона, с использованием только двух клещей, измеряющих линейные токи I_{L1} и I_{L3} . Значение же тока I_{L2} вычисляется согласно зависимости:

$$I_{L2} = -I_{L1} - I_{L3}$$

Эту методику можно использовать в случае системы типа «треугольник» (Рис.10) и «звезда» с изолированной нейтралью (Рис.11).



Для работы в системах электроснабжения с изолированной нейтралью необходимо подключить вход N по напряжению к клемме/шине L3 исследуемой сети. В таких системах не требуется подключать вход L3 анализатора к электрической сети. Схемы подключения показаны на Рис.8, Рис.9, Рис.10, Рис.11 и Рис.13.

В сетях с нейтральным проводником можно включить измерение тока в этом проводнике после подключения дополнительных клещей по входу I_N . Это измерение выполняется после включения в конфигурации места измерения опции «Ток в проводнике N».



Для правильного вычисления полной мощности S_e , а также коэффициента мощности PF в трёхфазной 4-х проводной сети обязательно измерение тока в нейтральном проводнике. В таком случае необходимо всегда включать опцию «Ток в проводнике N» и подключить 4 измерительных клещей.

Необходимо обратить внимание на фазировку клещей (гибких и обычных). Клещи необходимо так установить, чтобы стрелка, находящаяся на клещах, была направлена в сторону нагрузки. Проверить правильность установки клещей можно путём измерения активной мощности – в большинстве типов пассивных приёмников, активная мощность имеет положительный знак. В случае обратного подключения клещей их полярность можно изменить с помощью ПО «Sonel Analysis».

Схемы подключения анализатора к исследуемой сети в зависимости от ее типа.

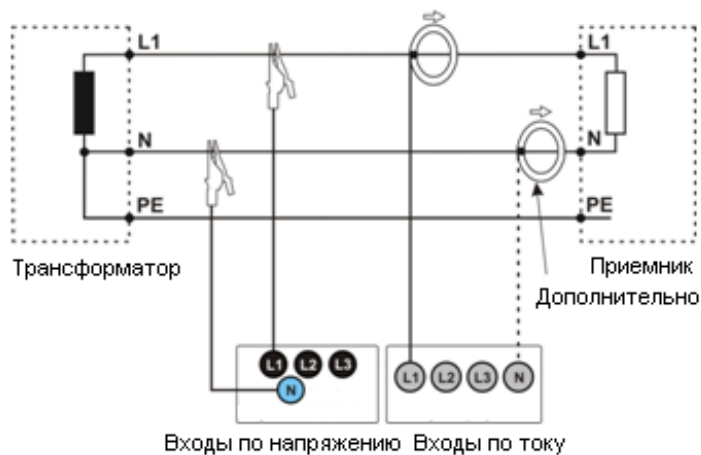


Рис.5 Схема подключения – однофазная сеть.

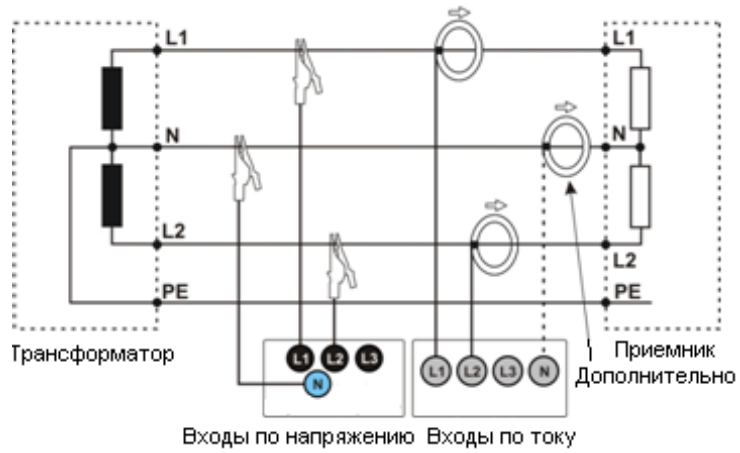


Рис.6 Схема подключения – двухфазная система.

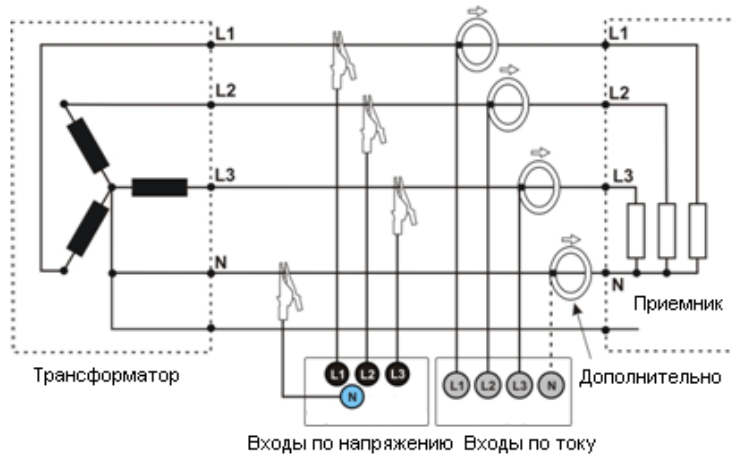


Рис.7 Схема подключения – трёхфазная сеть «звезда» с нейтральным проводом.

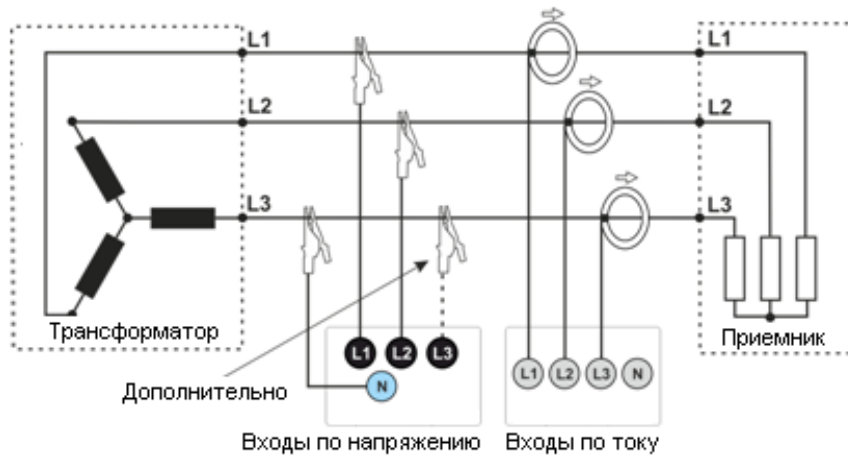


Рис.8 Схема подключения – трёхфазная сеть «звезда» с изолированной нейтралью.

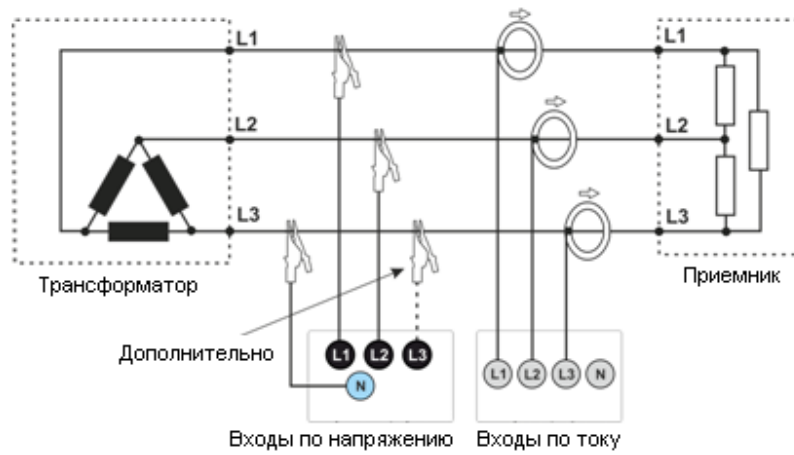


Рис.9 Схема подключения – трёхфазная сеть «треугольник».

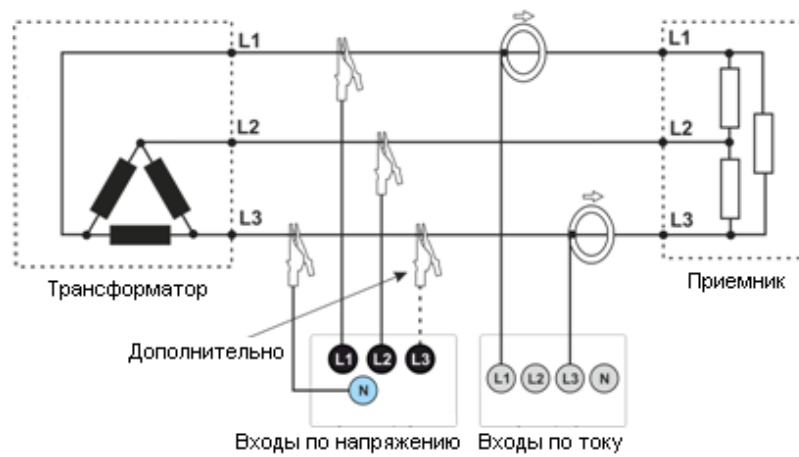


Рис.10 Схема подключения – трёхфазная сеть «треугольник» (измерение тока методом Арона).

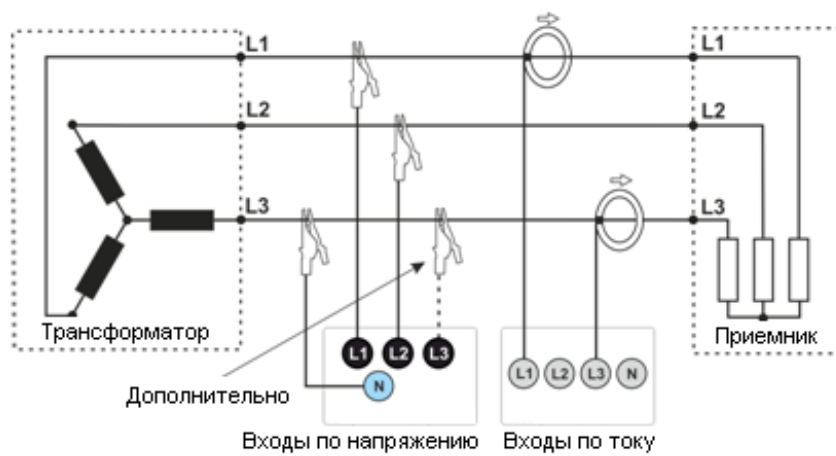


Рис.11 Схема подключения – трёхфазная сеть «звезда» с изолированной нейтралью (измерение тока методом Арона)

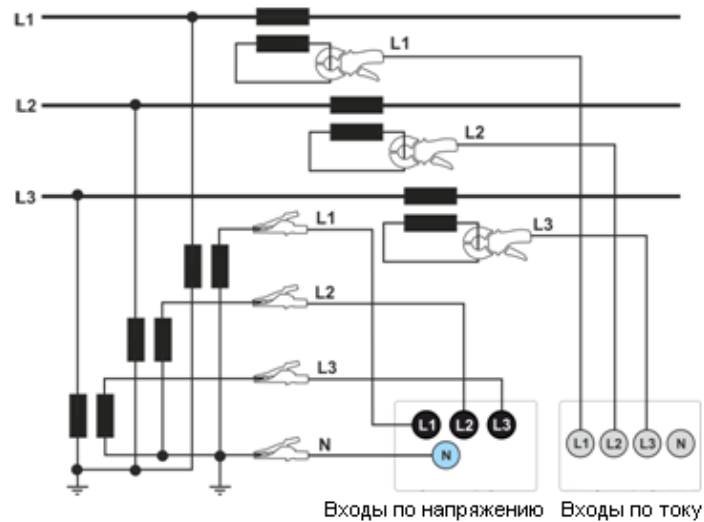


Рис.12 Схема подключения – косвенные измерения в 3-фазной схеме «звезда» сети среднего напряжения с измерительными трансформаторами.

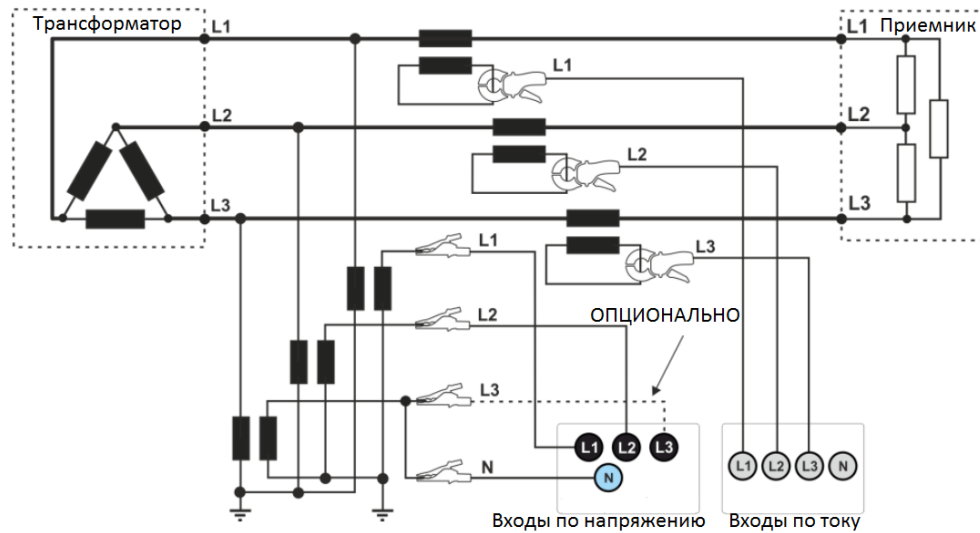


Рис.13 Схема подключения – косвенные измерения в 3-фазной схеме «треугольник» сети среднего напряжения с измерительными трансформаторами.

7 КОНСТРУКЦИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

7.1 Входы по напряжению

Устройство блока входов по напряжению схематически показано на рисунке.

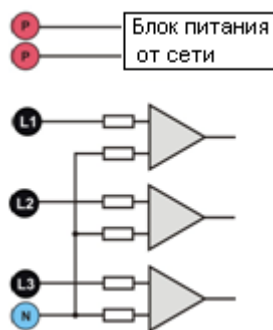


Рис.14 Входы по напряжению и блок питания

Три входа фаз L1, L2, L3 и защитный провод PE имеют общую линию, которой является провод N (нейтраль). Такая конфигурация входов позволяет уменьшить количество проводов, необходимых для подключения анализатора в наиболее расширенном варианте до четырёх. Рисунок также показывает, что цепь питания анализатора является независимой от измерительной цепи.

Блок питания с номинальным диапазоном входного переменного напряжения 100...415 В имеет отдельные разъёмы.

У анализатора один диапазон напряжения с пиковым напряжением 1150 В (без нагрузки).

7.2 Входы по току

Анализатор имеет четыре независимых токовых входа с идентичными параметрами. К каждому из них можно подключить жёсткие токовые клещи с выходом по напряжению стандарта 1 V_{RMS} или гибкие токовые клещи типа F.

Типичной ситуацией является использование гибких клещей вместе с встроенным электронным интегратором. Однако, PQM-700 отличается возможностью прямого подключения к входу токового канала катушки Роговского, а интеграция сигнала осуществляется при цифровой обработке.

7.2.1 Цифровой интегратор

В анализаторе PQM-700 используется решение с цифровым интегрированием сигнала, идущего непосредственно с катушки Роговского. Такой подход позволил избежать проблем аналоговых интеграторов, связанных с необходимостью обеспечения заявленной точности в долгосрочной перспективе и в сложных условиях измерения. Аналоговый интегратор также должен содержать схему, предохраняющую от перегрузки выхода в случае наличия на входе постоянного напряжения.

Идеальный интегратор имеет бесконечное усиление для постоянных сигналов, которое убывает со скоростью 20 дБ/декаду частоты. Сдвиг фазы является постоянным во всем диапазоне частот и составляет -90° .

Теоретически бесконечное усиление для постоянного напряжения, если оно появится на входе интегратора, вызывает насыщение его выхода до значения близкого к напряжению питания и блокирует дальнейшую работу. В практических схемах применяются решения, ограничивающие усиление постоянного напряжения до некоторого установленного значения, и дополнительно

периодически обнуляют выход. Существуют также методы активного удаления постоянного напряжения, заключающиеся в его измерении и подаче обратно на вход, но с противоположным знаком, эффективно обнуляя его. Определение в английской терминологии „leaky integrator”, означает только то, что данный интегратор с утечкой. Аналоговый „leaky integrator” – это просто интегратор с конденсатором, соединенным одним концом с резистором большой величины. Такая схема в этом случае совпадает с низкочастотным фильтром с очень низкой частотой пропускания.

Цифровая реализация интегратора обеспечивает отличные долговременные параметры – вся процедура выполняется путём вычисления, не может быть и речи о старении элементов, дрейфах и т.п. Однако, так же, как и в аналоговой версии, здесь тоже может возникнуть проблема насыщения и без должного противодействия цифровое интегрирование может стать бесполезным. Следует помнить, что входные усилители, как и аналого-цифровой преобразователь, имеют некоторое конечное и нежелательное смещение, которое должно быть устранено до процесса интеграции. Программное обеспечение анализатора PQM-700 содержит цифровой фильтр, задачей которого является полное удаление постоянной составляющей напряжения. Отфильтрованный сигнал подвергается цифровой интеграции. Итоговая фазовая характеристика имеет отличные свойства и минимальный сдвиг фазы для наиболее критических частот 50 и 60 Гц.

Обеспечение как можно меньшего сдвига фаз между сигналами тока и напряжения является чрезвычайно важным для достижения низкой погрешности измерения мощности. Можно показать, что ошибка измерения мощности приблизительно выражается зависимостью¹:

$$\text{ошибка измерения мощности} \approx \text{ошибка фазы (в радианах)} \times \tan(\varphi) \times 100 \%,$$

где $\tan(\varphi)$ – это тангенс угла между основными составляющими тока и напряжения.

Из приведенной выше формулы можно сделать вывод, что ошибки измерения растут вместе с уменьшением коэффициента фазового сдвига; например, при ошибке фазы только $0,1^\circ$ и $\varphi = 0,5$, ошибка составляет 0,3%. Так или иначе, чтобы измерения мощности были очень точными, согласованность фаз каналов напряжения и тока должна быть как можно лучше.

Примечание¹: Current sensing for energy metering, William Koon, Analog Devices, Inc.

7.3 Дискретизация сигнала

Сигнал дискретизируется одновременно по всем 8 каналам с частотой, синхронизированной с частотой питающего напряжения опорного канала. Эта частота равна 10,24 кГц для сети 50 Гц и 60 Гц.

Отдельный период содержит 204,8 выборок для частоты 50 Гц и 170,67 для 60 Гц. Используется 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь, который обеспечивает 64-кратную дискретизацию.

3-дБ аналоговая схема подавления настроена на частоту около 12 кГц, в то время как ошибка амплитуды для максимальной используемой частоты равной 2,4 кГц (т.е. частоты 40-й гармоники для сети 60 Гц) составляет около 0,3 дБ. Сдвиг фазы для этой частоты меньше 15° . Затухание в полосе непропускания составляет более 75 дБ.

Следует обратить внимание, что для правильного измерения фазового сдвига между гармониками напряжения относительно гармоник тока и мощности, не важен абсолютный фазовый сдвиг этих гармоник по отношению к основной частоте, а только совпадение фазовых характеристик каналов напряжения и тока. Наибольшая ошибка разницы фаз составляет для $f = 2,4$ кГц максимально 15° . Эта ошибка уменьшается одновременно с уменьшением интересующей нас частоты.

7.4 Синхронизация ФАПЧ

Синхронизация частоты дискретизации реализована аппаратным способом. Сигнал напряжения, пройдя через входные цепи, направляется в полосовой пропускающий фильтр, задачей которого является снижение уровня гармоник и пропуск только основной составляющей напряжения. Затем этот сигнал направляется для обработки в фазовую петлю, как опорный сигнал. Схема ФАПЧ (фазовая автоподстройка частоты, англ. PLL - Phase Locked Loop) генерирует частоту, которая многократно выше опорной частоты и служит тактовой частотой аналого-цифрового преобразователя.

Необходимость применения системы фазовой петли напрямую вытекает из требований ГОСТ 30804.4.7-2013, описывающего методику и допустимые ошибки при измерениях гармоник. Этот стандарт требует, чтобы окно (в значении - весовая функция) измерения, которое является основой для однократного измерения и оценки содержания гармоник, было равно длительности 10 периодов электрической сети 50 Гц и 12 периодам для сети 60 Гц. В обоих случаях, это соответствует времени около 200 мс. Поскольку частота питающей сети может подвергаться периодическим изменениям и флуктуациям, длительность окна не может быть равна точно 200 мс, и например, для частоты сети 51 Гц она уже составляет около 196 мс.

Стандарт также рекомендует, чтобы данные перед выполнением преобразования Фурье (для извлечения спектральных компонентов) не проходили операцию весовой функции. Отсутствие синхронизации частоты и допустимость ситуации, при которой быстрому преобразованию Фурье (FFT) подверглись бы выборки нецелого числа периодов, может привести к явлению утечки спектра. Это явление вызывает размазывание полосы спектра гармоник также на несколько соседних полосок интергармоник, что может привести к потере информации о реальном уровне и мощности исследуемой полосы спектра. Допускается возможность использования функции окна весом Ханна, которая уменьшает неблагоприятные последствия утечки спектра, но это ограничивается только той ситуацией, в которой петля ФАПЧ (PLL) потеряла синхронизацию.

ГОСТ 30804.4.7-2013 также уточняет необходимую точность блока синхронизации. Это выражается следующим образом: время между нарастающим фронтом первого импульса стробирования и $(M+1)$ - этого импульса (где M - число отсчётов в окне измерения) должно быть равным продолжительности указанного числа периодов в измерительном окне (10 или 12) с максимально допустимой ошибкой $\pm 0,03\%$. Чтобы объяснить это более простым способом, рассмотрим следующий пример. Принимая частоту сети 50 Гц, длительность окна измерения составит ровно 200 мс. Если первый дискретизирующий импульс придёт точно в момент $t = 0$, то первый дискретизирующий импульс следующего окна измерения должен прийти в момент времени $t = 200 \pm 0,06$ мс. Эти ± 60 мкс - допустимое отклонение фронта импульса дискретизации. Стандарт также определяет рекомендуемый минимальный диапазон частот, при котором указанная выше точность системы

синхронизации должна сохраняться и устанавливает ее в пределах $\pm 5\%$ от номинальной частоты, то есть 47,5...52,5 Гц и 57...63 Гц соответственно для сети 50 Гц и 60 Гц.

Отдельным вопросом является диапазон значений входного напряжения, при котором система ФАПЧ (PLL) будет правильно работать. ГОСТ 30804.4.7-2013 не устанавливает здесь каких-либо конкретных указаний и требований. Для правильной работы системы ФАПЧ (PLL) анализатора PQM-700 на входе L1-N требуется напряжение выше 10 В.

7.5 Измерение частоты

Сигнал для измерения 10-секундного значения частоты сети берётся из канала напряжения L1. Это тот же самый сигнал, который используется для синхронизации петли ФАПЧ (PLL). Сигнал канала L1 подаётся на полосовой фильтр 2-го порядка, полоса пропускания которого находится в диапазоне 40...70 Гц. Этот фильтр предназначен для снижения уровня гармоник. Затем, отфильтрованный таким образом сигнал формирует прямоугольный сигнал. Во время 10-секундного цикла измерения подсчитывается число периодов сигнала, а также их длительность. 10-секундные интервалы времени определяются по часам реального времени (как общее время кратное 10 секундам). Частота рассчитывается как отношение количества подсчитанных периодов времени к их длительности.

7.5.1 Метод измерения гармонических составляющих

Измерение гармоник осуществляется в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 30804.4.7-2013. Он даёт способ расчёта отдельных гармоник.

Весь процесс состоит из нескольких этапов:

- Синхронная выборка (10/12 периодов);
- Анализ по быстрому преобразованию Фурье (FFT);
- Группирование.

Анализу по быстрому преобразованию Фурье (FFT) подвергается окно измерения 10/12 периода (примерно 200 мс). В результате получается набор спектральных линий от частоты 0 Гц (постоянный ток) до 40-й гармоники (около 2,0 кГц для сети 50 Гц или 2,4 кГц для сети 60 Гц). Расстояние между соседними линиями напрямую следует из принятой длительности измерительного окна и составляет приблизительно 5 Гц.

