

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем
(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Разработка лабораторного стенда для исследования параметров электрических сетей до 1000 В на базе тестера МЭТ 5035»

Студент	<u>М.А. Ахмедов</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Научный руководитель	<u>А.Д. Николаев</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Вахнина
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____ (личная подпись)
« ____ » _____ 2017 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____ (личная подпись)
« ____ » _____ 2017 г.

Тольятти 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Качество электрической энергии.....	4
1.1 Отклонения напряжения	7
1.2. Колебания напряжения.....	9
1.3. Размах изменения напряжения.....	9
1.4. Доза фликера.....	10
1.5. Несинусоидальность напряжения.....	11
1.6. Несимметрия напряжения.....	15
1.7. Длительность провала напряжения.....	20
1.8. Импульс напряжения.....	21
1.9. Коэффициент временного перенапряжения.....	22
1.10. Отклонение и размах колебаний частоты.....	24
2. Приборы для измерения параметров качества электрической энергии.....	27
2.1. МЭТ-5035.....	28
2.2. Энерготестер ПКЭ-А-А.....	33
2.3 Fluke 1736.....	40
2.4. АКЭ-824.....	42
2.5. Лабораторный стенд для измерения параметров электрических сетей.....	51
2.6. Расчет основных параметров трехфазного трансформатора.....	53
3. Методика проведения измерений.....	56
3.1. Методика измерения сопротивления заземления.....	56
3.2. Методика измерения сопротивления грунта.....	62
3.3. Методика измерения сопротивления изоляции проводов.....	65
3.4. Методика измерения полного сопротивления цепи.....	72
3.5. Методика проведения измерений УЗО.....	76
3.6. Структурная схема определения времени срабатывания УЗО.....	87
Заключение.....	90
Список использованных источников	91

Введение

«Приемники электроэнергии и аппараты, присоединенные к электрическим сетям, предназначены для работы при определенных номинальных параметрах: номинальной частоте переменного тока, номинальном напряжении, номинальном токе и т. п. Долгое время основными режимными параметрами, определяющими качество электрической энергии, считались значение частоты в электрической системе и уровни напряжения в узлах сети. Однако по мере внедрения в технологические производственные процессы электропотребителей, обладающих нелинейными вольтамперными характеристиками, все чаще приходилось учитывать возможные нарушения симметрии, синусоидальности формы кривой напряжения в трехфазных сетях» [1].

Для подготовки студентов технических специальностей многие ВУЗы используют различные лаборатории, различные приборы для измерения параметров электрической энергии. Только основной проблемой является то, что в настоящий момент очень мало лабораторий и цены на лабораторные стенды высокие.

Целью моей диссертации является повышение качества подготовки студентов путем создания лабораторного стенда по измерению параметров качества электрических сетей на основе многофункционального тестера МЭТ-5035.

Для выполнения поставленной цели необходимо составить структурную схему стенда, рассмотреть методики проведения измерений, а также сконструировать схему определения времени срабатывания устройства защитного отключения.

1 Качество электрической энергии

Качество электроэнергии очень сильно влияет на расход электроэнергии, технологический процесс производства, надежность систем электроснабжения. Поэтому большое внимание уделяют повышению качества электроэнергии.

Электрическая энергия рассматривается как особый вид продукции, обладающий определенными показателями, которые позволяют судить о её пригодности в различных производственных процессах.

Показатели свойств электроэнергии, численно характеризующих напряжение в СЭС по частоте, действующему значению, форме кривой, симметрии и импульсным помехам, и определяющих воздействие на элементы сети, называют качеством электрической энергии.

Перечень показателей качества электрической энергии (ПКЭ), их нормативные значения, критерии оценки и методы измерений установлены ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». ГОСТ является межгосударственным стандартом, действующим в рамках СНГ. В международной практике ПКЭ оцениваются с позиций электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств. Под ЭМС понимают способность электрооборудования, аппаратов и приборов нормально функционировать в данной электромагнитной среде, не подвергаясь воздействию электромагнитных помех и не внося таковых в среду.

Выделяют следующие вопросы при решении задачи повышения качества электроэнергии:

- экономические вопросы, которые включают в себя методы расчета убытков от некачественной электроэнергии в системах промышленного электроснабжения;

- математические аспекты, которые представляют собой обоснование тех или иных методов расчёта показателей качества электроэнергии;

- технические аспекты, включающие в себя разработку технических средств и мероприятий, улучшающих качество электроэнергии, а также организацию системы контроля и управления качеством.