Поскольку анализатор PQM-700 собирает 2048 отсчётов на окно измерения (для частот 50 Гц и 60 Гц), тем самым выполняется требование быстрого преобразования Фурье, чтобы количество отсчётов, прошедших преобразование было равно степени числа 2.

Очень важно поддержание постоянной синхронизации частоты дискретизации с частотой электрической сети. Быстрое преобразование Фурье (FFT) может быть выполнено только над данными, содержащими общее кратное периода сети. Выполнение этого условия необходимо для того, чтобы свести к минимуму так называемую утечку спектра, которая приводит к искажению информации о фактических уровнях спектральных линий. Анализатор PQM-700 соответствует этим

требованиям, так как частота дискретизации стабилизирована схемой фазовой автоподстройки частоты (PLL).

Поскольку частота сети может быть подвержена временным флуктуациям, стандарт предусматривает группирование вместе с линиями основных гармоник также линий, расположенных в непосредственной близости от них. Отсюда следует, что энергия составляющих может частично переходить на соседние составляющие интергармоник.

Предусмотрено два способа группировки:

- Гармоническая группа (сгруппированы основная полоска и по пять или шесть соседних компонентов интергармоник);
- Гармоническая подгруппа (сгруппированы основная полоска и по одной из соседних линий).

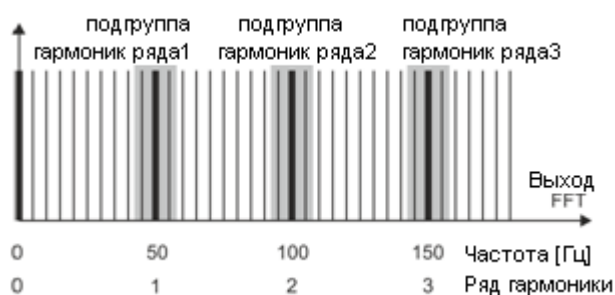


Рис.15 Определение подгрупп гармоник (сеть 50 Гц)

ГОСТ 61000-4-30-2017 рекомендует, чтобы в анализаторах сети использовался метод подгрупп гармоник.

Пример:

Для вычисления 3-й гармоники в сети 50 Гц следует учитывать основную полоску 150 Гц и соседние 145 Гц и 155 Гц. Результирующая амплитуда рассчитывается методом RMS.

7.6 Обнаружение событий

Анализатор PQM-700 предлагает широкие возможности обнаружения событий в измеряемой сети. Событием мы называем ситуацию, в которой значение выбранного параметра сети превышает пороговое значение, определенное пользователем.

Факт наступления события регистрируется на карту памяти в виде записи, содержащей:

- Тип параметра;
- Канал, в котором произошло событие;
- Время начала и окончания события;
- Пороговое значение, заданное пользователем;
- Экстремальное значение измеряемого параметра во время события;
- Среднее значение параметра, измеренное за время события.

В зависимости от типа параметра можно установить один, два или три пороговых значения, которые будут проверяться анализатором. В таблице собраны все параметры, для которых можно обнаруживать события с различием по типам порогов.

Параметр		Прерывание	Провал	Пере-напряжение	Минимум	Максимум
U	Эффективное значение напряжения	•	•	•		
U _{DC}	Постоянная составляющая напряжения					•
f	Частота				•	•
CF U	Пик-фактор напряжения				•	•
u ₂	Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности					•
P _{st}	Кратковременная доза фликера					•
P _{lt}	Длительная доза фликера					•
I	Эффективное значение тока				•	•
CF I	Пик-фактор тока					
i ₂	Коэффициент несимметрии тока по обратной последовательности					•
P	Активная мощность				•	•
Q ₁ , Q _B	Реактивная мощность				•	•
S	Полная мощность				•	•
D, S _N	Мощность искажения				•	•
PF	Коэффициент мощности				•	•
cos φ	Коэффициент сдвига фаз				•	•
tq φ	Коэффициент тангенс φ				•	•
E _{p+} , E _{p-}	Активная энергия (потребляемая и отдаваемая)					•
E _{Q+} , E _{Q-}	Реактивная энергия (потребляемая и отдаваемая)					•
E _s	Полная энергия					•
THD _F U	Коэффициент THD _F по напряжению					•
U _{h2...U_{h40}}	Амплитуды гармоник напряжения (ряд n=2...40)					•
THD _F I	Коэффициент THD _F по току					•
I _{h2...I_{h40}}	Амплитуды гармоник тока (ряд n=2...40)					•

Некоторые из параметров могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Примером может служить активная мощность, реактивная мощность и коэффициент мощности. Поскольку порог обнаружения события может быть только положительным, чтобы обеспечить правильное выявление событий для вышеупомянутых параметров анализатор сравнивает с установленным порогом абсолютные значения этих параметров.

Пример:

Порог события по активной мощности установлен на значение 10 кВт. Если нагрузка имеет характер генератора, активная мощность при правильном подключении токовых клещей будет иметь отрицательный знак. Если измеренное абсолютное значение активной мощности превысит порог, т.е. 10 кВт (например, -11кВт), то будет зарегистрировано событие превышения значения максимальной активной мощности.

Два типа параметров: действующие значения напряжения и тока могут порождать события, которые пользователь сможет дополнить записями мгновенных сигналов (осциллограммами).

Сигналы активных каналов (напряжения и тока) записываются в анализатор в момент начала и окончания события. В обоих случаях регистрируется шесть периодов: два перед моментом начала (окончания) события и четыре после начала (окончания). Осциллограммы сохраняются в 8-битовом формате с частотой дискретизации 10,24 кГц.

Информация о событии записывается в момент его окончания. В некоторых случаях может случиться так, что в момент окончания регистрации какое-то событие было активным (например, продолжается провал напряжения). Информация о таком событии также сохраняется, однако, со следующими изменениями:

- Отсутствует время окончания события;
- Экстремальное значение рассчитывается только за период до момента прекращения регистрации;
- Среднее значение не указывается;
- Для событий, связанных с действующими значениями напряжения или тока, доступна только осциллограмма начала.

Чтобы устранить многократное выявление одного и того же события, когда значение параметра колеблется вокруг порогового значения, введён определяемый пользователем гистерезис обнаружения событий. Он задаётся в процентах следующим образом:

- Для событий от эффективного значения напряжения – это процент от диапазона номинального напряжения (напр. 2% от 230 В, т.е. 4,6 В);
- Для событий от эффективного значения тока – это процент от диапазона номинального тока (например, для клещей С-4(А) и отсутствия измерительных трансформаторов, гистерезис 2% равен $0,02 \times 1000 \text{ А} = 20 \text{ А}$);
- Для остальных параметров гистерезис определяется в процентах от максимального значения порога (например, если максимальным порогом для коэффициента пикового значения тока задана величина 4,0, то гистерезис составляет $0,02 \times 4,0 = 0,08$).

8 РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ

8.1 Расчётные формулы для различных видов сети

Однофазная сеть			
Параметр			Метод расчёта
Название	Обозначение	Единицы	
Действующее значение напряжения (True RMS)	U_A	В	$U_A = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i^2}$ <p>где U_i очередной отсчёт напряжения U_{A-N}; $M=2048$ для сети 50 и 60 Гц.</p>
Постоянная составляющая напряжения	U_{ADC}	В	$U_{ADC} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i$ <p>где U_i очередной отсчёт напряжения U_{A-N}; $M=2048$ для сети 50 и 60 Гц.</p>
Частота	f	Гц	число целых периодов напряжения U_{A-N} , подсчитанных за 10 секундный интервал по времени часов, разделенному на общее время полных периодов.
Действующее значение тока (True RMS)	I_A	А	$I_A = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_i^2}$ <p>где I_i очередной отсчёт тока I_A; $M=2048$ для сети 50 и 60 Гц.</p>
Постоянная составляющая тока	I_{ADC}	А	$I_{ADC} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_i$ <p>где I_i очередной отсчёт тока I_A; $M=2048$ для сети 50 и 60 Гц.</p>
Активная мощность	P	Вт	$P = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i I_i$ <p>где U_i очередной отсчёт напряжения U_{A-N}, I_i очередной отсчёт тока I_A; $M=2048$ для сети 50 и 60 Гц.</p>
Реактивная мощность Budeanu	Q_B	вар	$Q_B = \sum_{h=1}^{50} U_h I_h \sin \varphi_h$ <p>где U_h - h-я гармоника напряжения U_{A-N}, I_h - h-я гармоника тока I_A, а φ_h - h-й угол между гармониками U_h и I_h.</p>
Реактивная мощность основной составляющей (первой гармоники)	Q_1	вар	$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1$ <p>где U_1 - основная составляющая (первая гармоника) напряжения U_{A-N}, I_1 - основная составляющая тока I_A, а φ_1 - угол между основными составляющими U_1 и I_1.</p>
Полная мощность	S	ВА	$S = U_{ARMS} I_{ARMS}$

Полная мощность искажения	S_N	ВА	$S_N = \sqrt{S^2 - (U_1 I_1)^2}$
Мощность искажения Budeanu	D_B	вар	$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2}$
Коэффициент мощности	PF	–	$PF = \frac{P}{S}$ если $PF > 0$, нагрузка является генератором; если $PF < 0$, нагрузка является приемником.
Коэффициент сдвига фаз	$\cos \varphi$ DPF	–	$\cos \varphi = DPF = \cos(\varphi_{U1} - \varphi_{I1})$ где φ_{U1} - абсолютный угол основной составляющей напряжения U_{A-N} φ_{I1} - абсолютный угол основной составляющей тока I_A .
Тангенс φ	$tg \varphi_{(L+)}$	–	$tg \varphi_{(L+)} = \frac{\Delta E_{Q(L+)}}{\Delta E_{P+}}$ где $\Delta E_{Q(L+)}$ - приращение реактивной энергии $E_{Q(L+)}$ (Budeanu/IEEE-1459) в данном интервале усреднения, а ΔE_{P+} - приращение активной потребленной энергии E_{P+} в данном интервале усреднения.
	$tg \varphi_{(C-)}$	–	$tg \varphi_{(C-)} = -\frac{\Delta E_{Q(C-)}}{\Delta E_{P+}}$ где $\Delta E_{Q(C-)}$ - приращение реактивной энергии $E_{Q(C-)}$ (Budeanu/IEEE-1459) в данном интервале усреднения, а ΔE_{P+} - приращение активной потребленной энергии E_{P+} в данном интервале усреднения.
	$tg \varphi_{(L-)}$	–	$tg \varphi_{(L-)} = \frac{\Delta E_{Q(L-)}}{\Delta E_{P+}}$ где $\Delta E_{Q(L-)}$ - приращение реактивной энергии $E_{Q(L-)}$ (Budeanu/IEEE-1459) в данном интервале усреднения, а ΔE_{P+} - приращение активной потребленной энергии E_{P+} в данном интервале усреднения.
	$tg \varphi_{(C+)}$	–	$tg \varphi_{(C+)} = -\frac{\Delta E_{Q(C+)}}{\Delta E_{P+}}$ где $\Delta E_{Q(C+)}$ - приращение реактивной энергии $E_{Q(C+)}$ (Budeanu/IEEE-1459) в данном интервале усреднения, а ΔE_{P+} - приращение активной потребленной энергии E_{P+} в данном интервале усреднения.
Гармоники тока и напряжения	U_{hx} I_{hx}	ВА	Метод гармонических подгрупп, по ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009), x - (ряд гармоник) = 1...40.
Коэффициент гармонических искажений напряжения	$THDU_F$	–	$THDU_F = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \times 100\%$, где U_h - h -я гармоника напряжения U_{A-N} , а U_1 - основная

относительно основной гармоники			составляющая напряжения U_{A-N} .
Коэффициент гармонических искажений напряжения относительно среднеквадратичного значения	$THDU_R$	–	$THDU_R = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_{ARMS}} \times 100\%$ где U_h - h-я гармоника напряжения U_{A-N} .
Коэффициент гармонических искажений тока относительно основной гармоники	$THDI_F$	–	$THDI_F = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} \times 100\%$ где I_h - h-я гармоника тока I_A , I_1 - основная составляющая тока I_A .
Коэффициент гармонических искажений тока относительно среднеквадратичного значения	$THDI_R$	–	$THDI_R = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_{ARMS}} \times 100\%$ где I_h - h-я гармоника тока I_A .
Коэффициент TDD	TDD		$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_L} \times 100\%$ где I_h - h-я гармоника тока I_A , I_L - востребованный ток (в автоматическом режиме I_L - максимальное среднее значение основной составляющей тока по всем каналам измерения тока из всего интервала регистрации).
Коэффициент пиковой амплитуды напряжения (пик-фактор напряжения)	CFU	–	$CFU = \frac{\max U_i }{U_{ARMS}}$ где величина $\max U_i $ выражает наибольшее из абсолютных значений отсчетов напряжения U_{A-N} $i = 2048$ для сети 50 и 60 Гц.
Коэффициент пиковой амплитуды тока (пик-фактор тока)	CFI	–	$CFI = \frac{\max I_i }{I_{ARMS}}$ где величина $\max I_i $ выражает наибольшее из абсолютных значений отсчетов тока I_A ; $i = 2048$ для сети 50 и 60 Гц.
Кратковременная доза фликера	P_{st}	–	рассчитывается в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.15-2012 (МЭК 61000-4-15:2010).
Длительная доза фликера	P_{lt}	–	$P_{LT} = \frac{1}{3} \sqrt{\sum_{i=1}^{12} (P_{STi})^3}$ где P_{sti} – очередная i-ая кратковременная доза фликера.
Активная энергия (потребляемая и	E_{P+}, E_{P-}	Вт·ч	$E_{P+} = \sum_{i=1}^m P_+(i)T(i)$

отдаваемая)			$P_+(i) = \begin{cases} P(i) & \text{для } P(i) > 0 \\ 0 & \text{для } P(i) \leq 0 \end{cases}$ $E_{P-} = \sum_{i=1}^m P_-(i)T(i)$ $P_-(i) = \begin{cases} P(i) & \text{для } P(i) < 0 \\ 0 & \text{для } P(i) \geq 0 \end{cases}$ <p>где i-это очередной номер окна измерения 10/12 периодов, $P(i)$ представляет значение активной мощности P, рассчитанной в i-м интервале измерения, $T(i)$ представляет длительность i-го интервала измерения в часах.</p>
Реактивная энергия	$E_{Q(L+)}$ $E_{Q(C-)}$ $E_{Q(L-)}$ $E_{Q(C+)}$	вар·ч	$E_{Q(L+)} = \sum_{i=1}^m Q_{L+}(i)T(i)$ $Q_{L+}(i) = Q(i) \text{ если } Q(i)>0 \text{ и } P(i)>0$ $Q_{L+}(i) = 0 \text{ в остальных случаях}$ $E_{Q(C-)} = \sum_{i=1}^m Q_{C-}(i)T(i)$ $Q_{C-}(i) = Q(i) \text{ если } Q(i)>0 \text{ и } P(i)<0$ $Q_{C-}(i) = 0 \text{ в остальных случаях}$ $E_{Q(L-)} = \sum_{i=1}^m Q_{L-}(i)T(i)$ $Q_{L-}(i) = Q(i) \text{ если } Q(i)<0 \text{ и } P(i)<0$ $Q_{L-}(i) = 0 \text{ в остальных случаях}$ $E_{Q(C+)} = \sum_{i=1}^m Q_{C+}(i)T(i)$ $Q_{C+}(i) = Q(i) \text{ если } Q(i)<0 \text{ и } P(i)>0$ $Q_{C+}(i) = 0 \text{ в остальных случаях}$ <p>где i-это очередной номер окна измерения 10/12 периодов, $Q(i)$ представляет значение реактивной мощности (Budeanu/IEEE-1459), рассчитанной в i-м окне измерения, $P(i)$ представляет значение активной мощности, рассчитанной в i-м окне измерения, $T(i)$ представляет длительность i-го окна измерения в часах.</p>
Полная энергия	E_S	ВА·ч	$E_S = \sum_{i=1}^m S(i)T(i)$ <p>где i-это очередной номер периода измерения 10/12 периодов, $S(i)$ представляет значение полной мощности S, рассчитанной в i-м периоде измерения, $T(i)$ представляет длительность i-го периода измерения в часах.</p>

Двухфазная сеть			
<i>(не перечисленные параметры рассчитываются как для однофазной сети)</i>			
Параметр			Метод расчёта
Название	Обозначение	Единицы	
Общая активная мощность	P_{tot}	Вт	$P_{tot} = P_A + P_B$
Общая реактивная мощность Budeanu	Q_{Btot}	вар	$Q_{Btot} = Q_{BA} + Q_{BB}$
Общая реактивная мощность основной составляющей	Q_{1tot}	вар	$Q_{1tot} = Q_{1A} + Q_{1B}$
Общая полная мощность	S_{tot}	ВА	$S_{tot} = S_A + S_B$
Общая полная мощность искажения	S_{Ntot}	ВА	$S_{Ntot} = S_{NA} + S_{NB}$
Общая мощность искажения Budeanu	D_{Btot}	вар	$D_{Btot} = D_{BA} + D_{BB}$
Общий коэффициент мощности	PF_{tot}	–	$PF_{tot} = \frac{P_{tot}}{S_{tot}}$
Общий коэффициент сдвига фаз	$\cos \varphi_{tot}$ DPF_{tot}	–	$\cos \varphi_{tot} = DPF_{tot} = \frac{1}{2} (\cos \varphi_A + \cos \varphi_B)$
Общий тангенс φ	$tg \varphi_{tot(L+)}$	–	$tg \varphi_{tot(L+)} = \frac{\Delta E_{Q_{tot(L+)}}}{\Delta E_{P_{tot+}}}$ <p>где: $\Delta E_{Q_{tot(L+)}}$ - приращение общей реактивной энергии $E_{Q_{tot(L+)}}$ (Budeanu/ IEEE-1459) в данном интервале усреднения, а $\Delta E_{P_{tot+}}$ - приращение общей активной потребленной энергии $E_{P_{tot+}}$ в данном интервале усреднения.</p>
	$tg \varphi_{tot(C-)}$	–	$tg \varphi_{tot(C-)} = \frac{\Delta E_{Q_{tot(C-)}}}{\Delta E_{P_{tot+}}}$ <p>где: $\Delta E_{Q_{tot(C-)}}$ - приращение общей реактивной энергии $E_{Q_{tot(C-)}}$ (Budeanu/ IEEE-1459) в данном интервале усреднения, а $\Delta E_{P_{tot+}}$ - приращение общей активной потребленной энергии $E_{P_{tot+}}$ в данном интервале усреднения.</p>
	$tg \varphi_{tot(L-)}$	–	$tg \varphi_{tot(L-)} = \frac{\Delta E_{Q_{tot(L-)}}}{\Delta E_{P_{tot+}}}$ <p>где: $\Delta E_{Q_{tot(L-)}}$ - приращение общей реактивной энергии $E_{Q_{tot(L-)}}$ (Budeanu/ IEEE-1459) в данном интервале усреднения, а $\Delta E_{P_{tot+}}$ - приращение общей активной потребленной энергии $E_{P_{tot+}}$ в данном</p>

			интервале усреднения.
	$tg\varphi_{tot(C+)}$	–	$tg\varphi_{tot(C+)} = \frac{\Delta E_{Qtot(C+)}}{\Delta E_{Ptot+}}$ <p>где: $\Delta E_{Qtot(C+)}$ - приращение общей реактивной энергии $E_{Qtot(C+)}$ (Budeanu/ IEEE-1459) в данном интервале усреднения, а ΔE_{Ptot+} - приращение общей активной потребленной энергии E_{Ptot+} в данном интервале усреднения.</p>
Общая активная энергия (потребляемая и отдаваемая)	E_{Ptot+} E_{Ptot-}	Вт·ч	$E_{Ptot+} = \sum_{i=1}^m P_{tot+}(i)T(i)$ $P_{tot+}(i) = \begin{cases} P_{tot}(i) & \text{для } P_{tot}(i) > 0 \\ 0 & \text{для } P_{tot}(i) \leq 0 \end{cases}$ $E_{Ptot-} = \sum_{i=1}^m P_{tot-}(i)T(i)$ $P_{tot-}(i) = \begin{cases} P_{tot}(i) & \text{для } P_{tot}(i) < 0 \\ 0 & \text{для } P_{tot}(i) \geq 0 \end{cases}$ <p>где i-это очередной номер окна измерения 10/12 периодов, $P_{tot}(i)$ представляет значение общей активной мощности P_{tot}, рассчитанной в i-м окне измерения, $T(i)$ представляет длительность i-го окна измерения в часах.</p>
Общая реактивная энергия	$E_{Qtot(L+)}$ $E_{Qtot(C-)}$ $E_{Qtot(L-)}$ $E_{Qtot(C+)}$	вар·ч	$E_{Qtot(L+)} = \sum_{i=1}^m Q_{L+}(i)T(i)$ $Q_{L+}(i) = Q(i) \text{ если } Q(i)>0 \text{ и } P(i)>0$ $Q_{L+}(i) = 0 \text{ в остальных случаях}$ $E_{Qtot(C-)} = \sum_{i=1}^m Q_{C-}(i)T(i)$ $Q_{C-}(i) = Q(i) \text{ если } Q(i)>0 \text{ и } P(i)<0$ $Q_{C-}(i) = 0 \text{ в остальных случаях}$ $E_{Qtot(L-)} = \sum_{i=1}^m Q_{L-}(i)T(i)$ $Q_{L-}(i) = Q(i) \text{ если } Q(i)<0 \text{ и } P(i)<0$ $Q_{L-}(i) = 0 \text{ в остальных случаях}$ $E_{Qtot(C+)} = \sum_{i=1}^m Q_{C+}(i)T(i)$ $Q_{C+}(i) = Q(i) \text{ если } Q(i)<0 \text{ и } P(i)>0$ $Q_{C+}(i) = 0 \text{ в остальных случаях}$

			где i -это очередной номер окна измерения 10/12 периодов, $Q(i)$ представляет значение реактивной мощности (Budeanu/IEEE-1459), рассчитанной в i -м окне измерения, $P(i)$ представляет значение активной мощности, рассчитанной в i -м окне измерения, $T(i)$ представляет длительность i -го окна измерения в часах.
Общая полная энергия	E_{Stot}	ВА·ч	$E_{Stot} = \sum_{i=1}^m S_{tot}(i)T(i)$ где i -это очередной номер окна измерения 10/12 периодов, $S_{tot}(i)$ представляет значение общей полной мощности S_{tot} , рассчитанной в i -м окне измерения, $T(i)$ представляет длительность i -го окна измерения в часах.

Трёхфазная сеть «звезда» с N			
<i>(не перечисленные параметры рассчитываются как для однофазной сети)</i>			
Параметр			Метод расчёта
Название	Обозначение	Единицы	
Общая активная мощность	P_{tot}	Вт	$P_{tot} = P_A + P_B + P_C$
Общая реактивная мощность Budeanu	Q_{Btot}	вар	$Q_{Btot} = Q_{BA} + Q_{BB} + Q_{BC}$
Общая реактивная мощность согласно IEEE 1459	Q_1^+	вар	$Q_1^+ = 3U_1^+ I_1^+ \sin \varphi_1$, где U_1^+ прямая симметричная составляющая напряжения (основной составляющей), I_1^+ прямая симметричная составляющая тока (основной составляющей), φ_1^+ угол между составляющими U_1^+ и I_1^+ .
Действующая полная мощность	S_e	ВА	$S_e = 3U_e I_e$, где $U_e = \sqrt{\frac{3(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) + U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2}{18}}$ $I_e = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2}{3}}$
Действующая полная мощность искажения	S_{eN}	ВА	$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 + S_{e1}^2}$, где $S_{e1} = 3U_{e1} I_{e1}$ $U_{e1} = \sqrt{\frac{3(U_{A1}^2 + U_{B1}^2 + U_{C1}^2) + U_{AB1}^2 + U_{BC1}^2 + U_{CA1}^2}{18}}$ $I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{A1}^2 + I_{B1}^2 + I_{C1}^2 + I_{N1}^2}{3}}$
Общая мощность	D_{Btot}	вар	$D_{Btot} = D_{BA} + D_{BB} + D_{BC}$

искажения Budeanu			
Общий коэффициент мощности	PF_{tot}	–	$PF_{tot} = \frac{P_{tot}}{S_e}$
Общий коэффициент сдвига фаз	$\cos \varphi_{tot} \text{ } DPF_{tot}$	–	$\cos \varphi_{tot} = DPF_{tot} = \frac{1}{3}(\cos \varphi_A + \cos \varphi_B + \cos \varphi_C)$
Общий тангенс φ	$\text{tg} \varphi_{tot(L+)}$ $\text{tg} \varphi_{tot(C-)}$ $\text{tg} \varphi_{tot(L-)}$ $\text{tg} \varphi_{tot(C+)}$	–	формулы, как для 2-фазной сети
Общая активная энергия (потребляемая и отдаваемая)	$E_{P_{tot+}}$ $E_{P_{tot-}}$	Вт	формулы, как для 2-фазной сети
Общая реактивная энергия	$E_{Q_{tot}(L+)}$ $E_{Q_{tot}(C-)}$ $E_{Q_{tot}(L-)}$ $E_{Q_{tot}(C+)}$	вар·ч	формулы, как для 2-фазной сети
Общая полная энергия	$E_{S_{tot}}$	ВА·ч	$E_{S_{tot}} = \sum_{i=1}^m S_e(i)T(i)$ где i -это очередной номер окна измерения 10/12 периодов, $S_e(i)$ представляет значение эффективной полной мощности S_e , рассчитанной в i -м окне измерения, $T(i)$ представляет длительность i -го окна измерения в часах.
Действующее значение нулевой симметричной составляющей напряжения	U_0	В	$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{A1} + \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{C1})$ $U_0 = \text{mag}(\underline{U}_0)$ где $\underline{U}_{A1}, \underline{U}_{B1}, \underline{U}_{C1}$ векторы основных составляющих фазных напряжений U_A, U_B, U_C , а оператор $\text{mag}(\underline{U}_0)$ обозначает модуль вектора.
Действующее значение прямой симметричной составляющей напряжения	U_1	В	$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{A1} + a\underline{U}_{B1} + a^2\underline{U}_{C1})$ $U_1 = \text{mag}(\underline{U}_1)$ где $\underline{U}_{A1}, \underline{U}_{B1}, \underline{U}_{C1}$ векторы основных составляющих фазных напряжений U_A, U_B, U_C , а оператор $\text{mag}(\underline{U}_1)$ обозначает модуль вектора, $a = 1e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j$, $a^2 = 1e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j$
Действующее значение обратной симметричной составляющей напряжения	U_2	В	$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{A1} + a^2\underline{U}_{B1} + a\underline{U}_{C1})$ $U_2 = \text{mag}(\underline{U}_2)$ где $\underline{U}_{A1}, \underline{U}_{B1}, \underline{U}_{C1}$ векторы основных составляющих фазных напряжений U_A, U_B, U_C , а оператор $\text{mag}(\underline{U}_2)$ обозначает модуль вектора, $a = 1e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j$, $a^2 = 1e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j$
Коэффициент асимметрии напряжения нулевой	u_0	%	$u_0 = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100\%$

последовательности			
Коэффициент асимметрии напряжения обратной последовательности	u_2	%	$u_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%$
Нулевая симметричная составляющая тока	I_0	A	$I_0 = \frac{1}{3}(I_{A1} + I_{B1} + I_{C1})$ $I_0 = \text{mag}(I_0)$ где I_{A1}, I_{B1}, I_{C1} векторы основных составляющих токов фаз I_A, I_B, I_C , оператор $\text{mag}(I_0)$ обозначает модуль вектора.
Действующее значение прямой симметричной составляющей тока	I_1	A	$I_1 = \frac{1}{3}(I_{A1} + aI_{B1} + a^2I_{C1})$ $I_1 = \text{mag}(I_1)$ где I_{A1}, I_{B1}, I_{C1} векторы основных составляющих токов фаз I_A, I_B, I_C , оператор $\text{mag}(I_1)$ обозначает модуль вектора.
Действующее значение обратной симметричной составляющей	I_2	A	$I_2 = \frac{1}{3}(I_{A1} + a^2I_{B1} + aI_{C1})$ $I_2 = \text{mag}(I_2)$ где I_{A1}, I_{B1}, I_{C1} векторы основных составляющих токов фаз I_A, I_B, I_C , оператор $\text{mag}(I_2)$ обозначает модуль вектора.
Коэффициент асимметрии тока нулевой последовательности	i_0	%	$i_0 = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100\%$
Коэффициент асимметрии тока обратной последовательности	i_2	%	$i_2 = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100\%$

Трёхфазная сеть «звезда» с изолированной нейтралью

(параметры: действующие значения напряжения и тока, постоянные составляющие напряжений и токов, коэффициенты THD и K, симметричные составляющие и коэффициенты асимметрии, дозы фликера рассчитываются также, как и для однофазной сети, только вместо фазных напряжений используется линейные напряжения)

Параметр			Метод расчёта
Название	Обозначение	Единицы	
Линейное напряжение U_{CA}	U_{CA}	B	$U_{CA} = -(U_{AB} + U_{BC})$
Ток I_2 (измерительные схемы Арона)	I_2	A	$I_2 = -(I_1 + I_3)$
Общая активная мощность	P_{tot}	Вт	$P_{tot} = \frac{1}{M} \left(\sum_{i=1}^M U_{iAC} I_{iA} + \sum_{i=1}^M U_{iBC} I_{iB} \right)$ U_{iAC} очередной отсчёт напряжения U_{A-C} U_{iBC} ; очередной отсчёт напряжения U_{B-C} I_{iA} очередной отсчёт тока I_A ; I_{iB} очередной отсчёт тока I_B ;

			M=2048 для сети 50 и 60 Гц.
Общая полная мощность	S_e	ВА	$S_e = 3U_e I_e, \text{ где}$ $U_e = \sqrt{\frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2}{9}}$ $I_e = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}}$
Общая реактивная мощность (Budeanu и IEEE 1459)	Q_{Btot}	вар	$Q = N = \text{sign} \sqrt{S_e^2 - P^2}$ <p>где <i>sign</i> равен 1 или -1. Знак оператора определяется по углу фазового сдвига между нормируемыми прямыми симметричными составляющими напряжений и токов.</p>
Общая мощность искажения Budeanu	D_{Btot}	вар	$D_{Btot} = 0$
Действующая полная мощность искажения	S_{eN}	ВА	$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 + S_{e1}^2}, \text{ где } S_{e1} = 3U_{e1} I_{e1}$ $U_{e1} = \sqrt{\frac{U_{AB1}^2 + U_{BC1}^2 + U_{CA1}^2}{9}}$ $I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{A1}^2 + I_{B1}^2 + I_{C1}^2}{3}}$
Общий коэффициент мощности	PF_{tot}	–	$PF_{tot} = \frac{P_{tot}}{S_e}$
Активная энергия (потребляемая и отдаваемая)	$E_{P_{tot+}}$ $E_{P_{tot-}}$	Вт	$E_{P_{tot+}} = \sum_{i=1}^m P_{tot+}(i)T(i)$ $P_{tot+}(i) = \begin{cases} P_{tot}(i) & \text{для } P_{tot}(i) > 0 \\ 0 & \text{для } P_{tot}(i) \leq 0 \end{cases}$ $E_{P_{tot-}} = \sum_{i=1}^m P_{tot-}(i)T(i)$ $P_{tot-}(i) = \begin{cases} P_{tot}(i) & \text{для } P_{tot}(i) < 0 \\ 0 & \text{для } P_{tot}(i) \geq 0 \end{cases}$ <p>где <i>i</i>-это очередной номер окна измерения 10/12 периодов, $P_{tot}(i)$ представляет значение общей активной мощности P_{tot}, рассчитанной в <i>i</i>-м окне измерения, $T(i)$ представляет длительность <i>i</i>-го окна измерения в часах.</p>
Общая полная энергия	$E_{S_{tot}}$	ВА·ч	$E_{S_{tot}} = \sum_{i=1}^m S_e(i)T(i)$ <p>где <i>i</i>-это очередной номер окна измерения 10/12 периодов, $S_e(i)$ представляет значение общей полной мощности S_e, рассчитанной в <i>i</i>-м окне измерения, $T(i)$ представляет длительность <i>i</i>-го окна измерения в часах.</p>

8.2 Методы усреднения параметров

Методы усреднения параметров	
Параметр	Метод усреднения
Действующее напряжение и ток	RMS (среднеквадратичное)
Постоянное напряжение и ток	среднее арифметическое
Частота	среднее арифметическое
Коэффициент пикового значения (пик-фактор) U, I	среднее арифметическое
Симметричные составляющие U, I	RMS (среднеквадратичное)
Коэффициент асимметрии U, I	рассчитываются из средних значений симметричных составляющих
Действующее значение тока	RMS (среднеквадратичное)
Активная, реактивная, полная мощность и мощность искажения	среднее арифметическое
Коэффициент мощности PF	рассчитывается из среднего значения мощности
cosφ	среднее арифметическое
tgφ	рассчитывается из среднего значения мощности
THD U, I	рассчитывают, как отношение среднего значения RMS высших гармоник к среднему значению RMS основной составляющей (для THD _F) или отношение среднего значения RMS высших гармоник к среднему значению эффективного напряжения (для THD _R)
Амплитуды гармоник U, I	RMS (среднеквадратичное)
Углы между гармониками напряжений и токов	среднее арифметическое
Активная и реактивная мощность гармоник	среднее арифметическое

Примечание:

Среднее значение RMS рассчитывается по формуле:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2}$$

Среднее арифметическое (AVG) рассчитывается по формуле:

$$AVG = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

где: X_i – это очередное значение параметра, подлежащего усреднению,
 N – это количество значений, подлежащих усреднению.

9 РУКОВОДСТВО ПО ПАРАМЕТРАМ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

9.1 Общая информация

Развитие промышленности во второй половине XX века привело к потреблению больших мощностей, что в свою очередь привело к ухудшению качества электрической энергии. В связи с этим был принят ГОСТ 13109-67 «Нормы качества электрической энергии», который в последующие года претерпевал ряд изменений и в ГОСТ 13109-97 включал в себя уже 11 параметров. С внедрением современного высокотехнологичного оборудования потребителей наблюдалось несоответствие отдельных показателей качеств, что в последствии 2013 году был принят ГОСТ 54149-2010 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.» Однако не соответствие требованиям национальным стандартам, таким как IEC 61000-4-30:2008 (ГОСТ 30804.4.30-2013), IEC 61000-4-7:2009 (ГОСТ 30804.4.7-2013), IEC 61000-4-15:2010 (ГОСТ Р 51317.4.15-2012) и европейскому стандарту EN 50160:2010 привело к созданию государственного стандарта ГОСТ 32144-2013 (введён 01.07.2014г.).

Методика выполнения измерений в анализаторах качества электропитания указана в стандарте ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008). Этот стандарт, ввёл строго определённые алгоритмы измерений, упорядочил рынок анализаторов, облегчая их сравнение, а также соответствие результатов измерений между анализаторами различных производителей. Ранее эти приборы использовали различные алгоритмы, поэтому результаты измерений одного и того же объекта разными устройствами часто давали диаметрально противоположные значения.

Факторами, которые привели к довольно значительному росту интереса к вопросам, связанным с качеством электроэнергии, были в том числе, распространение электронных регуляторов мощности, преобразователей постоянного тока и импульсных источников питания, энергосберегающих ламп и т.д., то есть, в широком смысле этого понятия, области преобразования электрической энергии. Все эти устройства имеют тенденцию к значительному изменению формы протекающего тока.

Импульсные источники питания (широко применяемые в быту и промышленности) часто устроены таким образом, что сетевое переменное напряжение выпрямляется и сглаживается с помощью конденсаторов, то есть, преобразуется в постоянное напряжение (DC), а затем преобразовывается с большой эффективностью на высокой частоте в выходное напряжение требуемой величины. Однако, такое решение имеет нежелательный побочный эффект. Зарядки сглаживающих конденсаторов происходят короткими импульсами тока в моменты, когда сетевое напряжение близко к максимальному значению. Из баланса мощности следует, что если ток потребляется только в короткие моменты времени, то и пиковое значение будет намного выше, чем для постоянного потребления. Большая величина отношения пикового значения тока к его действующему (среднеквадратичному) значению (так называемый пик-фактор), а также уменьшение коэффициента мощности (англ. Power Factor, PF) приводят к тому, что для получения определенной активной мощности в нагрузке (в Ватт), производитель энергии вынужден поставлять большую мощность, чем активная мощность нагрузки (так называемую полную мощность, выраженную в вольт-амперах, VA). Малый коэффициент мощности ведёт к увеличению нагрузки кабелей электропередачи и большим расходам на транспортировку электрической энергии. Возникающие при этом гармонические

составляющие тока питания, являются причиной дополнительных проблем. В результате производители начали налагать финансовые санкции на потребителей, которые не обеспечивали достаточно высокого коэффициента мощности.

Потенциально заинтересованными в анализаторах качества электроэнергии могут быть, с одной стороны, энергетические предприятия, которые смогут с их помощью контролировать своих потребителей, с другой стороны потребители энергии, которым такой прибор может обнаружить, а в дальнейшем исправить ситуацию снижения коэффициента мощности и другие проблемы, связанные с понятием качества электроэнергии в широком смысле.

Качественные параметры источника питания, а также энергетические свойства у потребителей описываются различными значениями и показателями. Это исследование может пролить немного света на данную область.

Как уже упоминалось ранее, отсутствие стандартизации в методах измерения, вызвало значительные отличия в расчётных значениях отдельных параметров сети при использовании различных приборов. Созданный стараниями многих инженеров, стандарт ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) был первым таким документом, в котором представлены очень точные методы, математические зависимости и требуемая точность измерений анализаторов электрической энергии. Соответствие стандарту (в частности, классу А) имело цель дать гарантию повторимых и практически одинаковых результатов измерений одних и тех же величин, измеряемых приборами различных производителей.

9.1.1 Жёсткие клещи (СТ) для измерения переменного тока (АС)

Жёсткие токовые клещи типа СТ (англ. Current Transformer Clamps) — это просто трансформатор, преобразующий большой ток первичной обмотки в меньший ток вторичной обмотки. Губки типичных токовых клещей выполнены из материала с ферромагнитными свойствами (например, железо) с намотанной вокруг них вторичной обмоткой. Первичной обмоткой становится провод, вокруг которого зажаты губки клещей или, как правило, один единственный виток. Если сейчас через исследуемый кабель течет ток 1000 А, в обмотке из 1000 витков потечет ток 1 А (если только контур замкнут). В клещах с выходом по напряжению, шунтирующий резистор находится в самих клещах.

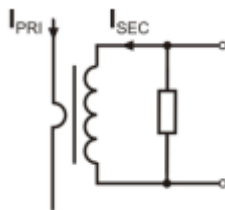


Рис.16 Жёсткие клещи с выходом по напряжению.

Этот тип трансформатора тока имеет несколько характерных особенностей. Ими можно измерять очень большие токи, одновременно потребляя малую мощность. Ток намагничивания является причиной некоторого смещения фазы (десятые доли градуса), что может привести к небольшой погрешности измерения мощности (особенно при малом коэффициенте мощности). Недостатком этого типа клещей также является насыщение сердечника при измерениях очень больших токов (выше номинального диапазона). Насыщение сердечника в результате явления магнитного

гистерезиса ведёт к появлению больших ошибок измерений, которые могут быть устранены только путём его размагничивания. Также в ситуации, когда измеряемый ток содержит значительную постоянную составляющую (DC), сердечник подвергается насыщению. Несомненным недостатком жестких клещей является также значительный вес.

Несмотря на перечисленные недостатки, токовые клещи типа СТ в настоящее время являются, наиболее распространенным неинвазивным методом измерения переменного тока (AC).

Вместе с анализатором можно использовать следующие клещи типа СТ для измерения переменного тока:

- С-4, с номинальным диапазоном 1000 А переменного тока (AC);
- С-6А, с номинальным диапазоном 10 А переменного тока (AC);
- С-7, с номинальным диапазоном 100 А переменного тока (AC).

9.1.2 Токовые клещи для измерения переменного и постоянного токов (AC/DC)

В некоторых ситуациях требуется измерение постоянной составляющей тока. Для этого должны быть использованы клещи с другим принципом работы, чем традиционный трансформатор тока. Такие токовые клещи используют физическое явление, называемое эффектом Холла, и содержат в своей конструкции датчик Холла (так называемый Холлотрон). Этот эффект заключается в появлении электрического напряжения на стенках проводника, находящегося в магнитном поле и кроме того через который, течёт электрический ток в направлении, поперечном к вектору индукции этого поля.

Токовые клещи, использующие это явление, могут измерять как переменный, так и постоянный ток. Проводник с током, помещённый внутри клещей, создает магнитное поле, которое сосредоточено в железном сердечнике. В разрыве этого сердечника, в месте, где обе части губок соединяются, находится полупроводниковый датчик Холла, а выходное напряжение этого датчика усиливается электронной схемой, запитанной от батарейки.

Клещи этого типа, как правило, имеют ручку регулировки нуля тока. Чтобы её выполнить, необходимо сомкнуть губки (без провода внутри) и поворачивать ручку регулятора до достижения нулевого показателя постоянного тока.

Клещами такого типа, которые сейчас предлагает **Sonel S.A.**, являются клещи С-5 с номинальным диапазоном 1000 А переменного тока (AC) и 1400 А постоянного тока (DC). Клещи имеют выход по напряжению и для номинального тока 1000 А выдают на нём напряжение 1 В (1 мВ/А).

9.1.3 Гибкие клещи Роговского

Гибкие токовые клещи (англ. Flexible Current Probes) работают совершенно по другому физическому принципу, чем трансформатор тока. Их наиболее важной частью является так называемая катушка Роговского, названная по имени немецкого физика Вальтера Роговского. Это воздушная (без сердечника) катушка, обвитая вокруг провода с током. Специальная конструкция катушки позволяет вывести оба ее конца с одной стороны, что позволяет легко замкнуть гибкие клещи вокруг провода (обратный конец размещён внутри катушки по всей ее длине). Ток, проходя по измеряемому проводу, создаёт концентрические линии магнитного поля и используя явление самоиндукции,

наводит электродвижущую силу на концах катушки. Однако, это напряжение пропорционально скорости изменения тока в проводнике, а не самому току.

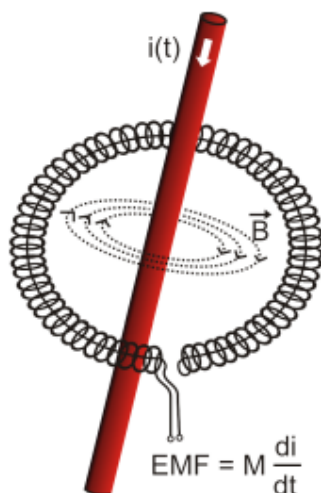


Рис.17 Катушка Роговского.

Катушка Роговского имеет несколько неоспоримых преимуществ по сравнению с трансформаторами тока. Так как она не имеет сердечника, то не оказывает влияния его насыщения, следовательно, она имеет отличные возможности для измерения больших токов. Эта катушка также имеет превосходную линейность и широкую полосу пропускания, гораздо больше, чем у токовых трансформаторов, а в сравнении с ними также имеет гораздо меньший вес.

Однако до недавнего времени гибкие токовые клещи имели проблемы с расширением экспансии в области измерения тока. Потому что существуют определённые факторы, которые затрудняют практическую реализацию измерительной системы с катушкой Роговского. Одним из них является очень низкий уровень напряжения, которое индуцируется на выводах (оно зависит от геометрических размеров катушки). Например, выходное напряжение на частоте 50 Гц для гибких клещей серии F (при использовании с анализатором PQM-700) составляет около 45 мкВ/А. Такие низкие уровни напряжений требуют применения прецизионных и малошумящих усилителей, что, конечно, приводит к увеличению расходов.

Поскольку выходное напряжение пропорционально производной тока, необходимо применение интегрирующей цепи; обычно продаются гибкие токовые клещи, состоящие из катушки Роговского, соединенной со схемой аналогового интегратора (типичный модуль питается от батарейки). На выходе интегратора уже появляется сигнал напряжения, пропорциональный измеряемой силе тока и, кроме того, соответствующим образом откалиброванный (например, 1 мВ/А).

Ещё одна проблема, которая сопровождает катушку Роговского, это чувствительность к внешнему магнитному полю. Идеальная катушка должна быть чувствительна только к полю, ограниченному замкнутой площадью катушки и совершенно подавлять внешние магнитные поля. Оказывается, что это очень сложная задача. Единственным способом получения таких свойств является очень точное изготовление катушки, с идеальной однородностью намотки и как можно более низким импедансом.

Именно высокая точность изготовления катушечной обмотки несёт ответственность за относительно высокую стоимость таких гибких клещей.

9.2 Мерцание света (фликер)

Английское слово flicker означает мерцание. В отношении вопросов, связанных с качеством энергии, означает явление периодического изменения интенсивности света, в связи с изменением напряжения питания лампочки освещения.

Функция измерения этого мерцания появилась в анализаторе качества электроэнергии, когда выяснилось, что это явление приводит к ухудшению самочувствия, раздражению, иногда головной боли и т.д. Колебания интенсивности света, должны иметь вполне определённую частоту, они не могут быть слишком медленными, потому что тогда человеческий зрачок сможет адаптироваться к изменениям освещённости; не могут быть слишком быстрыми, потому что инерция нити лампочки накаливания почти полностью сглаживает эти изменения.

Исследования показали, что максимум неудобств возникает на частоте около 9 изменений в секунду. Наиболее чувствительными источниками освещения оказались традиционные лампы накаливания с вольфрамовой спиралью. Галогенные лампы, спирали которых имеют более высокую температуру, имеют также намного большую инерцию, которая снижает восприимчивость человеком изменений яркости. Лучшей «сопротивляемостью» к мерцанию характеризуются люминесцентные лампы, некоторые специфические свойства которых стабилизируют ток, протекающий через лампу при изменении напряжения и, тем самым, уменьшают колебания силы света.

Фликер измеряется в так называемых условных единицах восприятия и выделяют два их типа: кратковременный P_{st} (англ. short term), значение которого определяется один раз в 10 минут, и длительный P_{lt} (англ. long term), значение которого определяется на основе следующих 12 значения P_{st} , то есть каждые 2 часа. Длительное время измерения вытекает непосредственно из медленно меняющегося характера явления – чтобы собрать достоверную выборку данных, измерение должно быть длительным. P_{st} равное 1 считается значением, которое лежит на границе восприятия - конечно чувствительность к мерцанию отличается у разных людей; принятие этого порога следует из тестов, проведённых на некоторой репрезентативной группе людей.

А что является причиной возникновения явления мерцания света? Чаще всего источником являются провалы напряжения в результате подключения и отключения нагрузки большой мощности и некоторый уровень мерцания присутствует в большинстве сети питания. Помимо вышеописанного, неблагоприятное воздействие на людей не должно быть (и, обычно, не является) симптомом неполадок нашего оборудования. Но если в сети наблюдается довольно внезапное и необъяснимое повышение уровня мерцания света (рост значения коэффициентов P_{st} и P_{lt}) ни в коем случае не надо этого игнорировать. Это может оказаться, что мерцание возникает из-за плохих соединений в системе – повышенное падение напряжения на соединениях в распределительном щитке (например), вызовут большие колебания напряжения на потребителях, таких как лампочки накаливания. Падение напряжения на соединениях одновременно способствуют их нагреву, заканчивающемуся искрением и возможно пожаром. Периодические проверки сети и описанные симптомы помогут привлечь внимание и найти источник угрозы.

9.3 Измерение мощности

Мощность является одним из наиболее важных параметров, определяющих свойства электрических цепей. Основной величиной, лежащей в основе финансовых расчётов между поставщиком и получателем, является электрическая энергия, равная произведению мощности на время.

В электротехнике встречается несколько различными видами мощности:

- Активная мощность (англ. *Active Power*) обозначена буквой P и измеряемая в Ваттах;
- Реактивная мощность (англ. *Reactive Power*) обозначена Q , единица вар;
- Полная мощность (англ. *Apparent Power*) S , единица ВА.