Номенклатура ПКЭ, установленная ГОСТ 32144-2013, включает следующие показатели:

- установившееся отклонение напряжения δU_y , измеряется в %;
- размах изменения напряжения δU_t , измеряется в %;
- доза фликера P_t , измеряется в отн. ед.;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U , измеряется в %;
- коэффициент ν -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(\nu)}$, измеряется в %;
- коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} , измеряется в %;
- коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности K_{0U} , измеряется в %;
- отклонение частоты Δf , измеряется в Гц;
- длительность провала напряжения Δt_n , измеряется в с.;
- коэффициент временного перенапряжения $k_{пер.У}$, измеряется в отн. ед.;
- импульсное напряжение $U_{имп.}$, измеряется в кВ.

ПКЭ разделяют на нормируемые и ненормируемые. К нормируемым относятся: установившееся отклонение напряжения, размах изменения напряжения, доза фликера, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, коэффициент ν -ой гармонической составляющей напряжения, коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности, отклонение частоты, длительность провала напряжения. К не нормируемым ПКЭ относятся коэффициент временного перенапряжения и импульсное

напряжение. Провалы напряжения нормируются только по длительности, по глубине не нормируются.

На нормируемые ПКЭ установлены нормально и предельно допустимые значения. Для дозы фликера, размахов изменения напряжения и длительности провалов напряжения установлены только предельно допустимые значения.

Для K_U и $K_{U^{(v)}}$ нормально и предельные значения установлены в зависимости от номинального напряжения сети: 0,38; 6-20; 35; 110-330 кВ.

Кроме того, ГОСТ 32144-2013 установлена номенклатура вспомогательных параметров электрической энергии, которые используются при определении значений некоторых ПКЭ. Вспомогательные параметры не нормируются. К ним относятся:

- для оценки колебаний напряжения – частота повторений изменений напряжения $F_{\delta U_t}$ и интервал между изменениями напряжения Δt_i ;

- для оценки провалов напряжения – глубина провала напряжения δU_n и частота появления провалов напряжения F_n ;

- для оценки импульсов напряжения – длительность импульса по уровню 0,5 его амплитуды $\Delta t_{\text{имп. 0,5}}$;

- для оценки перенапряжений – длительность временного перенапряжения.

Такие ПКЭ, как δU_y , δU_t , P_t , K_U , $K_{U^{(v)}}$, K_{2U} , K_{0U} , Δf , применяют для характеристики стационарных процессов в СЭС, а такие, как провалы напряжения, временные перенапряжения, импульсы, – для характеристик кратковременных процессов, возникающих в сети в результате коммутаций, атмосферных перенапряжений.

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» показателями качества у приёмников электроэнергии приняты следующие:

«- При питании от электрических сетей однофазного тока: отклонение частоты; отклонение напряжения; размах колебаний частоты; размах изменения напряжения; коэффициент несинусоидальности напряжения.

- При питании от электрических сетей трёхфазного тока: отклонение частоты; отклонение напряжения; размах колебаний частоты; размах изменения напряжения; коэффициент несинусоидальности напряжения; коэффициент несимметрии напряжений; коэффициент неуравновешенности напряжений.

- При питании от электрических сетей постоянного тока: отклонение напряжения; размах изменения напряжения; коэффициент пульсации напряжения.

Значения показателей качества электроэнергии должны находиться в допустимых пределах с интегральной вероятностью 0,95 за установленный период времени» [1].

«Качество электроэнергии можно улучшить средствами питающей сети или применением соответствующего дополнительного оборудования на основе имеющегося опыта проектных и эксплуатационных организаций.

Часть решений, в основном обусловленных техническими требованиями, является общей и должна приниматься на основе имеющихся указаний. В других случаях учитывают специфику конкретных условий (наличие крупных ударных нагрузок может считаться особенностью предприятий)» [1].

1.1 Отклонения напряжения

«Одним из важнейших показателей качества электроэнергии является действующее значение напряжения – фазного или линейного в зависимости от схемы включения потребителей. Отклонения напряжения вызывают наибольший ущерб. Основными причинами отклонений напряжения в СЭС промышленных предприятий являются изменения режимов работы электроприёмников, изменения режимов питающей энергосистемы.

В пределах одной ступени трансформации значение напряжения сети изменяется в относительно небольших пределах, поэтому с целью упрощения

расчётов и достижения большей наглядности на практике пользуются понятием «отклонения напряжения» [1].