Три вышеперечисленных вида мощности являются наиболее известными, но это не означает, что список мощностей на этом заканчивается.

В школе учат, что эти вышеуказанные мощности образуют треугольник мощностей, свойства которого выражает уравнение:

$$P^2 + Q^2 = S^2$$

Однако, это уравнение справедливо только для систем с синусоидальной формой токов и напряжений. Перед тем, как перейти к более подробному обсуждению вопросов, связанных с измерениями мощности, необходимо сначала определить различные мощности.

9.3.1 Активная мощность

Активная мощность P в строгом физическом смысле является величиной, выражающей способность системы для выполнения определённой работы. Эта мощность наиболее желательная для потребителей энергии и именно за поставляемую активную мощность в расчётном периоде получатель платит поставщику электроэнергии (отдельно обсуждается проблема дополнительной оплаты за реактивную мощность). Именно активная мощность (и, следовательно, активная энергия) измеряется счётчиками электрической энергии в каждом домашнем хозяйстве.

Основная формула для расчета активной мощности следующая:

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(t)i(t)dt$$

где: $u(t)$ - мгновенное значение напряжения, $i(t)$ - мгновенное значение тока, T - период, за который рассчитывается мощность.

В синусоидальных системах активную мощность можно рассчитать, как:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

где: U – действующее (среднеквадратичное) значение напряжения, I – действующее (среднеквадратичное) значение тока, а φ – угол сдвига фазы между напряжением и током.

Анализатор вычисляет активную мощность непосредственно по формуле с интегралом, используя отсчеты сигналов напряжения и тока:

$$P = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i I_i$$

где M – число отсчетов в окне измерения 10/12-периодов и составляет 2048, U_i и I_i являются последовательными отсчетами выборки напряжения и тока.

9.3.2 Реактивная мощность

Наиболее известная формула для реактивной мощности действительна только для однофазных цепей с синусоидальной формой напряжения и тока:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Интерпретация этой мощности в таких системах заключается в следующем: это амплитуда переменной составляющей мгновенной мощности на зажимах источника. Существование некоторого ненулевого значения этой мощности свидетельствует о двухстороннем и колебательном перетоке энергии между источником и приёмником.

Представим себе однофазную сеть с синусоидальным источником напряжения, нагрузкой которого является RC-цепь. Так как в таких условиях эти элементы ведут себя линейно, протекание тока источника будет иметь синусоидальный характер, но из-за свойств конденсатора, ток смещается относительно напряжения источника. В этой схеме реактивная мощность Q отлична от нуля и может быть интерпретирована как амплитуда колебаний энергии, которая попеременно накапливается в конденсаторе и отдаётся источнику. Активная мощность конденсатора равна нулю.

Но, как выясняется, явление колебания энергии только кажется эффектом, да и то происходящим в особых случаях цепей с синусоидальной формой токов и напряжений, а не причина появления реактивной мощности. Проведённые в этой области исследования, показывают, что реактивная мощность появляется также и в схемах, в которых не возникает никаких колебаний энергии. Это утверждение, которое может удивить многих инженеров. В новых публикациях, касающихся теории мощности, единственным физическим явлением, которое всегда сопровождается наличием реактивной мощности, является сдвиг фаз между током и напряжением.

Указанная выше формула для расчёта реактивной мощности является правильной только для синусоидальных однофазных цепей. Возникает вопрос: как рассчитывается реактивная мощность в несинусоидальных системах? Этот вопрос открывает пресловутый «ящик Пандоры» в сфере электротехники. Оказывается, что определение реактивной мощности в реальных системах (а не только в идеализированных), является предметом споров и в настоящее время (на 2009 год) не существует единого и общепризнанного определения реактивной мощности в системах с несинусоидальной формой напряжения и тока, даже не говоря уже здесь о несбалансированных трёхфазных цепях. В стандарте IEEE (Международной ассоциации инженеров по электротехнике и электронике) под номером 1459-2000 (с 2000 года) для несинусоидальной трехфазной цепи мы не найдём формулы для полной реактивной мощности – как три основные мощности перечислены:

активная мощность, полная и, внимание, неактивная, обозначенная буквой N. Реактивную мощность ограничена только основной гармоникой тока и напряжения и обозначена Q_1 .

Упомянутый стандарт является последним документом такого рода, выпущенным признанной организацией, который должен был упорядочить тематику, касающуюся определения мощности. Это было тем более необходимо, что в научной среде уже много лет раздаются голоса, что используемые до сих пор определения могут давать ошибочные результаты. Споры касались, прежде всего, определения реактивной мощности и полной (а также мощности искажений, о чем позже) в одно- и трёхфазных цепях с несинусоидальной формой напряжения и тока.

В 1987 году профессор L. Czarnecki доказал ошибочность широко распространённого определения реактивной мощности по Budeanu, то есть определения, которое по сей день преподаётся во многих технических школах. Это определение было впервые представлено профессором Budeanu в 1927 году и имеет следующий вид:

$$Q_B = \sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n$$

где U_n и I_n являются высшими гармониками напряжения и тока порядка n , а φ_n углами между этими компонентами.

Так как введение этой величины означало, что известное уравнения «треугольника мощности» не выполняется для цепей с несинусоидальными формами сигналов, Budeanu ввёл новую величину, называемую мощностью искажения:

$$D_B = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q_B^2)}$$

Мощность искажения должна была представлять в системе мощность, возникающую вследствие искажений формы напряжения и тока.

Реактивная мощность была в течение многих лет связана с колебаниями энергии между источником и нагрузкой. Как видно из формулы, реактивная мощность по определению Budeanu, является суммой отдельных гармоник реактивной мощности. Из-за фактора $\sin \varphi$ эти компоненты могут быть положительным или отрицательным в зависимости от угла между напряжением и током гармоники. Таким образом, возможна ситуация, когда общая реактивная мощность Q_B будет равна нулю при ненулевых компонентах гармоник. Наблюдение, что при ненулевых составляющих суммарная реактивная мощность по этому определению может быть равна нулю, является ключом для более глубокого анализа, который в конечном счёте, позволил доказать, что величина Q_B может давать в некоторых ситуациях совершенно неожиданные результаты. Проведённые исследования ставят под сомнение широко распространённое убеждение, что есть какая-то связь между колебаниями энергии и реактивной мощностью Budeanu Q_B . Можно привести примеры цепей, в которых, несмотря на существование колебательного характера мгновенной мощности, реактивная мощность по определению Budeanu равна нулю. На протяжении многих лет учёные не могли связать с реактивной мощностью в соответствии с этим определением, никакого физического явления.

Перечисленные выше сомнения, в правильности этого определения мощности, конечно, бросают тень, на связанную с ней мощность искажения D_v . Начали искать ответ на вопрос, будет ли мощность искажения D_v на самом деле являться мерой искажений процессов в несинусоидальных цепях. Искажением мы называем ситуацию, когда форму сигнала напряжения не удастся «наложить» на форму протекающего тока с помощью двух операций: изменение амплитуды и сдвиг по времени. Другими словами, если выполнены следующие условия:

$$u(t) = A i(t - \tau)$$

то напряжение не искажено по отношению к току. В случае синусоидального напряжения и нагрузки, являющейся любой комбинацией элементов RLC, это условие всегда выполняется (для синусоидального процесса эти элементы сохраняют линейность). Однако, когда форма напряжения уже искажена, нагрузка RLC не обеспечивает неискажённого тока, относительно напряжения и уже не является линейной нагрузкой - необходимо выполнение некоторых дополнительных условий (соответственно с частотой меняются модуль и фаза импеданса нагрузки).

И поэтому, действительно ли мощность D_v является мерой искажений? К сожалению, в данном случае также оказалось, что теория мощности по Budeanu разочаровывает. Было доказано, что мощность искажения может быть равна нулю в ситуации, когда напряжение искажено относительно протекающего тока, и наоборот, мощность искажения может быть ненулевой при полном отсутствии искажений.

Практический аспект теории мощности, касающийся повышения коэффициента мощности цепей с реактивной мощностью, должен быть тем фактором, который больше всего выиграет от правильного определения реактивной мощности. Попытки компенсации, на основе реактивной мощности Budeanu и связанной с ней мощностью искажений не удалось. Эти величины не позволяют даже правильно рассчитать компенсирующую ёмкость, дающую максимальный коэффициент мощности. Доходило даже до того, что такие попытки заканчивались дополнительным ухудшением этого показателя.

Можно задать вопрос: как стало возможным, что теория мощности Budeanu стала так популярна? Причин может быть несколько. Во-первых, привычка инженеров к старому определению и не изменяемая много лет программа обучения в школе. Это фактор часто недооценивается, но, как оправдание можно отметить, что эта теория на протяжении 60 лет не дождалась опровержения. Во-вторых, в 20-х годах прошлого века не было измерительных приборов, которые давали представление об отдельных гармонических составляющих напряжения и тока, поэтому было трудно проверять новые теории. В-третьих, искажения формы токов и напряжений (и, следовательно, высокое содержание гармоник), это эффект революции в электроэнергетике, которая началась только во второй половине прошлого века. Начали крупномасштабно использовать тиристоры, управляемые выпрямители, преобразователи и т.д. Все эти действия сопровождалась очень большими искажениями токов в сетях питания, а следовательно, повышением уровня гармонических искажений. Только тогда начали ощущать недостатки в теории мощности Budeanu. Наконец, в-четвёртых, в связанной с энергетикой научной среде был осознан тот факт, что промышленные предприятия инвестировали целые состояния в инфраструктуру измерения (счётчики электроэнергии). Любые изменения в этом отношении могут иметь огромные финансовые последствия.

Тем не менее, медленные изменения в сознании инженеров-электриков стали видны. С течением лет все чаще возникали нелинейные нагрузки и процессы с очень большими искажениями, невозможно было дальше терпеть ограничения в применяемых формулах.

Очень значимым событием стала публикация в 2000 году организацией IEEE стандарта 1459, название которого звучит так: «Определения для измерений величин, связанных с электрической мощностью в синусоидальных, несинусоидальных, симметричных и несимметричных условиях». Впервые реактивная мощность по определению Budeanu оказалась в группе рекомендуемых определений, которые не должны использоваться в новых счётчиках мощности и реактивной энергии. Также видно было разделение многих величин на те, что связаны с основной составляющей тока и напряжения (первая гармоника) и другими высшими гармониками. В большинстве случаев считается, что полезная часть энергии передаётся только с помощью составляющих 50/60Гц, при гораздо меньшем и часто вредном участии высших гармоник.

В стандарте также появилась новая величина – неактивная мощность N , которая представляет все неактивные компоненты мощности:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Реактивная мощность является одной из составляющих неактивной мощности N . В однофазных цепях с синусоидальным напряжением и током, N равно Q , поэтому в неактивной мощности нет других составляющих. В трёхфазных цепях такое свойство имеют только симметричные синусоидальные сети со сбалансированной чисто резистивной нагрузкой.

Следующие составляющие неактивной мощности связаны с конкретными физическими явлениями. По теории профессора Czarneskiego, одному из лучших объяснений физических явлений в трёхфазных цепях, уравнение мощности в таких системах можно записать следующим образом:

$$S^2 = P^2 + D_s^2 + Q^2 + D_u^2$$

D_s – это мощность рассеяния, которая появляется в системе, в результате изменения активной проводимости нагрузки вместе с изменением частоты. Таким образом, наличие в нагрузке реактивных элементов может привести к появлению мощности рассеяния.

Реактивная мощность Q в этом уравнении появляется при наличии фазового сдвига между гармониками напряжения и тока.

D_u – обозначает мощность дисбаланса, которая является мерой несбалансированности трёхфазной нагрузки. Эта составляющая объясняет ситуацию, при которой несбалансированная трёхфазная нагрузка с чисто резистивным характером, приводит к коэффициенту мощности меньше единицы. Такой потребитель не имеет реактивной мощности Q и, несмотря на это, из треугольника мощности S , P , Q следует что-то совсем другое (теория мощности Budeanu со своей мощностью искажений также не может объяснить эту ситуацию – для чисто резистивной нагрузки мощность искажения D в равна нулю).

Попытка соединения IEEE 1459-2000 с теорией мощности Czarneskiego приводит к выводу, что неактивная мощность скрывает в себе, по крайней мере, три отдельных физических явления, которые

влияют на снижение эффективности передачи энергии от источника к приёмнику, то есть уменьшение коэффициента мощности:

$$PF = \frac{P}{S_e} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + D_s^2 + Q^2 + D_u^2}}$$

В стандарте IEEE 1459-2000 известная под буквой Q – реактивная мощность была ограничена основной гармоникой и это касается как однофазных систем, так и трёхфазных.

В однофазных цепях:

$$Q_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$$

В трёхфазных системах учитываются только составляющие прямой последовательности этой мощности:

$$Q_{1^*} = 3U_{1^*} \cdot I_{1^*} \cdot \sin \varphi_{1^*}$$

Для правильного измерения этой мощности требуется соответствующая последовательность чередования фаз (задержка фазы L2 на 120 ° по отношению к L1, задержка фазы L3 на 240 ° по отношению к L1).

Концепция составляющих прямой последовательности будет более подробно рассмотрена при обсуждении асимметрии.

Значение основной составляющей реактивной мощности является основной величиной, которая позволяет оценить величину конденсатора, корректирующего коэффициент DPF или сдвиг основной гармоники напряжения относительно этой же составляющей тока (то есть компенсатора реактивной мощности основной гармоники).

9.3.3 Реактивная мощность в 3-х проводных схемах

Правильное измерение реактивной мощности невозможно в несимметричных приёмниках, подключенных по 3-х проводной схеме (типа «треугольник» и «звезда» с изолированной нейтралью). Это утверждение может многих удивить.

Приёмник можно рассматривать как «чёрный ящик» с доступными только 3 зажимами. Мы не в состоянии определить внутренней структуры такого приёмника. Чтобы вычислить реактивную мощность необходимо знать угол сдвига фаз между током и напряжением, возникающих в каждой ветви такого приёмника. К сожалению, мы не знаем этого угла. В приёмнике по схеме типа «треугольник» мы знаем напряжение, присутствующие на отдельных сопротивлениях, но не знаем ток; в таких системах измеряются линейные напряжения и линейные токи. Каждый из линейных токов является суммой двух токов фаз. В приёмниках типа «звезда» с изолированной нейтралью мы знаем токи, проходящие по сопротивлению, однако не знаем напряжений (каждое из линейных напряжений является суммой двухфазных напряжений).

Нужно осознать тот факт, что при заданных напряжениях на зажимах и токах, входящих в такой «чёрный ящик» существует бесконечно много вариантов внутренней конструкции приёмника, которые дадут нам одинаковые результаты измерений токов и напряжений, видимых снаружи такого «чёрного ящика».

Как же это возможно, что существуют счётчики реактивной мощности, предназначенные для измерений в 3-х проводных сетях, и анализаторы электрических сетей, которые в таких условиях обеспечивают измерение реактивной мощности?

В обоих случаях производители прибегают к хитрости, которая заключается в искусственном создании опорной точки (виртуальный зажим нейтрали N). Такую точку очень легко можно создать, подключая к зажимам нашего «чёрного ящика» схему из трёх резисторов одной и той же величины и соединенных звездой. Потенциал центральной точки схемы резисторов используется для расчёта «фазных напряжений». Конечно, кавычки здесь совершенно на месте – такой виртуальный ноль даёт при измерении правильные результаты, только при минимальной асимметрии приёмника. В любом другом случае к показаниям реактивной мощности такого прибора следует относиться с большой долей недоверия.

Измерительный прибор ни в коем случае не должен вводить пользователя в заблуждение, а такого рода приближение можно допустить лишь при условии, что отображаемое значение не является результатом фактического измерения, а лишь приблизительным значением.

9.3.4 Реактивная мощность и счётчики реактивной энергии

Счётчик реактивной энергии – это скорее всего, прибор неизвестный домашним пользователям, т.к. широко используются и являются основой для расчётов с поставщиком, счётчики активной энергии, измеряемой в Вт*ч или кВт*ч. Домашний пользователь, таким образом, находится в удобном положении – платит только за полезную энергию и не должен интересоваться какой коэффициент мощности в его сети.

Промышленные потребители – в отличие от той первой группы – обязаны, на основании подписанных договоров и часто под угрозой финансовых штрафов, поддерживать коэффициент мощности на должном уровне.

Например, в Польше, распоряжение министра экономики, касающееся конкретных условий функционирования энергетической системы, определяет качественные параметры, которые должны быть выполнены поставщиком энергии для различных, так называемых, групп подключения. Среди этих параметров находятся, например, частота сети, действующее значение напряжения, коэффициент гармонических искажений (THD) и допустимые уровни отдельных гармоник напряжения. Однако поставщик не обязан выполнять эти требования, если получатель энергии не обеспечивает значения коэффициента $\text{tg } \varphi$ ниже 0,4 (значение по договорённости, которое может быть изменено в договоре между поставщиком и потребителем электроэнергии) и/или превышает согласованный уровень потребляемой активной мощности.

Коэффициент $\text{tg } \varphi$ глубоко укоренился в энергетическом законодательстве и его определяют как результат отношения начисленной реактивной мощности к активной мощности в данный расчётный

период. Если вернуться на некоторое время к «треугольнику мощности» в синусоидальных системах, то мы заметим, что тангенс угла сдвига фаз между током и напряжением равен отношению реактивной мощности Q к активной мощности P . Таким образом, критерий удержания $\operatorname{tg} \varphi$ ниже 0,4 не означает ничего другого, как только определение, что максимальный уровень подсчитанной реактивной энергии не может быть выше, чем 0,4 от значения полученной активной энергии. Любое потребление реактивной энергии выше договоренности подлежит дополнительной оплате.

Но даёт ли знание рассчитываемого таким образом коэффициента $\operatorname{tg} \varphi$ обеим заинтересованным сторонам реальную картину эффективности передачи энергии? Разве не было упомянуто выше, что реактивная мощность является только одной из составляющих неактивной мощности, которые тоже влияют на снижение коэффициента мощности?

Действительно, кажется, что вместо $\operatorname{tg} \varphi$ следовало бы использовать коэффициент мощности PF , который также учитывает и другие факторы.

Нынешние правила, к сожалению, не дают другого выбора, поэтому точное измерение реактивной мощности является ключевым моментом. Теперь стоит поставить вопрос: с учётом описанных выше споров по определению реактивной мощности, обеспечивают ли счётчики этой энергии правильные показания? И что же в действительности измеряют обычно используемые счётчики реактивной мощности?

Ответы на эти вопросы можно попробовать получить в стандарте, представленном для этих счётчиков – ГОСТ 31819.23-2012 (IEC 62053—23:2003) «Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Часть 23. Статические счётчики реактивной энергии». К сожалению, и нашему разочарованию, в нём не найдётся каких-либо ссылок для измерений в условиях не синусоидальности – расчётные формулы относятся к синусоидальным ситуациям (в стандарте можно прочитать, что из «практических» соображений ограничили исключительно синусоидальными процессами). В нём не указаны какие-либо критерии испытаний, которые бы позволили проверить характеристики счётчика при искаженных формах напряжений и токов.

Нынешняя ситуация оставляет разработчикам счётчиков свободный выбор метода измерения, что, к сожалению, приводит к значительным различиям показаний реактивной энергии при наличии большого уровня гармонических искажений.

Счётчики старого типа, то есть, электромеханические, имеют характеристики, аналогичные фильтру нижних частот – высшие гармоники в нём подавлены, таким образом измерение реактивной мощности в присутствии гармоник очень близко к значению основной составляющей реактивной мощности.

Более распространённые электронные счётчики могут проводить измерение различными методами. Например, они могут измерять активную мощность и полную мощность и вычислить реактивную мощность из «треугольника мощности» (квадратный корень из суммы квадратов двух этих мощностей). Так действительно, в свете стандарта IEEE 1459-2000, они измеряют неактивную мощность, а не реактивную. Другой производитель может использовать метод со смещением фазы напряжения на 90° , что даёт результат, приближённый к основной гармонике реактивной мощности.

Чем больше содержание гармоник, тем больше будет разница в показаниях, и конечно в результате будет другая плата за начисленную энергию.

Как уже указывалось ранее, измерение реактивной мощности в 3-х проводных несбалансированных системах с помощью обычных счётчиков обременено дополнительной ошибкой, вызванной созданием внутри счётчика виртуального нуля, имеющего мало общего с реальным нулем нагрузки.

Что ещё хуже, производители обычно не дают никакой информации о применяемом методе измерения.

Остаётся только с нетерпением ждать следующей версии стандарта, которая - будем надеяться - предложит гораздо более точный метод измерения и также метод исследования в несинусоидальных условиях.

9.3.5 4-квадрантные счётчики реактивной энергии

В энергетике во многих ситуациях применяется разделение реактивной энергии на четыре независимых составляющих, каждая из которых рассчитывается отдельно. Разделение на так называемые квадранты основано на знаках активной и реактивной мощности, как показано на рисунке 18:

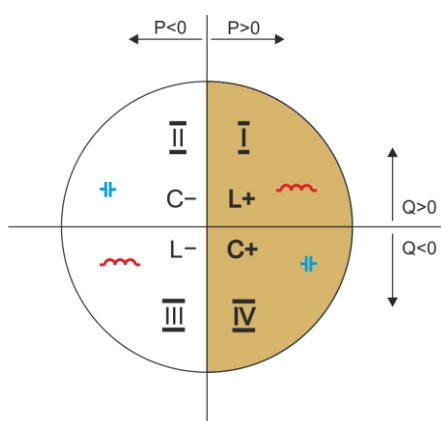


Рис.18 Квадрантное деление потока мощности и энергии.

- Квадрант I (обозначение «L+»): активная мощность положительна (потребление активной энергии), реактивная мощность положительна (потребление реактивной энергии). В таких условиях характер нагрузки индуктивный.
- Квадрант II (обозначение «C-»): активная мощность отрицательна (отдача активной энергии), реактивная мощность положительна (потребление реактивной энергии). Характер нагрузки ёмкостный.
- Квадрант III (обозначение «L-«): активная мощность отрицательна (отдача активной энергии), реактивная мощность также отрицательна (отдача реактивной энергии). В таких условиях характер нагрузки индуктивный.
- Квадрант IV (обозначение «C+»): активная мощность положительна (потребление активной энергии), реактивная мощность отрицательна (отдача реактивной энергии). Характер нагрузки ёмкостный.

Знаки плюс и минус в обозначениях квадрантов указывают на знак активной мощности.

Указанное разделение позволяет конструировать счётчики реактивной энергии, которые увеличивают свои показания только тогда, когда поток энергии находится в данном квадранте. Это означает, что в любой момент времени только один из таких счётчиков может увеличить своё состояние.

В типичном случае поставки энергии к потребителю работа осуществляется в двух квадрантах: I (L+) и IV (C+). В этих двух квадрантах также контролируется тангенс φ (в польских условиях) в случае потребителей, подключенных к сети среднего и высокого напряжения. Квадрантные коэффициенты $\text{tg}\varphi$ определяются на основе зарегистрированного потребления соответствующей энергии:

$$\text{tg}\varphi_{(L+)} = \frac{\Delta E_{Q(L+)}}{\Delta E_{P+}}$$

$$\text{tg}\varphi_{(C+)} = \frac{\Delta E_{Q(C+)}}{\Delta E_{P+}}$$

Если применить соглашение, что все счётчики энергии имеют положительный знак, то рассчитанные значения тангенса дополняются знаком, вытекающим из знаков реактивной и активной мощности в данном квадранте. Таким образом, знак $\text{tg}\varphi_{(L+)}$ всегда будет положительным, а в случае $\text{tg}\varphi_{(C+)}$ всегда отрицательным.

Рассчитанные значения тангенсов могут быть основанием для начисления возможных штрафов за чрезмерное потребление реактивной энергии. Для квадранта I (L+) типичное предельное значение, выше которого взимается плата — это 0,4. Для квадранта IV (C+) часто любое потребление реактивной энергии является основанием для начисления штрафов. Из этого также следует практический вывод, что наиболее выгодно (с точки зрения получателя) работать в первом квадранте (L+) в диапазоне $\text{tg}\varphi_{(L+)}$ между 0 и 0,4.

9.3.6 Полная мощность

Полная мощность S выражается как произведение действующих значений напряжения и тока:

$$S = U \cdot I$$

Как таковая мощность не имеет физической интерпретации; однако, используется при проектировании оборудования распределительных сетей. Она равна по величине максимальной активной мощности, которая может быть подана в нагрузку при данных действующих значениях напряжения и тока. Таким образом, полная мощность определяет максимально возможную способность источника для доставки полезной энергии к приёмнику.

Мерой эффективности использования подаваемой в приёмник мощности является коэффициент мощности, другими словами, отношение полной мощности к активной мощности.

В синусоидальных системах:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{UI \cos \varphi}{UI} = \cos \varphi$$

В несинусоидальных системах такое упрощение недопустимо и коэффициент мощности рассчитывается на основе реального соотношения активной и полной мощности:

$$PF = \frac{P}{S}$$

В однофазных сетях полная мощность рассчитывается, так это как показано в приведённой выше формуле, и здесь нет никаких сюрпризов. Оказывается, однако, что в трёхфазных сетях расчёт этой мощности также вызывает серьёзные проблемы, как и те, что связаны с реактивной мощностью. Разумеется, это относится к реальным сетям с несинусоидальными сигналами, которые также могут быть несимметричными.

Исследования показали, что формулы, используемые до сих пор, могут давать ошибочные результаты, если сеть не является сбалансированной. Так как полная мощность – это условная величина и не имеет физической интерпретации, выяснение, какое из предлагаемых определений полной мощности, является подходящим, может вызывать затруднения. Тем не менее, были предприняты попытки, опираясь на наблюдения, доказать, что полная мощность тесно связана с потерями при передаче и коэффициентом мощности. Зная потери передачи и коэффициент мощности можно косвенно определить правильное определение полной мощности.

До сих пор используются определения, среди прочих, арифметической полной мощности и геометрической полной мощности. Проведённые исследования показали, что ни арифметическое, ни геометрическое определения не дают в результате правильного значения коэффициента мощности. Единственным, что удовлетворяло такой ситуации, оказалась определение, которое уже в 1922 году предложил немецкий физик Ф. Бухгольц (F. Buchholz):

$$S_e = 3U_e \cdot I_e$$

Оно основано на действующих значениях напряжения и тока, а сама мощность называется эффективной полной мощностью (по этой причине, для трёхфазных цепей в обозначение добавлен индекс «е»). Эти действующие значения напряжения и тока – это такие теоретические значения, которые представляют напряжения и токи в сбалансированной энергетически симметричной трёхфазной системе. Поэтому ключевыми являются определения величин U_e и I_e .

Стандарт IEEE 1459 даёт следующие формулы. В трёхпроводных сетях:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} \quad U_e = \sqrt{\frac{U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2}{9}}$$

В четырёхпроводных сетях:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}} \quad U_e = \sqrt{\frac{3(U_a^2 + U_b^2 + U_c^2) + U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2}{18}}$$

где I_a, I_b, I_c , соответственно действующие значения токов отдельных фаз (линейные и фазные), I_n – действующее значение тока нулевого проводника, U_a, U_b, U_c – это действующие значения фазных напряжений, а U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} являются действующими значениями линейных напряжений.

Таким образом, расчётная величина S_e учитывает как потери мощности в нулевом проводе (в четырёхпроводных сетях), так и влияние несбалансированности.

9.3.7 Мощность искажения D_v и эффективная полная мощность искажения S_{eN}

При обсуждении реактивной мощности было показано, что мощность искажения по определению V_{dean} не может быть применима при больших искажениях напряжений и токов, а также асимметрии трёхфазных цепей (парадокс мощности искажений, которая не является показателем реального искажения). Однако, несмотря на это, такая мощность часто используется специалистами, занимающимися анализом качества электроэнергии и производителями схем компенсации реактивной мощности.

Здесь необходимо чётко указать, что опора на данный параметр давала приемлемые результаты только в условиях небольшого искажения формы процессов и малой асимметрии.

Стандарт IEEE 1459-2000 упоминает это определение мощности, однако, так же, как и в случае реактивной мощности V_{dean} , она несет неустранимый недостаток и рекомендуется окончательно отказаться от её использования.

В место мощности D_v предложена другая величина, которая намного лучшим способом характеризует общую мощность искажения в системе – полная мощность искажения S_{eN} . Мощность S_{eN} позволяет быстро определить, что нагрузка работает в условиях малых или больших гармонических искажений и является также основой для определения параметров пассивных или активных фильтров и компенсаторов.

Согласно определению (для трёхфазных систем):

$$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2}$$

где:

$$S_{e1} = 3I_{e1}U_{e1}$$

Действующий ток и напряжение основной гармоники (соответственно I_{e1} и U_{e1}) рассчитываются так же, как I_e и U_e , с той лишь разницей, что вместо действующих значений фазных или линейных напряжений и действующих значений линейных токов подставляются эффективные значения их основных составляющих.

В однофазных системах для расчёта полной мощности искажений можно использовать более простую формулу:

$$S_N = \sqrt{S^2 - (U_1 I_1)^2}$$

где U_1 и I_1 являются эффективными значениями основной составляющей фазового напряжения и тока.

9.3.8 Коэффициент мощности

Истинный коэффициент мощности, то есть тот, который принимает во внимание также наличие высших гармоник, называется просто коэффициентом мощности (англ. True Power Factor, TPF или PF). Для синусоидальных цепей он равняется так называемому коэффициенту фазового сдвига, то есть популярному $\cos \varphi$ (англ. Displacement Power Factor, DPF).

Поэтому DPF является мерой сдвига фаз между основными составляющими напряжения и тока:

$$DPF = \frac{P_1}{S_1} = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi_{U_1 I_1}}{U_1 I_1} = \cos \varphi_{U_1 I_1}$$

$$PF = \frac{P}{S}$$

В случае чисто резистивной нагрузки (в однофазной сети) полная мощность равна значению активной мощности, а реактивная мощность равна нулю, таким образом, эта нагрузка в полной мере использует энергетический потенциал источника и коэффициент мощности равен 1. Появление реактивной составляющей неизбежно ведёт к снижению эффективности передачи энергии – активная мощность тогда меньше полной мощности, а реактивная мощность растёт.

В трёхфазных схемах на уменьшение коэффициента мощности также влияет несбалансированность приёмника (смотри обсуждение реактивной мощности). В этих системах правильное значение коэффициента мощности получается при использовании эффективной полной мощности S_e , то есть величины, определённой, в частности, в стандарте IEEE 1459-2000.

9.4 Гармоники

Разложение периодических сигналов на гармонические составляющие является очень популярной математической операцией, основанной на теореме Фурье, в которой говорится, что каждый периодический сигнал можно представить как сумму синусоидальных составляющих более высоких частот, которые являются кратными основной частоте такого сигнала. Непрерывные сигналы можно подвергнуть операции быстрого преобразования Фурье (сокращенно FFT), которая даёт в результате амплитуды и фазы гармонических составляющих спектра частот.

В идеальной ситуации напряжение вырабатывается в генераторе, который даёт на своем выходе неискаженный синусоидальный сигнал 50/60 Гц (отсутствие каких-либо высших гармоник). Если приёмник является линейной системой, то в таких идеальных условиях ток также будет неискаженным синусоидальным сигналом. В реальных системах, сигналы, как напряжения, так и тока искажаются, поэтому должны содержать кроме основной составляющей также гармоники высших порядков.

Почему присутствие высших гармоник в сети, является нежелательным?

Одной из причин является скин-эффект, который основан на выталкивании электронов из центра проводника (провода) наружу с увеличением частоты тока. В результате, чем выше частота, тем

меньше эффективного сечения проводника имеют в своём распоряжении электроны, что эквивалентно увеличению его сопротивления. В результате этого явления, чем выше порядок гармоники тока, тем больше эффективное сопротивление проводки для этой гармоники, а это, в свою очередь, неизбежно приводит к увеличению потерь мощности и нагреву проводов.

Классический пример, связанный с этим эффектом, касается нейтрального провода в трёхфазных сетях. В сетях с низким уровнем искажений, малым дисбалансом и симметричной нагрузкой (или небольшой асимметрией) ток в нейтральном проводнике стремится к нулю (он намного меньше эффективных значений фазных токов). Это наблюдение спровоцировало многих конструкторов на экономию, основанную на установке в таких системах кабелей с нулевым проводом с меньшим сечением, чем фазные провода. И все очень хорошо работало до того момента, когда в сети появились гармоники нечётных рядов, являющиеся кратными 3 высшего порядка (третья, девятая, и т.д.). Вдруг нейтральный провод начинал перегреваться, а измерение тока указывало на его очень высокое эффективное значение. Объяснение этого явления, довольно простое. Конструктор не учёл в приведённом выше примере двух обстоятельств: в сетях с искажениями высшие гармоники могут не компенсироваться в нейтральном проводе, а наоборот – суммироваться, и, во-вторых, скин-эффект и высокие значения токов высших гармоник дополнительно увеличили его нагрев.

Попытаемся теперь ответить на два основных вопроса:

- Что является причиной появления гармоник в напряжении?
- Что является причиной появления гармоник в токе?

Казалось бы, эти два вопроса, выглядят почти идентично, однако разделение напряжения и тока является чрезвычайно важным для понимания сути вопроса.

Ответ на первый вопрос будет следующим: гармоники в напряжении являются следствием ненулевого импеданса распределительной сети, между генератором (принимая, что он генерирует чистую синусоиду) и приёмником.

Однако гармоники тока являются результатом нелинейного характера импеданса приёмника. Конечно, следует отметить, что если линейный приёмник питается напряжением искажённой формы, то форма тока также искажается.

В литературе часто используются утверждения, что «приёмник генерирует гармоники». Следует помнить, что в этом случае приёмник не является физическим источником энергии (как это предполагает слово «генерирует»). Единственным источником энергии в системе является распределительная сеть. Если приёмник является пассивным устройством, то энергия, передаваемая от приёмника в распределительную систему, происходит из этой же распределительной системы. Мы здесь имеем дело с вредным и бесполезным двусторонним потоком энергии. Как уже обсуждалось ранее в случае с коэффициентом мощности, такое явление приводит к ненужным потерям энергии, а ток «генерируемый» в приёмнике вызывает дополнительную нагрузку на распределительную систему.

Рассмотрим следующий пример. Типичный нелинейный приёмник, такой как, например, широко используемые импульсные источники питания (например, компьютерные), запитан от идеального

генератора синусоидального напряжения. Теперь предположим, что импеданс соединений между генератором и приёмником имеет нулевое значение. Напряжение, измеренное на клеммах приёмника, будет иметь синусоидальную форму (отсутствие высших гармоник) – это просто напряжение генератора. Однако, форма тока в приёмнике, уже будет содержать гармонические составляющие – нелинейный приёмник часто потребляет ток только в определённые моменты времени всего периода синусоиды (например, максимальный ток может попадать на пики синусоиды напряжения).

Но приёмник не создает этих гармонических составляющих тока, он просто потребляет ток не постоянно или прерывисто. Вся энергию поставляет только генератор.

На следующем этапе можно изменить схему, вставляя между генератором и приёмником определённое сопротивление, которое представляет собой активное сопротивление проводов, обмоток трансформатора и т.д.

Измерения гармоник напряжения и тока приёмника дадут немного другие результаты. Что изменится? Появятся небольшие составляющие гармоники напряжения, и, кроме того, немного изменится спектр частот тока.

При анализе формы напряжения в приёмнике можно заметить, что первоначально синусоидальный сигнал слегка исказился. Если приёмник потребляет ток в основном в моменты пиков напряжения – это будет выглядеть, как усечённые вершины. Большой потребляемый ток в эти моменты приводит к большому падению напряжения на импедансе сети. Часть идеального синусоидального сигнала накапливается сейчас на этом импедансе. Некоторое изменение в спектре тока следует из несколько иной формы напряжения питания.

Пример описанных здесь "плоских вершин" синусоидального напряжения — это очень часто наблюдаемая картинка в типичных сетях, к которым подключены широко распространённые конструкции импульсных блоков питания.

9.4.1 Характеристика гармоник в трёхфазных сетях

Гармоники определенного ряда в 3-фазных системах имеют некоторые специфические особенности, которые показывает таблица:

Ряд	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота (Гц)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Последовательность (+) прямая, (-) обратная, (0) нулевая	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Строка «Последовательность» относится к методу симметричных составляющих, который позволяет разложить любой из 3-х векторов на три набора векторов: прямой, обратной и нулевой последовательности (подробнее в разделе, посвящённом проблеме асимметрии).

Воспользуемся примером. Предположим, что трёхфазный двигатель запитан от симметричной 4-х проводной сети (то есть эффективные значения фазных напряжений равны и углы между отдельными основными компонентами составляют по 120°).

Знак «+» в строке, определяющей последовательность для 1-гармоники, означает нормальное направление вращения вала двигателя. Гармоники напряжения, для которых этот знак также «+» приводят к возникновению крутящего момента совпадающего с направлением основной гармоники. Гармоники рядов 2, 5, 8, 11 являются гармониками обратной последовательности, то есть производят крутящий момент, который препятствует нормальному направлению вращения двигателя, что может привести к нагреванию, ненужной потере энергии и снижению производительности. Последней группой являются гармоники нулевой последовательности, такие как, например, третья, шестая и девятая, которые не производят никакого крутящего момента, но протекая по обмотке двигателя, вызывают его дополнительный нагрев.

На основании данных таблицы легко можно увидеть, что последовательность «+», «-», «0» повторяется для всех последующих рядов гармоник. Формулу, связывающую тип последовательности с рядом очень прост и для k , который является любым целым числом:

Последовательность	Гармонический ряд
прямая «+»	$3k + 1$
обратная «-»	$3k - 1$
Нулевая «0»	$3k$

Гармоники чётных рядов отсутствуют, когда данный процесс является симметричным относительно линии его среднего значения, а такое свойство имеют сигналы в большинство систем питания. В типичной ситуации измеренные уровни гармоник чётных рядов имеют минимальные значения. Если учесть это свойство, то окажется, что группы гармоник с самыми нежелательными качествами – это 3-я, 9-я, 15-я (нулевая последовательность), а также 5-я, 11-я, 17-я (обратная последовательность).

Гармоники тока, которые кратны числу 3 создают дополнительные проблемы в некоторых системах. В 4-х проводных системах они имеют очень нежелательную особенность суммироваться в нулевом проводе. Оказывается, что в отличие от гармоник других рядов, где сумма значений мгновенных фазных токов компенсируется, процессы этих гармоник совпадают по фазе, что приводит к добавлению фазных токов этой составляющей в нулевом проводе. Это может привести к перегреву этого провода (в частности, в распределительных системах, в которых использовано меньшее сечение этого провода, чем фазовых, а до недавнего времени это еще было распространенной практикой). По этой причине, в сетях с нелинейными нагрузками и большими искажениями тока, в настоящее время рекомендуется, чтобы сечение нейтрального провода было больше сечения фазных проводов.

В системах типа «треугольник» гармоники этих рядов отсутствуют в линейных токах (с оговоркой, что речь идет о симметричных системах), в то время как они циркулируют в ветвях нагрузки, также вызывая ненужные потери мощности.

Такой характер отдельных гармоник, как это показано в таблице, сохраняется с полной точностью только в трёхфазных симметричных системах. Только в таких системах основная гармоника имеет характер исключительно прямой последовательности. В реальных системах, в которых есть определенная степень асимметрии напряжения питания и дисбаланс нагрузки, появляются не нулевые составляющие обратной и нулевой последовательности. Мерой этой асимметрии являются

так называемые коэффициенты несимметрии. И именно из-за этой асимметрии основной гармоники, и, кроме того, разницы в амплитудах и фазах высших гармоник в каждой из фаз - эти гармоники также будут иметь компоненты прямой, обратной и нулевой последовательности. Чем больше асимметрия, тем больше будут также доли остальных составляющих.

Стандарт ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) рекомендует, чтобы в анализаторах сети применялся метод подгрупп гармонических составляющих.

9.4.2 Коэффициент гармонических искажений (THD)

Коэффициент гармонических искажений THD (англ. Total Harmonic Distortion) является наиболее распространённым показателем искажения сигналов. На практике используются две разновидности этого коэффициента:

- THD_F - коэффициент гармонических искажений, относительно основной гармоники сигнала (от англ. fundamental),
- THD_R - коэффициент гармонических искажений относительно среднеквадратичного значения (RMS) сигнала.

В обоих случаях THD измеряется в процентах. Ниже приведены определения:

$$THD_F = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n A_h^2}}{A_1} \times 100\% \quad THD_R = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n A_h^2}}{A_{RMS}} \times 100\%$$

где: A_h – действующее значение гармоники h -го ряда;
 A_1 – действующее значение основной гармоники;
 A_{RMS} – действующее значение сигнала.

Ограничение числа гармоник, учитываемых при расчете THD, имеет условный характер и связано, прежде всего, с ограничениями измерительного устройства. Поскольку анализатор позволяет измерять гармоники до 50-го порядка, при расчёте THD учитываются гармоники 50-го или 40-го порядка.

Следует иметь в виду, что два упомянутых определения будут давать значительно отличающиеся друг от друга значения при сильно искаженных сигналах. THD_R не может превышать 100%, а THD_F такого предела не имеет и может принимать значения, даже 200% и более. Такой случай может наблюдаться при измерении значительно искаженного тока. Гармонические искажения напряжения, как правило, не превышают нескольких процентов (как THD_F, так и THD_R).

9.4.3 Коэффициент искажения тока TDD

Коэффициент искажения тока TDD (англ. Total Demand Distortion) – это показатель, представляющий уровень эффективных значений высших гармоник токов, относительно максимального востребованного тока (англ. Demand Current). Он выводится из коэффициента THD и его значение выражается формулой:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_L} \times 100\%$$

где: I_h – действующее значение тока гармоник h -го ряда,

I_L – востребованный ток.

Сравнивая приведенную выше формулу с THD для токов, вы можете видеть, что они различаются только значением знаменателя. Числитель остаётся неизменным и представляет собой эффективное значение высших гармоник.

Востребованный ток I_L – это максимальное среднее значение основной составляющей тока, зарегистрированное в период наблюдения. В качестве периода наблюдения обычно принимается неделя или месяц.

Для объяснения разницы между THD и TDD воспользуемся примером. Предположим, что основная составляющая тока в цепи изменяется между значениями 1000 А и 10 А. Искажение формы тока примерно на одном и том же уровне во всем интервале изменения основной составляющей и соответствует коэффициенту THD_F примерно 50%. Если создать график изменения коэффициента THD во времени, то получится более-менее постоянное значение 50% во всем интервале времени. Обратите внимание, что несмотря на то, что в исследуемом интервале времени основная составляющая изменяется в 100 раз, на основе графика THD нельзя сделать вывод о потерях энергии в цепи в результате возникновения гармоник. Если создать такой же график для коэффициента TDD, то он будет иметь вид, аналогичный графику основной составляющей тока – максимальное значение TDD достигнет 50%, а минимальное примерно 0,5%. Таким образом, TDD лучше отражает изменения эффективного значения высших гармоник – если ток достигнет максимального значения, то TDD приблизится к THD, но если значение тока в цепи уменьшается, то также уменьшается и коэффициент TDD.

Для расчёта коэффициента TDD необходимо заранее указать или рассчитать ток I_L . Анализаторы PQM предоставляют два возможных метода:

- Автоматический – ток I_L определяется приложением, как максимальное зарегистрированное среднее значение основной составляющей тока (из всего интервала регистрации, по всем каналам тока). После включения регистрации TDD, анализатор автоматически записывает параметры для расчета его значения;
- Вручную – ток I_L вводится пользователем (в приложении, при анализе данных). Значение TDD рассчитывается на основе введенного значения.

9.5 Асимметрия

Асимметрия является понятием, связанным с трёхфазными сетями, и может относиться к:

- Асимметрии напряжений питания;
- Асимметрии токов нагрузки;
- Асимметрии приёмника.

Асимметрия напряжений (токов) происходит в трёхфазных сетях, когда значения трёх составляющих напряжений (токов) различаются между собой и/или углы между отдельными фазами отличаются от 120° .

Асимметрия приёмника возникает тогда, когда сопротивления в отдельных ветвях приёмника не равны между собой.

Эти явления особенно вредны для трёхфазных двигателей, в которых даже небольшая асимметрия напряжения может привести к многократно большей асимметрии токов. В таких условиях крутящий момент двигателя уменьшается, и появляются увеличенные потери тепла в обмотках и механический износ. Асимметрия также негативно отражается на силовых трансформаторах.

Наиболее распространённым источником асимметрии является неравномерность нагрузки отдельных фаз. Хорошим примером является подключение к сети трёхфазного переменного тока однофазных нагрузок, таких, как железнодорожные тяговые двигатели.

Анализатор позволяет измерять асимметрии напряжений и токов методом симметричных составляющих. Этот метод основан на предположении, что каждый набор в составе трёх неуравновешенных векторов, можно разложить на сумму трёх групп векторов: прямой, обратной и нулевой последовательности.

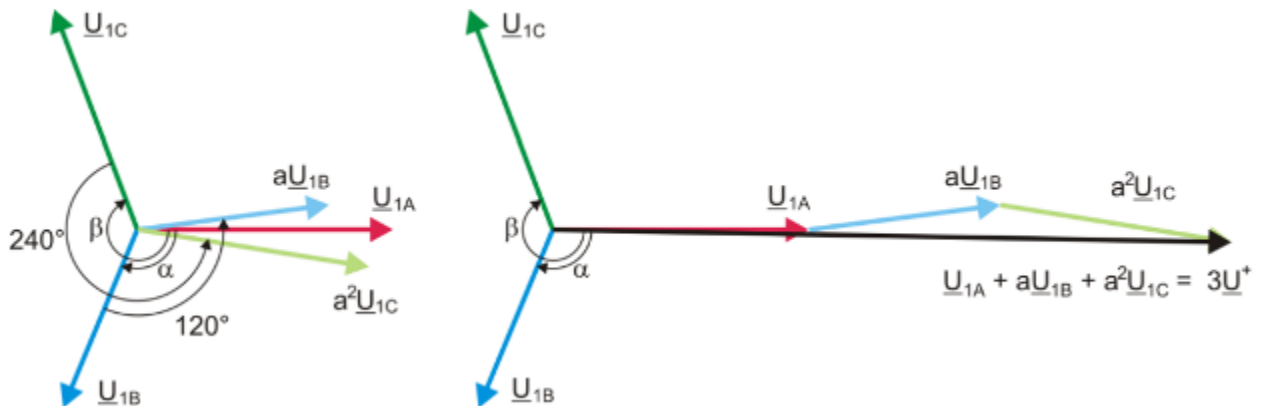


Рис.19 Пример определения симметричной составляющей прямой последовательности.

В качестве примера представлен способ расчёта напряжения составляющей прямой последовательности. По определению:

$$\underline{U}^+ = \frac{1}{3} (\underline{U}_{1A} + a\underline{U}_{1B} + a^2\underline{U}_{1C})$$

где: \underline{U}^+ – является вектором прямой последовательности,

\underline{U}_{1A} , \underline{U}_{1B} , \underline{U}_{1C} являются векторами основных составляющих фазных напряжений U_A , U_B , U_C ,

$$a = 1e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \quad a^2 = 1e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j$$

На рисунке 19 представлен графический способ определения этой составляющей. Как видно из данного определения, вектор соответствующей составляющей равен одной трети суммы компонентов: \underline{U}_{1A} , $a\underline{U}_{1B}$, $a^2\underline{U}_{1C}$. Параметр a и a^2 – это единичные векторы с углами 120° и 240° .

Процедура, следующая: вектор напряжения \underline{U}_{1B} нужно повернуть на угол 120° против часовой стрелки (умножение на «а») и добавить к вектору \underline{U}_{1A} . Затем вектор \underline{U}_{1C} нужно повернуть на угол 240° и добавить к предыдущей сумме векторов. В результате получится вектор $3\underline{U}^+$. Вектор \underline{U}^+ является искомой симметричной составляющей прямой последовательности. Отметим, что в случае идеальной симметрии (равные напряжения и углы), составляющие прямой последовательности, будут равны по величине фазным напряжениям.

Аналогично, обратная составляющая является мерой подобия симметричного набора трёхфазных векторов обратной последовательности.

Нулевая последовательность существует в системах, в которых сумма трёх напряжений (или токов) не равна нулю.