Под отклонением напряжения (δU_y) понимают разность между фактическим (действительным) значением напряжения (U_y) и его номинальным значением ($U_{\text{ном.}}$) для данной сети:

$$\delta U_y = U_y - U_{\text{ном.}}$$

Если δU_y выражается в процентах от $U_{\text{ном.}}$, а U_y и $U_{\text{ном.}}$ – в вольтах (киловольтах), то:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном.}}}{U_{\text{ном.}}} \cdot 100$$

Вычисляют значения усреднённого напряжения U_y как результат N наблюдений основной частоты $U_{(1)i}$ или основной частоты и прямой последовательности $U_{1(1)i}$ за интервал времени 1 мин:

$$U_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_i^2}{N}}$$

Число наблюдений за 1 мин. должно быть не менее 18.

В России согласно ГОСТ 32144-2013 в условиях нормальной работы приёмников электроэнергии отклонение напряжения от номинального значения допускаются в следующих пределах:

«а) «(-5) - (+10) на зажимах электродвигателей и аппаратов для их пуска и управления» [1].

б) «(-2,5) - (+5) на зажимах приборов рабочего освещения, установленных в производственных помещениях и общественных зданиях, где требуется значительное зрительное напряжение, а также в прожекторных установках наружного освещения» [1].

в) «на зажимах остальных приёмников электроэнергии, в том числе приёмников электроэнергии животноводческих комплексов и птицефабрик, допускают отклонения напряжения в пределах 5 % номинального» [1].

г) «в электрических сетях сельскохозяйственных районов, кроме животноводческих комплексов и птицефабрик, и в сетях, питающихся от шин тяговых подстанций электрифицированного транспорта, при наличии специальных технико-экономических обоснований с разрешения Министерства энергетики и электрификации допускаются другие значения отклонений напряжения.

В послеаварийных режимах допускается дополнительное понижение напряжения на 5 %» [1].

1.2 Колебания напряжения

«Колебания напряжения характеризуются размахом изменения напряжения и дозой фликера, к которым относятся динамично изменяющиеся огибающие действующего (амплитудного) значения напряжения в результате изменений резкопеременной нагрузки» [1].

1.3 Размах изменения напряжения

Размах изменения напряжения – это разница между значениями следующих один за другим экстремумов огибающей напряжения основной частоты, определённых на каждом полупериоде, выраженная в процентах от $U_{ном.}$:

$$\delta U_t = \frac{|U_{t1} - U_{t2}|}{U_{ном.}} \cdot 100$$

На рисунке 1 приведён пример колебаний напряжения, иллюстрирующие размах δU_t и интервал между смежными колебаниями Δt_i .

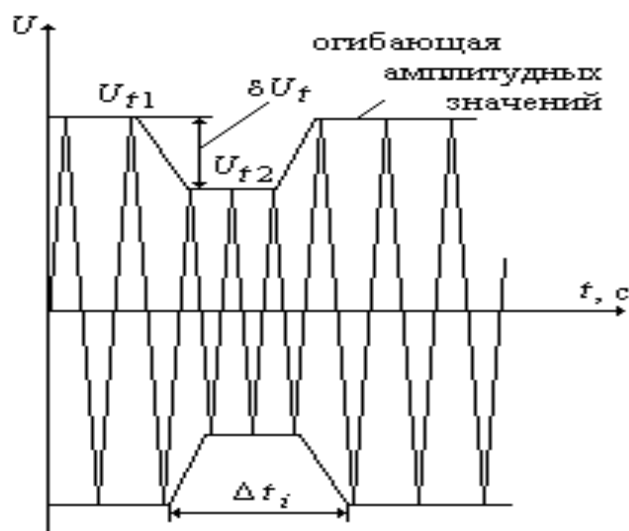


Рисунок 1- Размах напряжения с интервалом Δt_i

Частоту повторения изменений напряжения при периодических колебаниях напряжения вычисляют по формуле:

$$F_{\delta U_t} = \frac{m}{T},$$

где m – количество изменений напряжения со скоростью более 1% в секунду за время T ; T – интервал времени измерения, принимаемый равным 10 мин.

Допустимые значения размахов изменений напряжения на зажимах ламп накаливания определяют по кривым, представленным в справочной литературе, в зависимости от частоты их повторения или интервала между следующими друг за другом изменениями напряжения.