Широко используемой в энергетике величинами, характеризующими асимметрию сети, являются коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательности (формулы для напряжения):

$$u_0 = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100\% \quad u_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%$$

где: u_0 – коэффициент несимметрии по нулевой последовательности;
 u_2 – коэффициент несимметрии по обратной последовательности;
 U_0 – нулевая симметричная составляющая;
 U_1 – прямая симметричная составляющая;
 U_2 – обратная симметричная составляющая.

Наиболее удобный метод для расчёта симметрических составляющих и коэффициентов несимметрии – это использование в расчётах комплексных чисел. Параметрами векторов являются амплитуда основной гармоники напряжения (тока) и ее абсолютный угол фазового сдвига. Оба эти значения получаются из быстрого преобразования Фурье (FFT).

9.6 Провалы, перенапряжения и прерывания напряжения

Провалы, перенапряжения и прерывания напряжения являются нарушениями в сети, в течение которых действующее значение напряжения значительно отличается от номинального значения. Каждое из этих трёх состояний может быть обнаружено анализатором после включения обнаружения событий и определения пользователем значения порогов.

Провал напряжения – это состояние, в котором действующее значение напряжения ниже заданного порога провала. Основой измерения провала является значение $U_{RMS(1/2)}$, то есть действующее значение, периодически обновляемое каждую половину периода.

Определение провала (ГОСТ 30804.4.30-2013): провал напряжения начинается в тот момент, когда напряжение $U_{RMS(1/2)}$ уменьшится ниже порогового значения провала, и заканчивается в тот момент, когда значение напряжения $U_{RMS(1/2)}$ станет равным или превысит порог провала с гистерезисом напряжения.

Как правило, порог провала устанавливают, на уровне 90% U_{nom} . Во время провала анализатор записывает минимальное зарегистрированное значение напряжения (эта величина называется остаточным напряжением U_{res} и является одним из параметров, характеризующих провал) и среднее значение напряжения.

Прерывание питания – это состояние, в котором напряжение $U_{RMS(1/2)}$ ниже установленного порога прерывания. Как правило, порог прерывания устанавливается значительно ниже порога провала, на уровне около 1...10 % U_{nom} .

Прерывание начинается в тот момент, когда напряжение $U_{RMS(1/2)}$ уменьшится ниже порогового значения прерывания и заканчивается в тот момент, когда значение напряжения $U_{RMS(1/2)}$ станет равным или превысит порог прерывания с гистерезисом напряжения.

Во время прерывания анализатор сохраняет минимальное зарегистрированное значение напряжения и среднее значение напряжения.

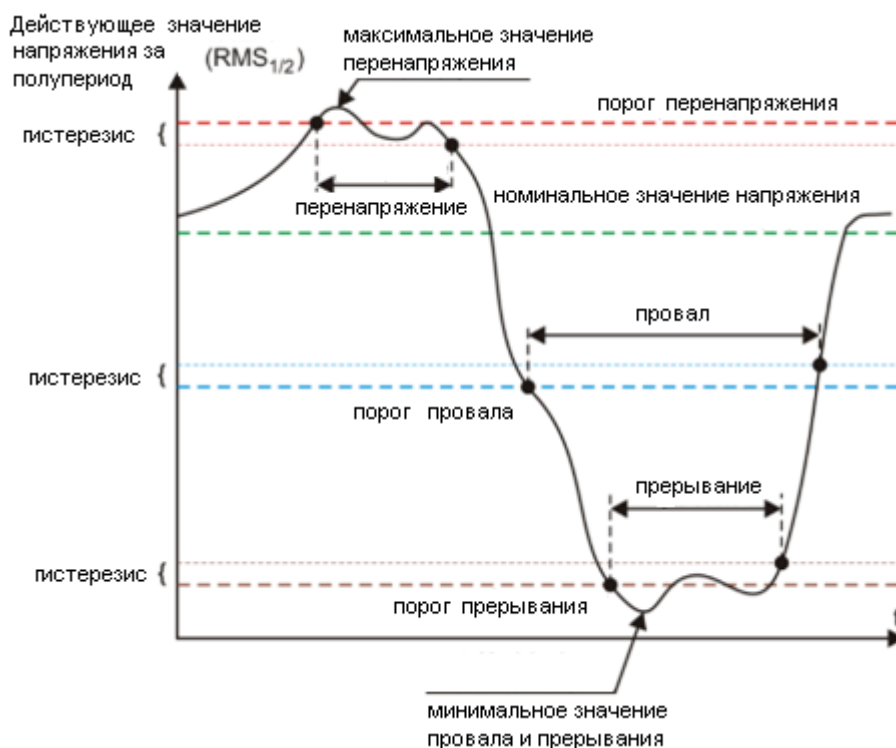


Рис.20 Перенапряжения, провалы и прерывания напряжения.

Перенапряжение – это состояние повышенного значения напряжения. Порог напряжения, как правило, устанавливается на уровне, близком к 110 % U_{nom} .

Превышение напряжения начинается в тот момент, когда напряжение $U_{RMS(1/2)}$ превысит значение порога перенапряжения, а заканчивается в тот момент, когда значение напряжения $U_{RMS(1/2)}$ станет равным или меньше порога перенапряжения уменьшенного на гистерезис напряжения.

Во время перенапряжения анализатор сохраняет максимальное зарегистрированное значение напряжения, а также среднее значение напряжения.

Значение гистерезиса для этих трёх состояний то же самое и выражается, как установленное пользователем значение в процентах от номинального напряжения (параметр **Гистерезис обнаружения событий**).

Анализатор фиксирует время начала и окончания события (с точностью до половины периода).

Минимальная продолжительность события провала, прерывания и перенапряжения составляет половину периода.

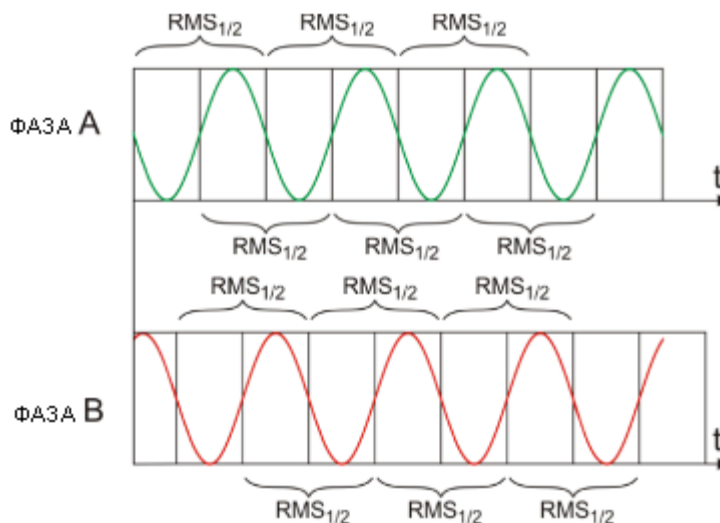


Рис.21 Определение значения $U_{RMS(1/2)}$.

Значения $U_{RMS(1/2)}$ определяются в течение 1 периода в момент перехода через ноль основной гармоники напряжения и обновляются каждые полпериода независимо для каждого канала напряжения. Это означает, что эти значения были получены в разное время для разных каналов.

Рисунок 21 иллюстрирует метод определения значения $RMS_{1/2}$ на примере двух фаз напряжения. Информация о переходе через ноль основной гармоники получена путём быстрого преобразования Фурье (FFT).

9.7 Линии СВЕМА и ANSI

Кривая СВЕМА была впервые предложена в 70-х годах прошлого века организацией, от которой произошло название кривой - *Computer and Business Equipment Manufacturers Association* (сегодня – это организация ITI, *Information Technology Industry*), которая объединяет производителей компьютерной и офисной техники. Кривая должна была служить подсказкой при конструировании сетевых блоков питания и первоначально представляла собой график устойчивости оборудования к величине и продолжительности нарушений в электрической сети. В более поздний период кривую использовали при проектировании оборудования, чувствительного к колебаниям напряжения, как эталонный диапазон, в котором оборудование должно правильно работать. В конце концов, кривая стала широко использоваться при анализе качества питания, касающихся неполадок в сети типа перенапряжения, провала и прерывания напряжения.

На графике по вертикальной оси напряжение указано в процентах от номинального значения, а на горизонтальной оси единицей измерения является время (по логарифмической шкале). Средняя

часть графика (между кривыми) представляет собой область правильной работы устройства. Область выше кривой указывает на состояние повышенного напряжения, которое может привести к повреждению или срабатыванию защиты от перенапряжения, а область под кривыми соответствует ситуации пониженного напряжения в сети, что может привести к выключению питания или временной нехватке энергии, вызывающей неправильную работу устройства.

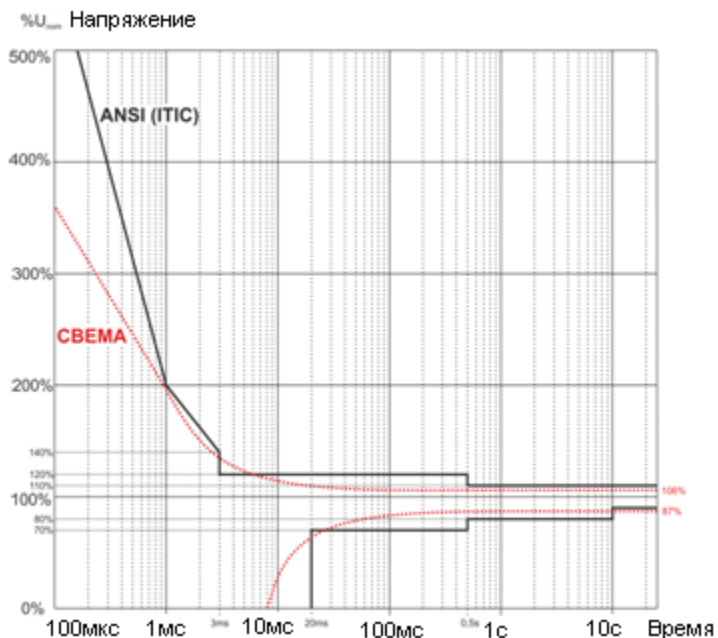


Рис.22 Линии допустимого диапазона напряжения питания ANSI (ITIC) и CBEMA.

Как показано на графике, существует взаимозависимость между значением напряжения и временем, на которое возникает нарушение. Например, увеличение напряжения до уровня 200 % $U_{ном}$ продолжительностью 1 мс в типичных случаях не приводит к аварии или неправильному функционированию (точка между кривыми), но нарушение с такой амплитудой, продолжающегося полпериода сети может иметь катастрофические последствия (точка выше обеих кривых). Принято считать, что в типичной ситуации, происходящие в электрической сети события, если речь идёт о величине сетевого напряжения, должны заключаться в средней части графика (между кривыми) и не должны тогда привести к сбоям в работе или повреждению подключенных устройств. Производители устройств (в частности, сетевых блоков питания) часто руководствуются этим графиком при проектировании для того, чтобы в этой области обеспечить их безаварийную работу и поддержание нужного выходного напряжения. Следует, однако, помнить, что кривая представляет типичные случаи и не может быть гарантией правильной работы каждого устройства, поскольку устойчивость к нарушениям различная.

Кривая ITIC является преемником кривой CBEMA, разработанной ИТI в 1994 году, а потом усовершенствованной до нынешнего вида в 2000 году. Эта кривая имеет вид двух ломаных линий и также известна под названием кривой ANSI после того, как была адаптирована американским институтом стандартизации ANSI (англ. *American National Standards Institute*). Обе кривые изображены на рисунке 22.

Программа «SONEL ANALYSIS» предоставляет возможность изменить характерные точки кривых и позволяет соответствовать индивидуальным требованиям пользователя.

9.8 Усреднение результатов измерений

Мониторинг сети в течение длительного периода времени означает сбор огромного количества данных. Для того, чтобы проведение последующего анализа этих данных вообще было возможно, необходимо введение механизма, который уменьшит размер данных до величины, приемлемой как для машины, так и человека.

Примером пусть послужит проверка сети на соответствие стандарту качества электроэнергии ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Основным периодом тестирования сети составляет неделю. Если запоминать все 200-миллисекундные действующие значения напряжения, получим 3,024 млн. измерений. Обработка такого количества данных может занять много времени и затруднительна.

Поэтому введено понятие усреднения, заключающееся в сохранении для целей анализа по одному значению на определённый интервал времени. Для стандарта ГОСТ 32144-2013 он составляет 10 минут. В этом случае анализатор вычисляет среднее 10-минутное значение по примерно 3000 значений 200-миллисекундных отсчетов (приблизительно, так как условное 200-миллисекундное значение, это на самом деле 10/12-периодное значение, синхронизированное с частотой сети). Каждые 10 минут записывается следующее среднее значение напряжения, что приводит к сбору 1008 результатов измерений.

На рисунке 23 показан способ определения анализатором средних значений за время усреднения большее или равное 10 секундам, на примере интервала усреднения 10 минут. Этот метод соответствует требованиям для класса S стандарта ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008).

Средние значения синхронизируются с часами реального времени следующим образом. Когда часы отмерят очередной общий кратный периоду интервал усреднения, происходят два процесса:

- Текущий 10/12-периодный отрезок отмечается как последний в интервале усреднения (x);
- Одновременно запускается первый 10/12-периодный отрезок следующего интервала усреднения ($x+1$).

Такой метод ресинхронизации приводит к появлению *Наложения 1*. Данные из этой области, обрабатываются дважды, потому что каждый из 10/12-периодных отрезков анализируется независимо. Цель такого способа ресинхронизации заключается в обеспечении одинаковых результатов измерений для двух анализатора класса А, подключённых к одной и той же цепи и синхронизированных с универсальным временем UTC. В анализаторе ресинхронизация интервалов по описанному выше способу выполняется для времени усреднения: 10 сек., 15 сек., 30 сек., 1 м., 3 м., 5 м., 10 м., 15 м., 30 м., 60 м., 120 м.

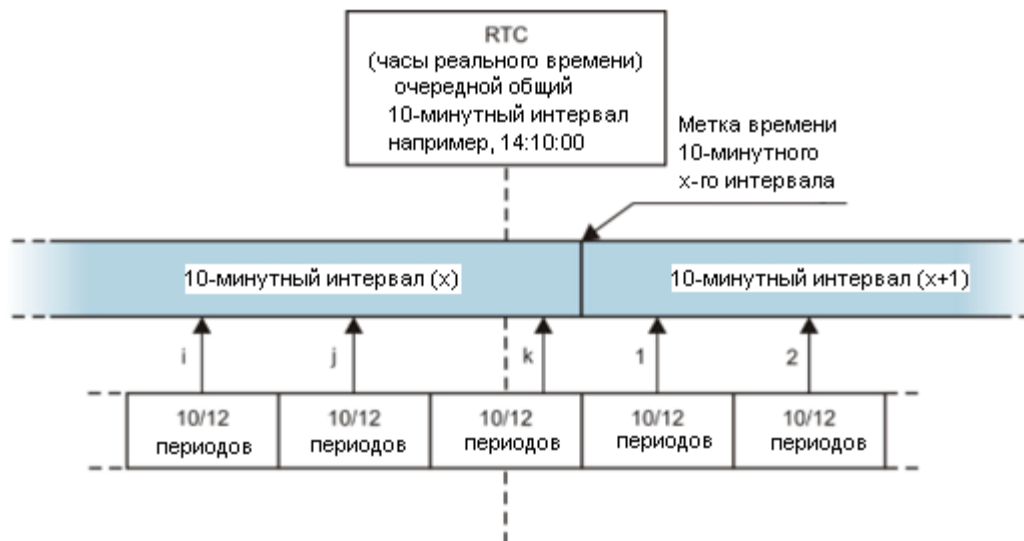
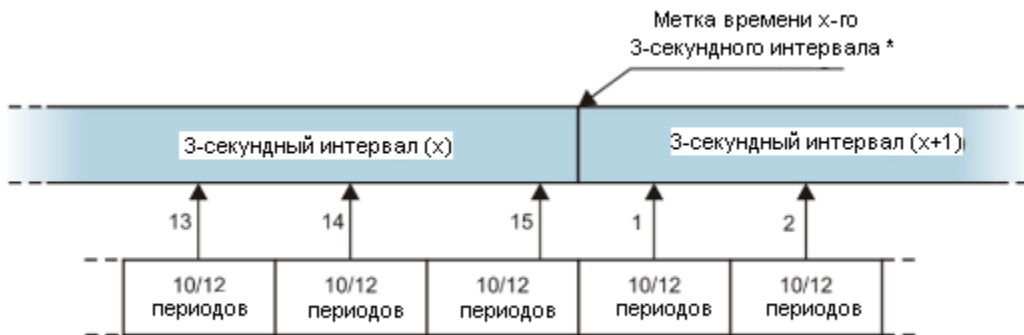


Рис.23 Определение интервалов усреднения равных (или больших) 10 секундам (на примере усреднения по 10 минут)



(*) в действительности - это интервал 150/180 периодов

Рис.24 Определение интервалов усреднения менее 10 секунд (на примере 3-секундного усреднения)

Несколько иначе выглядит усреднение при времени меньше 10 секунд. Несмотря на то, что все интервалы выражены единицами времени (200 мс, 1 сек., 3 сек., 5 сек.), на самом деле, они отмерены в кратностях периода сети. Например, выбор времени усреднения 3 секунды, означает усреднение по времени 150/180 периодов сети (15 измерений по 10/12 периодов).

Способ определения среднего значения для этих периодов иллюстрирует рисунок 24. Здесь также выполняется ресинхронизация интервалов 10/12-периодов, она выполняется всегда через каждые 10 минут по общему времени часов. Когда часы отмеряют очередное общее время, кратное периоду 10 минут, ресинхронизируется очередной интервал усреднения и начинается следующий интервал, причем интервал усреднения («x») завершается нормально, пока не наберется определенное множество отрезков 10/12-периодов (например, в случае 3-секундного усреднения всегда собирается 15 таких отрезков). Результатом ресинхронизации является появление *Наложения 2*, где параллельно обрабатываются данные двух интервалов усреднения (интервал «x» заканчивается, интервал «x+1» начинается). Размер наложения зависит от колебаний частоты сети.

Метка времени соответствует окончанию интервала усреднения.

Усреднение результатов измерений приводит к потере экстремальных значений (сглаживание результатов). В случаях, когда важна информация о предельных значениях измеряемого параметра, пользователь может применить возможность измерения минимального, максимального и мгновенного значений в периоде усреднения. Если данный параметр измерен во время 10/12 периодов, то максимальное и минимальное значение является соответственно наибольшим и наименьшим значением отрезка 10/12-периодов, измеренным в данном интервале усреднения. В свою очередь, мгновенное значение является последним значением 10/12-периодов в данный период усреднения.

В случае действующих значений токов и напряжений метод поиска минимального и максимального значений является более гибким и контролируется параметром **«Период определения мин./макс.»**. В распоряжении пользователя имеются следующие настройки: половина периода, 200 мс, 1 сек., 3 сек. и 5 сек. Выбор параметра - половина периода - задаёт поиск минимального и максимального значения с наивысшей чувствительностью, с точностью до величины $U_{RMS(1/2)}$. С ростом этого времени вводится дополнительное сглаживание, например, при 5 секундах сначала вычисляется средняя 5-секундная величина, которая затем используется для поиска минимального и максимального значения. Это даёт меньшую чувствительность к мгновенным изменениям измеряемого значения.

Примечание:

Как и в случае с периодами усреднения меньше 10 секунд, интервалы 200 мс, 1 сек., 3 сек. и 5 сек. в действительности выражены в кратностях периодов сети – соответственно 10/12, 50/60, 150/180 и 250/300 периодов сети.

Выбор правильного времени усреднения, не является простым делом. В значительной степени он обусловлен типом нарушений, присутствующих в сети и ожиданиями пользователя по окончательному анализу данных. Часто возникает ситуация, когда известен единственно сам факт появления некоторых неполадок в сети электропитания и только измерения анализатора помогут указать точную причину. В такой ситуации лучше использовать более короткое время усреднения (например, 10 секунд), и включить запись минимального и максимального значений (для напряжений и токов в такой ситуации рекомендуется выбрать периодом определения минимального и максимального значения самый короткий возможный срок, то есть, половину периода). Короткое время усреднения позволит построить точные графики изменений параметров во времени, а минимумы и максимумы будут обнаружены и сохранены. Как правило, регистрация с коротким временем усреднения выполняется довольно ограниченное время, прежде всего из-за быстрого роста числа данных; поскольку целью такой регистрации, является выявление возможных причин аномалии, а не долгосрочный анализ.

Регистрации с коротким временем усреднения может быть достаточно для оценки работы сети и происходящих в ней нарушениях. Тем не менее, подробную информацию, вероятно, можно будет получить в течение длительного времени (порядка минут), но с включенной регистрацией минимального и максимального значения и активным выявлением событий. Важным преимуществом такой ситуации является гораздо меньший объём данных регистрации, что означает быстрое считывание и анализ данных.

В свою очередь, исследование качества питания принято выполнять в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 32144-2013. В этом случае анализ проводится в течение более продолжительного времени (например, 7 дней), поэтому выбранное время усреднения также длительное – 10 минут.

Имейте в виду, что не существует одной наилучшей настройки, как времени усреднения, так и других параметров или порогов событий. Каждая сеть индивидуальна и задачи исследования сетей различные. В связи с этим оптимальная конфигурация анализатора может потребовать нескольких подходов, и также будет зависеть от опыта оператора.

10 ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Технические характеристики могут быть изменены изготовителем без дополнительного уведомления.

Указанные значения погрешностей применимы только к PQM-700 без дополнительных трансформаторов и токоизмерительных клещей.

Сокращения:

- и.в. – измеренная величина;
- е.м.р – единица младшего разряда;
- U_{nom} – номинальная величина напряжения;
- I_{nom} – диапазон номинального тока (клещей);
- RMS – действующее (среднеквадратичное) значение;
- n – ряд гармоники;
- з.с. – значащий символ – количество цифр результата измерения, отображаемого на дисплее, например, разрешение для напряжения 230 В и 4 е.р. будет равна 0,1 В (запись 230,0 В); разрешение для тока 5 А и 4 е.р. будет 0,001 А (запись 5,000 А);
- δ_{ph} – дополнительная погрешность измерения фазы между гармониками напряжения и тока.

10.1 Входы

Входы по напряжению	
Число входов	4 (L1, L2, L3, N – 3 измерительных канала)
Максимальное входное напряжение	760 В _{RMS} 40...70 Гц или напряжение пост. тока
Измерительная категория	CAT IV 300 В / CAT III 600 В / CAT II 760 В
Пиковое значение входного напряжения	±1150 В
Аналоговая полоса пропускания (– 3 дБ)	12 кГц
Трансформаторы	по решению пользователя
Сопротивление измерительных входов	14 МОм
Коэффициент ослабления синфазного сигнала (англ. CMRR)	>70 дБ (50 Гц)

Токовые входы	
Число входов	4 (3 фазы + нейтраль) гальванически не изолированные
Номинальное входное напряжение	1 В _{RMS}
Пиковое значение входного напряжения	±3,6 В
Номинальное входное напряжение (для гибких клещей, без нагрузки)	0,125 В _{RMS}
Пиковое значение входного напряжения (для гибких клещей, без нагрузки)	±0,45 В
Максимально допустимое входное напряжение отн. земли	5 В _{RMS}
Аналоговая полоса пропускания (– 3дБ)	12 кГц
Полное входное сопротивление	Канал жёстких клещей: 100 кОм Канал гибких клещей: 12,4 кОм
Диапазон измерения (без трансформаторов)	Клещи F-1/F-2A/F-3A: 1..3000 А (±10 кА пик. 50 Гц) Клещи F-2AHD/F-3AHD: 1..3000 А (±10 кА пик. 50 Гц) Клещи F-1A6/F-2A6/F-3A6: 1..6000 А (±20 кА пик. 50 Гц) Клещи F-1A1/F-2A1/F-3A1: 1..1500 А (±5 кА пик. 50 Гц) Клещи C-4, C-5: 1..1000 А (±3600 А пик.) Клещи C-6A: 0,01..10 А (±36 А пик.) Клещи C-7: 0..100 А (±360 А пик.)
Трансформаторы	по решению пользователя
Коэффициент ослабления синфазного сигнала (англ. CMRR)	60 дБ (50 Гц)

10.2 Дискретизация и часы реального времени RTC

Дискретизация и часы реального времени RTC	
АЦП (аналогово-цифровой преобразователь)	16-битный
Частота дискретизации	10,24 кГц для 50 и 60 Гц Одновременная дискретизация по всем каналам
Количество отсчётов за период	204,8 для 50 Гц; 170,67 для 60 Гц
Синхронизация ФАПЧ (PLL)	40...70 Гц
Опорный канал для системы ФАПЧ	L1
Часы реального времени	± 3,5 ppm макс. (около ± 9 секунд/месяц) в диапазоне температур -20...55 °С

10.3 Измеряемые параметры – точности, разрешения и диапазоны

10.3.1 Условия для поверки

Нормальные условия для поверки	
Температура окружающей среды	23°C ± 2°C
Относительная влажность	40...60 %

Асимметрия напряжения	$\leq 0,1$ % для коэффициента асимметрии по обратной последовательности (относится только к трёхфазным сетям)
Внешнее магнитное поле	≤ 40 А/м (постоянное) ≤ 3 А/м (переменное) для частоты 50/60 Гц
Постоянная составляющая напряжения и тока	нулевая
Форма сигнала	синусоидальный
Частота	50 Гц $\pm 0,2$ % или 60 Гц $\pm 0,2$ %

10.3.2 Напряжение

Напряжение	Диапазон и условия	Разрешение	Основная погрешность
U_{RMS} (переменное и постоянное)	$20\% U_{nom} \leq U_{RMS} \leq 120\% U_{nom}$ для $U_{nom} \geq 100$ В	4 з.с.	$\pm 0,5\% U_{nom}$
Пик-фактор	1...10 (1...1,65 для напряжения 690 В) для $U_{RMS} \geq 10\% U_{nom}$	0,01	$\pm 5\%$

10.3.3 Ток

Ток	Диапазон и условия	Разрешение	Основная погрешность
I_{RMS} (переменный и постоянный)	<i>Входной канал без клещей</i>		
	0...1 В ($\pm 3,6 V_{p-p}$) – канал жёстких клещей 0...125 мВ ($\pm 450 мВ_{p-p}$) – канал гибких клещей	4 з.с.	$\pm 0,2\% I_{nom}$
	<i>Клещи гибкие F-1/F-2A/F-3A</i>		
	0...3000 А (10 кА _{p-p})	4 з.с.	Дополнительная погрешность $\pm 1\%$ ($\pm 2\%$ с учетом дополнительной погрешности от положения)
	<i>Клещи гибкие F-2AHD/F-3AHD</i>		
	0...3000 А (10 кА _{p-p})	4 з.с.	Дополнительная погрешность $\pm 0,5\%$ ($\pm 2\%$ с учетом дополнительной погрешности от положения)
	<i>Клещи гибкие F-1A6/F-2A6/F-3A6</i>		
	0...6000 А (20 кА _{p-p})	4 з.с.	Дополнительная погрешность $\pm 1\%$ ($\pm 2\%$ с учетом дополнительной погрешности от положения)
	<i>Клещи гибкие F-1A1/F-2A1/F-3A1</i>		
	0...1500 А (5 кА _{p-p})	4 з.с.	Дополнительная погрешность $\pm 1\%$ ($\pm 2\%$ с учетом дополнительной погрешности от положения)
<i>Клещи жёсткие C-4</i>			
0...1000 А (3600 А _{p-p})	4 з.с.	Дополнительная погрешность 0,1...10 А: $\pm (3\% + 0,1 А)$	

			10 A: $\pm 3\%$ 50 A: $\pm 1,5\%$ 200 A: $\pm 0,75\%$ 1000...1200 A: $\pm 0,5\%$
	<i>Клещи жёсткие С-5</i>		
	0...1000 A (3600 A _{p-p})	4 з.с.	Дополнительная погрешность 0,5...100 A: $\leq (1,5\% + 1 \text{ A})$ 100...800 A: $\leq 2,5\%$ 800...1000 A перем.: $\leq 4\%$ 1000...1400 A пост.: $\leq 5\%$
	<i>Клещи жёсткие С-6А</i>		
	0...10 A (36 A _{p-p})	4 з.с.	Дополнительная погрешность 0,01...0,1 A: $\pm (3\% + 1 \text{ mA})$ 0,1...1 A: $\pm 2,5\%$ 1...12 A: $\pm 1\%$
	<i>Клещи жёсткие С-7</i>		
	0...100 A (360 A _{p-p})	4 з.с.	Дополнительная погрешность 0...100 A: $\pm (0,5\% + 0,02 \text{ A})$ (45...65 Гц) 0...100 A: $\pm (1,0\% + 0,04 \text{ A})$ (40...1000 Гц)
Пик-фактор	1...10 (1...3,6 для I _{ном}) для I _{RMS} $\geq 1\%$ I _{ном}	0,01	$\pm 5\%$

10.3.4 Частота

Частота	Диапазон и условия	Разрешение	Основная погрешность
f	40...70 Гц 10% U _{ном} \leq U _{RMS} \leq 120% U _{ном}	0,01 Гц	$\pm 0,05$ Гц

10.3.5 Гармоники

Гармоники	Диапазон и условия	Разрешение	Основная погрешность
Гармонический ряд (n)	Постоянный ток, 1...40, группирование: подгруппы гармоник по ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009).		
Амплитуда U _{RMS}	0...200% U _{ном}	4 з.с.	$\pm 0,15\%$ U _{ном} при и.в. $< 3\%$ U _{ном} $\pm 5\%$ и.в. при и.в. $\geq 3\%$ U _{ном} (согласно ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009))
Амплитуда I _{RMS}	В зависимости от использованных клещей (смотри характеристики I _{RMS})	4 з.с.	$\pm 0,5\%$ U _{ном} при и.в. $< 10\%$ I _{ном} $\pm 5\%$ и.в. если и.в. $\geq 10\%$ I _{ном} (согласно ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009))
Коэффициент гармонических искажений (THD _R) по	0...100,0% для U _{RMS} $\geq 1\%$ U _{ном}	0,1%	$\pm 5\%$

напряжению ($n = 2...40$)			
Коэффициент гармонических искажений (THD_R) по току ($n = 2...40$)	0...100,0% для $I_{RMS} \geq 1\% I_{nom}$	0,1%	$\pm 5\%$
TDD ($n=2...40$)	В зависимости от I_L	В зависимости от I_L	В зависимости от I_L
Угол сдвига фаз (напряжение)	-180°...+180°	0,1°	$\pm(n \times 1^\circ)$
Угол сдвига фаз (ток)	-180°...+180°	0,1°	$\pm(n \times 1^\circ)$

10.3.6 Мощность и энергия

Мощность и энергия	Условия (для мощности и энергии $80\% U_{nom} \leq U_{RMS} < 120\% U_{nom}$)	Разрешение	Основная погрешность ⁽¹⁾
Активная мощность Активная энергия	2% $I_{nom} \leq I_{RMS} < 5\% I_{nom}$ $\cos\varphi = 1$	4 з.с.	$\sqrt{2,5^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	5% $I_{nom} \leq I_{RMS} \leq I_{nom}$ $\cos\varphi = 1$		$\pm \sqrt{2,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	5% $I_{nom} \leq I_{RMS} < 10\% I_{nom}$ $\cos\varphi = 0,5$		$\pm \sqrt{2,5^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	10% $I_{nom} \leq I_{RMS} \leq I_{nom}$ $\cos\varphi = 0,5$		$\pm \sqrt{2,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
Реактивная мощность Реактивная энергия	2% $I_{nom} \leq I_{RMS} < 5\% I_{nom}$ $\sin\varphi = 1$	4 з.с.	$\pm \sqrt{4,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	5% $I_{nom} \leq I_{RMS} < I_{nom}$ $\sin\varphi = 1$		$\pm \sqrt{3,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	5% $I_{nom} \leq I_{RMS} < 10\% I_{nom}$ $\sin\varphi = 0,5$		$\pm \sqrt{4,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	10% $I_{nom} \leq I_{RMS} < I_{nom}$ $\sin\varphi = 0,5$		$\pm \sqrt{3,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	10% $I_{nom} \leq I_{RMS} < I_{nom}$ $\sin\varphi = 0,25$		$\pm \sqrt{4,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
Полная мощность Полная энергия	2% $I_{nom} \leq I_{RMS} < 5\% I_{nom}$	4 з.с.	$\pm 2,5\%$
	5% $I_{nom} \leq I_{RMS} \leq I_{nom}$		$\pm 2,0\%$
Коэффициент мощности (PF)	0...1 50% $U_{nom} \leq U_{RMS} < 150\% U_{nom}$ 10% $I_{nom} \leq I_{RMS} < I_{nom}$	0,01	$\pm 0,03$
Коэффициент сдвига фаз ($\cos\phi/DPF$)	0...1 50% $U_{nom} \leq U_{RMS} < 150\% U_{nom}$ 10% $I_{nom} \leq I_{RMS} < I_{nom}$	0,01	$\pm 0,03$

10.3.6.1 Оценка погрешности измерения мощности и энергии

Общая погрешность измерения активной и реактивной мощности (основной составляющей) и мощности гармоник, основывается на следующей зависимости (для энергии игнорируется

дополнительная погрешность, связанная с измерением времени, как много меньшая, чем остальные погрешности):

$$\delta_{P,Q} \cong \sqrt{\delta_{U_h}^2 + \delta_{I_h}^2 + \delta_{ph}^2}$$

где: $\delta_{P,Q}$ – погрешность измерения активной или реактивной мощности,

δ_{U_h} – суммарная погрешность измерения амплитуды гармоники напряжения (анализатор, трансформаторы, клещи),

δ_{I_h} – суммарная погрешность измерения амплитуды гармоники тока (анализатор, трансформаторы, клещи),

δ_{ph} – дополнительная погрешность в результате ошибки измерения фазы между высшими гармониками напряжения и тока.

Погрешность δ_{ph} можно определить, если известен угол фазового сдвига для интересующего нас диапазона частот. В таблице приведена ошибка разности фаз между гармониками напряжения и тока для анализатора PQM-700 (без токовых клещей и трансформаторов).

Ошибка фазы анализатора PQM-700 в зависимости от частоты.

Диапазон частот	0...200 Гц	200...500 Гц	500 Гц...1 кГц	1...2 кГц	2...3 кГц
Ошибка	$\leq 1^\circ$	$\leq 2,5^\circ$	$\leq 5^\circ$	$\leq 10^\circ$	$\leq 15^\circ$

Ошибку фазы, вносимую при использовании трансформаторов и клещей, как правило, можно найти их в технической документации. В этом случае, следует оценить для интересующей нас частоты результирующую ошибку фазы между напряжением и током, вводимую всеми элементами измерительной цепи: трансформаторы тока и напряжения, клещи, а также анализатор.

Погрешность измерения, вследствие ошибки фазы для активной мощности гармоник можно выразить на основании формулы:

$$\delta_{ph} = 100 \left(1 - \frac{\cos(\varphi + \Delta\varphi)}{\cos\varphi} \right) [\%], \cos\varphi \neq 0$$

В свою очередь, погрешность измерения реактивной мощности гармоник можно определить по формуле:

$$\delta_{ph} = 100 \left(1 - \frac{\sin(\varphi - \Delta\varphi)}{\sin\varphi} \right) [\%], \sin\varphi \neq 0$$

В обеих этих формулах φ означает фактический угол сдвига между гармониками тока и напряжения, а $\Delta\varphi$ суммарную ошибку фазы для данной частоты. Из представленных зависимостей можно сделать вывод, что погрешность измерения мощности для такой же ошибки фазы, очень сильно зависит от коэффициента фазового сдвига между током и напряжением. Это показано на рисунке 25.

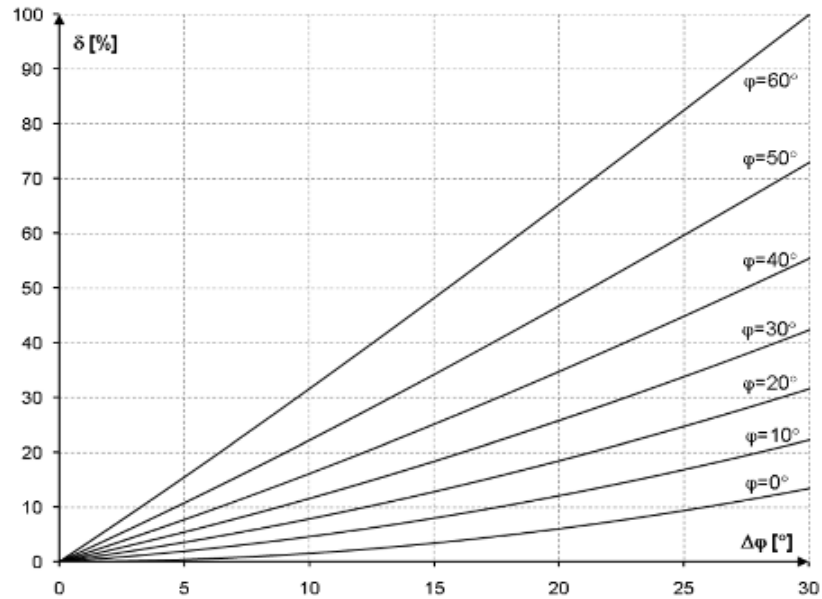


Рис.25 Дополнительная погрешность от ошибки фазы в зависимости от угла сдвига фаз

Пример:

Расчет погрешности измерения активной мощности основной составляющей.

Условия: $\varphi = 60^\circ$, $U_{RMS} \cong U_{nom}$, $I_{RMS} = 5\% I_{nom}$.

Основная погрешность составляет: $\pm \sqrt{1,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$.

В диапазоне частот 0..200 Гц ошибка фазы PQM-700 составляет менее 1° . После подстановки в формулу:

$$\delta_{ph} = 100 \left(1 - \frac{\cos(\varphi + \Delta\varphi)}{\cos\varphi} \right) = 100 \left(1 - \frac{\cos(61^\circ)}{\cos(60^\circ)} \right) = 3,04\%$$

Таким образом, погрешность измерения равна:

$$\delta = \pm \sqrt{1,0^2 + 3,04^2} = \pm 3,20\%$$

В тех же самых условиях, но при сдвиге фазы $\varphi = 10^\circ$, получим:

$$\delta_{ph} = 100 \left(1 - \frac{\cos(11^\circ)}{\cos(10^\circ)} \right) = 0,32\%$$

А погрешность измерения равна:

$$\delta = \pm \sqrt{1,0^2 + 0,32^2} = \pm 1,05\%$$

Приведенные выше расчеты не учитывают дополнительные ошибки, вносимые при использовании токовых клещей и трансформаторов.

10.3.7 Фликер

Фликер	Диапазон и условия	Разрешение	Основная погрешность
P_{st} (10 мин.) P_{lt} (2 часа)	0,4...10 для $U_{RMS} \geq 80\% U_{nom}$	0,01	$\pm 10\%$ в пределах табличных значений стандарта ГОСТ Р 51317.4.15-2012 (МЭК 61000-4-15:2010)

10.3.8 Асимметрия

Асимметрия (напряжение и ток)	Диапазон и условия	Разрешение	Основная погрешность
Коэффициент асимметрии прямой, обратной и нулевой последовательности	0...10,0% для $80\% U_{ном} \leq U_{RMS} < 150\% U_{ном}$	0,1%	$\pm 0,3\%$ (абсолютная погрешность)

10.4 Регистрация событий – действующие значения напряжения и тока

Напряжение U_{RMS} (провалы, прерывания и перенапряжения)	Диапазон	Разрешение	Основная погрешность
$U_{RMS(1/2)}$	0...120,0% $U_{ном}$	4 з.с.	$\pm 1\% U_{ном}$
Пороги обнаружения	Устанавливаются пользователем в процентах либо в абсолютных значениях. Обнаружение события основано на измерении $U_{RMS(1/2)}$ (действующее значение за 1 период, обновляемое каждые $\frac{1}{2}$ периода).		
Продолжительность	часы: минуты: секунды: миллисекунды	$\frac{1}{2}$ периода	один период
Запись осциллограммы	2 периода перед событием + 4 периода после события (всего 6 периодов) 256 отсчётов за период		

Ток I_{RMS} (минимум, максимум)	Диапазон	Разрешение	Основная погрешность
$I_{RMS(1/2)}$	0%...100,0% $I_{ном}$	4 з.с.	$\pm 0,5\% I_{ном}$
Пороги обнаружения	Устанавливаются пользователем в процентах либо в абсолютных значениях. Выявление события основано на измерении $I_{RMS(1/2)}$ (действующее значение за 1 период, обновляемое каждые $\frac{1}{2}$ периода).		
Продолжительность	часы: минуты: секунды: миллисекунды	$\frac{1}{2}$ периода	один период
Запись осциллограммы	2 периода перед событием + 4 периода после события (всего 6 периодов) 204,8/170,67 (50/60 Гц) отсчётов за период		

10.5 Регистрация событий – дополнительные параметры

Параметр	Диапазон	Методика определения
Частота (мин., макс.)	40...70 Гц (в процентах или абсолютных величинах)	Обнаружение события основано на 10 сек. измерении, согласно ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008)
Пик-фактор напряжения (мин., макс.)	1,0...10,0	На основе значения 10/12-периодов
Пик-фактор тока (мин., макс.)	1,0...10,0	На основе значения 10/12-периодов
Коэффициент несимметрии по обратной последовательности напряжения (макс.)	0...20,0%	На основе значения 10/12-периодов
Коэффициент несимметрии по обратной последовательности тока	0...20,0%	На основе значения 10/12-периодов

(макс.)		
Кратковременная доза фликера P_{st} (макс.)	0...20	На основе 10-минутного значения
Длительная доза фликера P_{lt} (макс)	0...20	На основе 2-часового значения
Активная мощность P (мин., макс.)	В зависимости от настройки	На основе значения 10/12-периодов (для потребляемой и отдаваемой)
Реактивная мощность Q (мин., макс.)	В зависимости от настройки	На основе значения 10/12-периодов (для потребляемой и отдаваемой)
Полная мощность S (мин., макс.)	В зависимости от настройки	На основе значения 10/12-периодов
Мощность искажения D / Полная мощность искажения S_N (мин., макс.)	В зависимости от настройки	На основе значения 10/12-периодов
Коэффициент мощности PF (мин, макс)	0...1	На основе значения 10/12-периодов
Коэффициент сдвига фаз $\cos\varphi/DPF$ (мин., макс.)	0...1	На основе значения 10/12-периодов
$tg\varphi$ (мин., макс.)	0...10	На основе значения 10/12-периодов
Активная энергия E_P (макс.)	В зависимости от настройки	Проверка превышения каждые 10/12-периодов (для потребляемой и отдаваемой)
Реактивная энергия E_Q (макс.)	В зависимости от настройки	Проверка превышения каждые 10/12-периодов (для потребляемой и отдаваемой)
Полная энергия E_S (макс.)	В зависимости от настройки	Проверка превышения каждые 10/12-периодов
Коэффициент гармонических искажений THD_F напряжения (макс)	0...100%	На основе значения 10/12-периодов
Коэффициент гармонических искажений THD_F тока (макс.)	0...200%	На основе значения 10/12-периодов
Амплитуды гармоник напряжения (макс.)	0...100%, или абсолютные значения	На основе значения 10/12-периодов; Независимые пороги для всех гармоник в диапазоне 2...40
Амплитуды гармоник тока (макс.)	0...200%, или абсолютные значения	На основе значения 10/12-периодов; Независимые пороги для всех гармоник в диапазоне 2...40

10.6 Гистерезис регистрации событий

Гистерезис регистрации события	Диапазон	Методика определения
Гистерезис	0...10% с шагом 0,1%	Для каждого из параметров рассчитывается как процент от максимального значения порога.

10.7 Измерение пускового тока

Диапазон [А, %]	Разрешение [А, %]	Основная погрешность
0...100% I _n	4 з.с.	±0,5% I _n

- Измерение напряжения и тока каждые ½ периода во всех каналах (усреднение каждые ½ периода);
- Максимальное время измерения 60 сек.

10.8 Регистрация

Регистратор	
Время усреднения ⁽¹⁾	1 сек., 3 сек., 10 сек., 30 сек., 1 мин., 10 мин., 15 мин., 30 мин. Специальный режим: ½ периода (для регистрации сигналов с ограниченным временем записи до 60сек., например, пусковой ток) ²
Усреднение мин/макс для U _{RMS}	½ периода, период, 200 мс, 1 сек., 3 сек., 5 сек. ⁽³⁾
Усреднение мин/макс для I _{RMS}	½ периода, период, 200 мс, 1 сек., 3 сек., 5 сек. ⁽³⁾
Запись осциллограмм	Возможность записи 3-х периодов осциллограмм активных каналов после каждого периода усреднения
Режимы запуска регистрации	Ручной После первого обнаруженного события По расписанию (четыре заданных интервала времени)
Точки измерения	1, независимая конфигурация пользователя.
Время регистрации	Зависит от конфигурации
Память	Встроенная карта памяти 4 ГБ
Модель памяти	Линейная
Безопасность	Блокировка клавиатуры от несанкционированного доступа

- (1) Время усреднения меньше 10 сек. в действительности равно кратному от основной частоты сети: 1 сек. – 50/60 периодов, 3 сек. – 150/180 периодов.
- (2) U_{RMS(1/2)} и I_{RMS(1/2)} являются действующими значениями за 1 период с обновлением каждые ½ периода
- (3) Периоды усреднения мин./макс. 1 сек., 3 сек. в действительности равны кратному от основной частоты сети: 1 сек. – 50/60 периодов, 3 сек. – 150/180 периодов.

Регистрируемые параметры	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Мгновенное значение
Действующее значение фазного/линейного напряжения U _{RMS} (в зависимости от типа схемы)	•	•	•	•
Действующее значение линейного напряжения (только в 3-фазной схеме «звезда» с N и 2-х фазной) U _{RMS}	•			
Действующее значение тока I _{RMS}	•	•	•	•
Частота f	•	•	•	•
Пик-фактор напряжения CF U	•	•	•	•
Пик-фактор тока CF I	•	•	•	•

Коэффициенты асимметрии по обратной и прямой последовательности, симметричные составляющие: прямой, обратной и нулевой последовательности (напряжение) U_0, U_1, U_2, u_0, u_2	•	•	•	•
Коэффициенты асимметрии по обратной и прямой последовательности, симметричные составляющие: прямой, обратной и нулевой последовательности (ток) I_0, I_1, I_2, i_0, i_2	•	•	•	•
Дозы фликера P_{st} и P_{It}	•	•	•	•
Активная мощность (потребляемая и отдаваемая) P_+, P_-	•	•	•	•
Реактивная мощность (потребляемая и отдаваемая) $Q_{1+}, Q_{1-} / Q_{B+}, Q_{B-}$	•	•	•	•
Полная мощность S	•	•	•	•
Мощность искажения D . Полная мощность искажения S_N	•	•	•	•
Коэффициент мощности PF	•	•	•	•
Коэффициент сдвига фаз $\cos\varphi/DPF$	•	•	•	•
Тангенс ϕ (4 квадрантный): $tg\varphi(L+), tg\varphi(C-), tg\varphi(L-), tg\varphi(C+)$	•	•	•	•
Активная энергия (потребляемая и отдаваемая) E_{P+}, E_{P-}				•
Реактивная энергия (4 квадрантная): $E_{Q(L+)}, E_{Q(C-)}, E_{Q(L-)}, E_{Q(C+)}$				•
Полная энергия E_S				•
Коэффициент гармонических искажений THD_F напряжения	•	•	•	•
Коэффициент гармонических искажений THD_F тока	•	•	•	•
Коэффициент искажения тока TDD	•			
Амплитуды гармоник напряжения $U_{h1} \dots U_{h40}$	•	•	•	•
Амплитуды гармоник тока $I_{h1} \dots I_{h40}$	•	•	•	•

10.9 Питание, аккумулятор и нагреватель

Питание от сети	
Диапазон входных напряжений (номинальный)	100...415 В переменное, 40...70 Гц 140...415 В постоянное
Диапазон входных напряжений (с флуктуациями)	90...460 В переменное, 40...70 Гц 127...460 В постоянное

Категория питания по перенапряжению (с флуктуациями)	Высота до 4000 м: CAT IV 300 В / CAT III 415 В / CAT II 460 В Высота до 5000 м: CAT III 300 В / CAT II 415 В / CAT II 460 В	
Потребление мощности от сети (максимальное)	30 ВА	
Потребление мощности от сети в зависимости от конфигурации (типичное)	нет зарядки аккумулятора, нагреватель выключен, переменное напряжение питания 230 В	6 ВА / 3 Вт
	нет зарядки аккумулятора, нагреватель включен, переменное напряжение питания 230 В	11 ВА / 8 Вт
	зарядка аккумулятора, нагреватель выключен, переменное напряжение питания 230 В	14 ВА / 11 Вт
	зарядка аккумулятора, нагреватель включен, переменное напряжение питания 230 В	22 ВА / 16 Вт
	зарядка аккумулятора, нагреватель включен, переменное напряжение питания 400 В	27 ВА / 16 Вт

Аккумулятор	
Тип	Li-Ion 4,4 Ач
Время работы от аккумуляторного питания	> 6 ч
Время зарядки аккумулятора (полностью разряженного)	до 8 ч
Допустимый диапазон температуры зарядки	-10...60°C
Потребление тока от аккумулятора в режиме выключенного анализатора (отсутствует питание от сети; не касается режима против кражи)	< 1 мА

Нагреватель	
Порог температуры включения нагревателя	5 °С
Питание нагревателя	Встроенный источник питания переменного тока
Мощность нагревателя	Максимальная 5 Вт

10.10 Поддерживаемые сети

Типы поддерживаемых сетей (косвенно или напрямую)	
1-фазная	Однофазная, с нейтральным проводом (разъёмы L1, N)
2-фазная (с расщеплённой фазой)	Двухфазная, с нейтральным проводом (разъёмы L1, L2, N)
3-фазная «звезда» с нейтралью	Трёхфазная, типа «звезда» с нейтралью (разъёмы L1, L2, L3, N)
3-фазная «треугольник»	Трёхфазная типа «треугольник» (разъёмы L1, L2, N)
3-фазная «треугольник», схема	Трёхфазная, типа «треугольник» (разъёмы L1, L2, N), с двумя

Арона	токовыми клещами
3-фазная «звезда» с изолированной нейтралью	Трёхфазная, типа «звезда» с изолированной нейтралью (разъёмы L1, L2, N)
3-фазная «звезда» с изолированной нейтралью, схема Арона	Трёхфазная, типа «звезда» с изолированной нейтралью (разъёмы L1, L2, N), с двумя токовыми клещами

10.11 Поддерживаемые токовые клещи

Типы поддерживаемых токовых клещей	
F-1	Клещи гибкие (пояс Роговского), максимальный диаметр – 380 мм, диапазон измерения 3000 A_{RMS}
F-2A	Клещи гибкие (пояс Роговского), максимальный диаметр – 250 мм, диапазон измерения 3000 A_{RMS}
F-3A	Клещи гибкие (пояс Роговского), максимальный диаметр – 140 мм, диапазон измерения 3000 A_{RMS}
F-2AHD	Клещи гибкие (пояс Роговского), максимальный диаметр – 290 мм, диапазон измерения 3000 A_{RMS}
F-3AHD	Клещи гибкие (пояс Роговского), максимальный диаметр – 145 мм, диапазон измерения 3000 A_{RMS}
F-1A6	Клещи гибкие (пояс Роговского), максимальный диаметр – 380 мм, диапазон измерения 6000 A_{RMS}
F-2A6	Клещи гибкие (пояс Роговского), максимальный диаметр – 250 мм, диапазон измерения 6000 A_{RMS}
F-3A6	Клещи гибкие (пояс Роговского), максимальный диаметр – 140 мм, диапазон измерения 6000 A_{RMS}
F-1A1	Клещи гибкие (пояс Роговского), максимальный диаметр – 380 мм, диапазон измерения 1500 A_{RMS}
F-2A1	Клещи гибкие (пояс Роговского), максимальный диаметр – 250 мм, диапазон измерения 1500 A_{RMS}
F-3A1	Клещи гибкие (пояс Роговского), максимальный диаметр – 140 мм, диапазон измерения 1500 A_{RMS}
C-4	Клещи типа СТ, переменного тока, диапазон измерения 1000 A_{RMS} , 1 мВ/А
C-5	Клещи типа СТ с датчиком Холла, переменного/постоянного тока, диапазон измерения 1000 A_{RMS} , 1 мВ/А
C-6A	Клещи типа СТ, переменного тока, для малых токов, диапазон измерения 10 A_{RMS} , 1 мВ/10мА
C-7	Клещи типа СТ, переменного тока, диапазон измерения 100 A_{RMS} , 5 мВ/А

Примечание:

Клещи с буквой «А» в конце обозначения (например, F-3A) – это вариант клещей с автоматическим распознаванием их типа в совместимых устройствах. Остальные параметры идентичны клещам без поддержки функции распознавания. Распознавание типа клещей доступно в анализаторе PQM-700 с версиями прошивки HWS и более новыми, а также с программой версии 1.30 или более поздними.

10.11.1 Клещи С-4

Токовые клещи С-4 предназначены для измерения переменного тока в электрических установках малой и средней мощности. Выходным сигналом является напряжение, пропорциональное силе измеряемого тока. Выходной сигнал передаётся по 2,2-метровому кабелю, заканчивающийся соответствующим разъёмом.

Стрелка, размещённая на одной из сторон, указывает направление электрического тока. Принято считать, что ток течёт в положительном направлении, если он движется от источника к приёмнику. Такая ориентация клещей требуется для правильного измерения мощности.



Рис. 26 Токовые клещи С-4

! Нельзя измерять токи выше 1200 А. Следует ограничить время измерения тока до 1000 А, согласно следующим данным:

Диапазон тока	$I \leq 1000 \text{ A}$	$1000 \text{ A} < I \leq 1200 \text{ A}$
Режим работы	непрерывный ¹⁾	15 минут измерения, следующие 30 минут перерыв.

¹⁾ Для частоты $f \leq 1 \text{ кГц}$. Ограничения максимального значения тока при непрерывной работе для частоты выше 1 кГц в соответствии с зависимостью $I_{\text{макс}} = 1000 \text{ A}/f [\text{кГц}]$.

! Нельзя использовать клещи на неизолированных проводниках с потенциалом большим 600 В по отношению к земле и в установках измерительной категории выше III.

Нормальные условия для поверки	
Температура	20...26 °С
Относительная влажность	20...75 %
Позиция провода	провод в центре, относительно зажимов клещей
Частота синусоидального тока	48...65 Гц
Коэффициент гармонических искажений	< 1%
Постоянная составляющая тока	нулевая
Постоянное магнитное поле	$\leq 40 \text{ A/м}$ (магнитное поле Земли)
Переменное внешнее магнитное поле	нулевое
Провода в непосредственной близости	отсутствие протекающего по ним тока

Диапазон тока	Основная погрешность ⁽¹⁾	Ошибка фазы
0,1...10 А	< 2% + 0,1 А	не определена
10...50 А	< 3%	≤ 3°
50...200 А	< 1,5%	≤ 1,5°
200...1000 А	< 0,75%	≤ 0,75°
1000...1200 А	< 0,5%	≤ 0,5°

⁽¹⁾ в % от измеряемой величины

Технические параметры	
Выходной сигнал для максимального тока	1 В переменного тока
Соотношение	1 мВ / 1 А для переменного тока
Частотный диапазон	30 Гц...10 кГц
Тип изоляции	двойная, в соответствии с ГОСТ ИЕС 61010-2-032-2014
Измерительная категория по ГОСТ ИЕС 61010-2-032-2014	III 600 В
Степень защиты, согласно ГОСТ 14254-2015 (ИЕС 60529:2013)	IP40, с открытыми губками IP30
Размеры	216 x 111 x 45 мм
Масса	около 640 г
Раскрытие зажимов	53 мм
Охват открытых зажимов	139 мм
Максимальный диаметр измеряемого провода	∅ 52 мм
Длина кабеля клещей	1,5 м
Диапазон рабочих температур	-10...55 °С
Влажность	< 85 %
Высота над уровнем моря	< 2000 м
Электромагнитная совместимость	ГОСТ 30804.6.3-2013 (ИЕС 61000-6-3:2006) ГОСТ 30804.6.2-2013 (ИЕС 61000-6-2:2005)

10.11.2 Клещи С-6А

Клещи С-6А предназначены для измерения переменного тока частотой до 10 кГц в диапазоне 10 мА...10 А.

Выходным сигналом является напряжение, пропорциональное силе измеряемого тока с чувствительностью 100 мВ/А. Оно передаётся по 2,2-метровому кабелю, заканчивающийся соответствующим разъёмом.

Стрелка, размещённая на одной из сторон, указывает направление электрического тока. Принято считать, что ток течёт в положительном направлении, если он движется от источника к приёмнику. Такая ориентация клещей требуется для правильного измерения мощности.



Рис.27 Токовые клещи С-6А



Нельзя использовать клещи на неизолированных проводниках с потенциалом большим 600 В по отношению к земле и в установках измерительной категории выше III.

Нормальные условия для поверки	
Температура	20...26 °С
Относительная влажность	20...75 %
Позиция провода	провод в центре, относительно зажимов клещей
Частота синусоидального тока	48...65 Гц
Коэффициент гармонических искажений	<1 %
Постоянная составляющая тока	нулевая
Постоянное магнитное поле	≤ 40 А/м (магнитное поле Земли)
Переменное внешнее магнитное поле	нулевое
Провода в непосредственной близости	отсутствие протекающего по ним тока

Диапазон тока	Основная погрешность ⁽¹⁾	Ошибка фазы
0,01...0,1 А	< 3% + 1 мА	не определена
0,1...1 А	< 2,5%	≤ 5°
1...12 А	< 1%	≤ 3°

⁽¹⁾ в % от измеряемой величины

Технические параметры	
Соотношение	100 мВ / 1 А для переменного тока
Частотный диапазон	40 Гц...10 кГц
Тип изоляции	двойная, в соответствии с ГОСТ IEC 61010-2-032-2014
Измерительная категория по ГОСТ IEC 61010-2-032-2014	III 600 В
Степень защиты, согласно ГОСТ 14254-2015 (IEC 60529:2013)	IP40, с открытыми губками IP30
Размеры	135 x 50 x 30 мм
Масса	около 240 г
Раскрытие зажимов	21 мм
Охват открытых зажимов	69 мм
Максимальный диаметр измеряемого провода	∅ 20 мм
Длина кабеля клещей	1,5 м
Диапазон рабочих температур	-10...55 °С
Влажность	< 85 %

Высота над уровнем моря	< 2000 м
Электромагнитная совместимость	ГОСТ 30804.6.3-2013 (IEC 61000-6-3:2006) ГОСТ 30804.6.2-2013 (IEC 61000-6-2:2005)

10.11.3 Клещи С-7

Клещи С-7 предназначены для измерения переменного тока в сетях низкого и среднего напряжения в диапазоне до 100 А.

Выходным сигналом является напряжение, пропорциональное силе измеряемого тока с чувствительностью 5 мВ/А. Оно передаётся по 3-метровому кабелю, заканчивающийся соответствующим разъёмом.

Стрелка, размещённая на одной из сторон, указывает направление электрического тока. Принято считать, что ток течёт в положительном направлении, если он движется от источника к приёмнику. Такая ориентация клещей требуется для правильного измерения мощности.



Рис.28 Токовые клещи С-7



Нельзя использовать клещи на неизолированных проводниках с потенциалом большим 300 В по отношению к земле и в установках измерительной категории выше III.

Нормальные условия для поверки	
Температура	18...28 °С
Относительная влажность	<85 % (без конденсации влаги)

Частота	Основная погрешность	Ошибка фазы
45...65 Гц	$\pm 0,5\% \pm 0,1 \text{ мВ}$	$\leq 2^\circ$
40 Гц...1 кГц	$\pm 1,0\% \pm 0,2 \text{ мВ}$	не определена

Технические параметры	
Соотношение	5 мВ / 1 А для переменного тока
Полное выходное сопротивление	11 Ом
Тип изоляции	двойная, в соответствии с ГОСТ IEC 61010-2-032-2014

Измерительная категория по ГОСТ IEC 61010-2-032-2014	III 300 В
Размеры	100 x 60 x 26 мм
Масса	около 160 г
Максимальный диаметр измеряемого провода	Ø 24 мм
Длина кабеля клещей	1,5 м
Диапазон рабочих температур	0...50 °С
Относительная влажность	< 85% (без конденсации влаги)
Электромагнитная совместимость	ГОСТ Р МЭК 61326-1-2014

10.11.4 Клещи F-1, F-2A, F-3A

Гибкие клещи (катушка Роговского) F-1, F-2A и F-3A предназначены для измерения переменного тока с частотой до 10 кГц в диапазоне 1...3000 А. Токочные гибкие клещи F-1, F-2A и F-3A отличаются между собой только максимальным диаметром обхвата. Электрические параметры идентичны.

Выходным сигналом является напряжение, пропорциональное производной измеряемого тока при чувствительности 38,83 мВ/1000 А для 50 Гц и 46,6 мВ/1000 А для 60 Гц.



Клещи F-1



Клещи F-2A



Клещи F-3A

Выходной сигнал передаётся по 2,5-х метровому кабелю, заканчивающийся соответствующим разъёмом для подходящего гнезда в приборе.

Стрелка, помещённая на застёжке клещей, указывает направление электрического тока. Принято считать, что ток течёт в положительном направлении, если он движется от источника к приёмнику. Такая ориентация клещей требуется для правильного измерения мощности.



Нельзя использовать клещи на неизолированных проводниках с потенциалом большим 1000 В по отношению к земле и в установках измерительной категории выше III.

Нормальные условия для поверки	
Температура	18...22 °С
Позиция провода	провод в центре относительно петли клещей
Постоянное магнитное поле	≤ 40 А/м (магнитное поле Земли)
Переменное внешнее магнитное поле	Отсутствует
Внешнее электрическое поле	Отсутствует

Технические характеристики	
Номинальный диапазон измерения	1...3000 А (10000 А пиковое для 50 Гц)
Коэффициент вход/выход	38,83 мВ/1000 А (50 Гц), 46,6 мВ/1000 А (60 Гц)

Основная погрешность	±1% в диапазоне 1...3000 А
Класс защиты	Двойная изоляция, в соответствии с ГОСТ IEC 61010-2-032-2014
Измерительная категория по ГОСТ IEC 61010-2-032-2014	III 1000 В
Степень защиты, согласно ГОСТ 14254-2015 (IEC 60529:2013)	IP67
Диаметр катушки	8,4 мм
Диаметр застежки (максимальный)	36 мм
Длина окружности F-1	120 см
Длина окружности F-2А	80 см
Длина окружности F-3А	45 см
Внутренний диаметр F-1	380 мм
Внутренний диаметр F-2А	250 мм
Внутренний диаметр F-3А	140 мм
Масса F-1	около 200 г
Масса F-2А	около 170 г
Масса F-3А	около 140 г
Длина кабеля гибких клещей	2,5 м
Диапазон рабочих температур	-30...80 °С
Электромагнитная совместимость	ГОСТ 30804.6.3-2013 (IEC 61000-6-3:2006) ГОСТ 30804.6.2-2013 (IEC 61000-6-2:2005)

10.11.5 Клещи F-2АНД, F-3АНД

Гибкие клещи F-2АНД и F-3АНД предназначены для измерения переменного тока с частотой до 20 кГц в диапазоне 1...3000 А и в сравнении с гибкими клещами F-2А и F-3А отличаются повышенной устойчивостью к механическим повреждениям.

Технические характеристики	
Основная погрешность	±0,5% в диапазоне 1...3000 А
Степень защиты, согласно ГОСТ 14254-2015 (IEC 60529:2013)	IP65
Диаметр катушки	9,9 мм
Диаметр застежки (максимальный)	23 мм
Длина окружности F-2АНД	91,5 см
Длина окружности F-3АНД	45 см
Внутренний диаметр F-2АНД	290 мм
Внутренний диаметр F-3АНД	145 мм
Масса F-2АНД	около 220 г
Масса F-3АНД	около 165 г

Остальные параметры такие же, как у клещей F-1 / F-2А / F-3А.

10.11.6 Клещи F-1А6, F-2А6, F-3А6

Гибкие клещи F-1А6, F-2А6 и F-3А6 имеют меньшую чувствительность по сравнению с F-1 / F-2А / F-3А, что позволяет измерять ток до 6000 А (пиковая 20 кА для 50 Гц).

Выходным сигналом является напряжение, пропорциональное производной измеряемого тока при чувствительности 19,415 мВ/1000 А для 50 Гц и 23,3 мВ/1000 А для 60 Гц.

Остальные параметры такие же, как у клещей F-1 / F-2A / F-3A.

10.11.7 Клещи F-1A1, F-2A1, F-3A1

Гибкие клещи F-1A1, F-2A1 и F-3A1 имеют большую чувствительность по сравнению с F-1 / F-2A / F-3A, что позволяет измерять ток до 1500 А (пиковая 5 кА для 50 Гц).

Выходным сигналом является напряжение, пропорциональное производной измеряемого тока при чувствительности 77,66 мВ/1000 А для 50 Гц и 93,19 мВ/1000 А для 60 Гц.

Остальные параметры такие же, как у клещей F-1 / F-2A / F-3A.

10.12 Интерфейс

Тип соединения	
USB	Оптически изолированный, максимальная скорость передачи: 921,6 кбит/с. Совместимость с USB2.0.

10.13 Условия окружающей среды и другие технические данные

Дополнительные характеристики	
Диапазон рабочих температур	-20...55 °С
Диапазон температур при хранении	-30...60 °С
Влажность	10...90 % с возможной конденсацией
Степень защиты, согласно ГОСТ 14254-2015 (IEC 60529:2013)	IP65
Нормальные условия для поверки	Температура окружающей среды: 23°С ± 2°С Влажность: 40...60 %
Размеры	200 x 180 x 77 мм (без проводов)
Масса	около 1,6 кг
Дисплей	5 светодиодов, сигнализирующих режим работы
Память для хранения данных	Сменная карта памяти 2 ГБ (стандартно), с возможностью расширения до 32 ГБ (опционально)

10.14 Безопасность и электромагнитная совместимость

Безопасность и электромагнитная совместимость	
Соответствие	ГОСТ IEC 61010-2-032-2014
Категория электробезопасности	IV 600В – измерительные входы, IV 300 В – питание, по ГОСТ IEC 61010-2-032-2014
Класс защиты	Двойная изоляция, согласно ГОСТ IEC 61010-1-2014 ГОСТ IEC 61557-1-2005
Электромагнитная совместимость	ГОСТ Р МЭК 61326-1-2014 ГОСТ Р 51522.2.2-2011 (МЭК 61326-2-2:2005)
Устойчивость к помехам на радиочастотах	ГОСТ IEC 61000-4-3-2016

	<p>синусоидальная модуляция 80% АМ, 1 кГц 80...1000 МГц, 10 В/м 1,4...2,0 ГГц, 3 В/м 2,0...2,7 ГГц, 1 В/м</p>
Устойчивость к электростатическим разрядам	<p>ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008) Разряд в воздухе: 8 кВ Разряд контактный: 4 кВ</p>
Устойчивость к наведенным помехам, индуцированным радиочастотным полем	<p>ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96) Синусоидальная модуляция 80% АМ, 1 кГц 0,15...80 МГц, 10 В</p>
Устойчивость к серии быстрых электрических переходных состояний	<p>ГОСТ IEC 61000-4-4-2016 Амплитуда 2 кВ, 5 кГц</p>
Устойчивость к ударным импульсам	<p>ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95) Амплитуда 2 кВ (L-L)</p>
Эмиссия излучаемых помех на радиочастотах	<p>ГОСТ 30804.6.3-2013 (IEC 61000-6-3:2006) 30...230 МГц, 30 дБ (мкВ/м) на расстоянии 10 м 230...1000 МГц, 37 дБ (мкВ/м) на расстоянии 10 м</p>
Эмиссия кондуктивных помех	<p>ГОСТ 30804.6.3-2013 (IEC 61000-6-3:2006) Уровни для квазипикового детектора: 0,15 кГц...0,5 МГц: 66...56 дБмкВ 0,5...5 МГц: 56 дБмкВ 5...30 МГц: 60 дБмкВ</p>

10.15 Стандарты

Стандарты	
Методы измерения	ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC61000-4-30:2008) класс S
Точность измерений	ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC61000-4-30:2008) класс S
Качество энергии	ГОСТ 32144-2013
Фликер	ГОСТ Р 51317.4.15-2012 (МЭК 61000-4-15:2010)
Гармоники	ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009)
Стандарт качества	разработка, проектирование и производство согласно ISO 9001

11 КОМПЛЕКТАЦИЯ

11.1 Стандартная комплектация

Наименование	Кол-во	Индекс
Анализатор параметров качества электрической энергии PQM-700	1 шт.	WMRUPQM700
Руководство по эксплуатации/Паспорт	1/1 шт.	#
Адаптер для подключения к однофазной сети AZ-3	1 шт.	WAADAAZ3
Зажим «Крокодил» изолированный голубой K02	1 шт.	WAKROBU20K02
Зажим «Крокодил» изолированный красный K02	2 шт.	WAKRORE20K02
Зажим «Крокодил» изолированный чёрный K01	3 шт.	WAKROBL20K01
Кабель последовательного интерфейса USB	1 шт.	WAPRZUSB
Карта памяти формата microSD 4 ГБ	1 шт.	#

Комплект для фиксации ремней	1 шт.	WAPOZUCH4
Маркеры кабельные	1 комп.	WAPOZOZN4
Набор для монтажа на DIN-рейке	1 шт.	WAPOZUCH3
Ремни для крепежа на столбе (2 шт.)	1 шт.	WAPOZOPAKPL
Соединитель электрический — адаптер магнитный AM-4	4 шт.	WAADAUMAGKPL
Футляр L5	1 шт.	WAFUTL5

11.2 Дополнительная комплектация

Наименование	Индекс
Адаптер AC-16	WAADAAC16
Клещи гибкие F-1	WACEGF1OKR
Клещи гибкие F-2A	WACEGF2AOKR
Клещи гибкие F-3A	WACEGF3AOKR
Клещи гибкие F-2AHD	WACEGF2AHDOKR
Клещи гибкие F-3AHD	WACEGF3AHDOKR
Клещи гибкие F1A1	WACEGF1A1OKR
Клещи гибкие F2A1	WACEGF2A1OKR
Клещи гибкие F3A1	WACEGF3A1OKR
Клещи гибкие F1A6	WACEGF1A6OKR
Клещи гибкие F2A6	WACEGF2A6OKR
Клещи гибкие F3A6	WACEGF3A6OKR
Клещи измерительные C-4	WACEGC4OKR
Клещи измерительные C-6A	WACEGC6AOKR
Клещи измерительные C-7	WACEGC7OKR
Комплект измерительных разъёмов для фазных и нулевых шин AR-468	WAADAR468RU
Соединитель электрический — адаптер с резьбой M4/M6, модель AR-1	WAADAM4M6

12 ОБСЛУЖИВАНИЕ ПРИБОРА



В случае нарушения правил эксплуатации оборудования, установленных Изготовителем, может ухудшиться защита, применённая в данном приборе.

Корпус измерителя можно чистить мягкой влажной фланелью. Нельзя использовать растворители, абразивные чистящие средства (порошки, пасты и так далее).

Электронная схема измерителя не нуждается в чистке, за исключением гнезд подключения измерительных проводов.

Измеритель, упакованный в потребительскую и транспортную тару, может транспортироваться любым видом транспорта на любые расстояния.

Допускается чистка гнезд подключения измерительных проводов с использованием безворсистых тампонов.

Все остальные работы по обслуживанию проводятся только в авторизованном Сервисном Центре ООО «СОНЭЛ».

Ремонт прибора осуществляется только в авторизованном Сервисном Центре.

13 УТИЛИЗАЦИЯ

Измеритель, предназначенный для утилизации, следует передать Производителю. В случае самостоятельной утилизации, то её следует проводить в соответствии с действующими правовыми нормами.

14 СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗГОТОВИТЕЛЕ

SONEL S.A., Poland, 58-100 Swidnica, ul. Wokulskiego 11

Tel: +48 74 85 83 800

Fax: +48 74 85 83 809

sonel@sonel.pl

www.sonel.pl