1.4 Доза фликера

«Введение ограничений на размахи изменений напряжения для источников света вызвано условиями охраны труда. При быстром изменении напряжения наблюдается резкое изменение светового потока, что приводит к зрительной утомляемости людей, снижению производительности труда.

Фликер (*от англ. flicker – мерцание*) – это субъективное восприятие человеком колебаний светового потока искусственных источников освещения, вызванных колебаниями напряжения в электрической сети» [1].

Доза фликера – мера восприимчивости человека к воздействию фликера за установленный промежуток времени.

Различают кратковременную (P_{st} , для интервала 10 мин) и длительную (P_{lt} , для интервала 120 мин) дозу фликера. Индексы «St» и «Lt» от англ. shorttime – кратковременная и longtime – длительная соответственно.

Кратковременную и длительную дозу фликера определяют с помощью фликерметра. Кроме того, длительную дозу фликера можно рассчитать по формуле:

$$P_{Lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} (P_{Stk})^3},$$

где P_{stk} – кратковременная доза фликера на k -м интервале времени T_{st} в течение периода наблюдения $T_l = 10$ минут.

1.5 Несинусоидальность напряжения

«В результате интенсификации производственных процессов, совершенствования существующей и внедрения новой технологии на промышленных предприятиях всё в большей степени применяют вентильные преобразователи, установки однофазной и трехфазной электросварки, мощные электродуговые печи, вольтамперные характеристики которых нелинейные. Такими же характеристиками обладают силовые трансформаторы, мощные магнитные усилители, газоразрядные лампы. Характерной особенностью этих устройств является потребление ими из сети несинусоидальных токов при подведении к их зажимам синусоидального напряжения» [1].

«Несинусоидальные кривые токов можно рассматривать как сложные гармонические колебания, состоящие из совокупности простых гармонических колебаний различных частот. При этом периодическая функция изменения несинусоидальных токов удовлетворяет условиям Дирихле (ограниченная, кусочно-непрерывная, на протяжении периода имеет конечное число экстремальных значений). В связи с этим её можно разложить в ряд Фурье:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{v=1}^n (a_v \cdot \cos(v \cdot \omega t) + b_v \cdot \sin(v \cdot \omega t))$$

где v – номер гармоники; a_v , b_v – коэффициенты ряда Фурье; n – номер последней из учитываемых гармоник.

При $v=1$ из выражения (6) определяют гармонику, называемую первой или основной (с частотой 50 Гц), остальные члены ряда называют высшими гармониками» [1].

Коэффициенты ряда Фурье определяют по формулам:

$$a_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t\omega) \cos(v \cdot \omega t) \cdot d(\omega t) ;$$

$$b_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t\omega) \sin(v \cdot \omega t) \cdot d(\omega t) .$$

Амплитуду v -й гармоники определяют по формуле:

$$A_v = \sqrt{a_v^2 + b_v^2}$$

Начальная фаза v -й гармоники:

$$\phi_v = \arctg \frac{b_v}{a_v} .$$

«Токи высших гармоник, проходя по элементам сети, вызывают падения напряжения в сопротивлениях этих элементов, которые, накладываясь на основную синусоиду напряжения, приводят к искажению формы кривой напряжения. Поэтому выражения (7) – (10) справедливы и для кривой несинусоидальных напряжений» [1].

При разложении тока на гармонические составляющие появляются высшие гармоники с порядками

$$v = k \cdot p \pm 1,$$

где p – число фаз выпрямления; k – последовательный ряд целых чисел (1, 2, 3 ...).

Гармоники с порядковыми номерами $\nu = k \cdot p + 1$ образуют системы ЭДС и токов прямой последовательности; гармоники с порядковыми номерами $\nu = k \cdot p - 1$ – обратной последовательности» [1].

Нормированные значения нормально допустимых и предельно допустимых значений представлены в таблице 1.

Таблица 1-Значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, %

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

Несинусоидальность напряжения характеризуется следующими показателями:

- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U ;
- коэффициентом ν -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(\nu)}$.

Вычисляют значение коэффициента искажения кривой напряжения K_U , %, по формуле:

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=2}^{40} U_{(\nu)i}^2}}{U_{(1)i}} \cdot 100$$

где $\nu = 2 - 40$ – порядок гармоник, кратных основной частоте, учитываемых при расчёте; $U_{(1)i}$ – действующее значение напряжения основной

частоты для i -го наблюдения, В; $U_{(\nu)i} = \frac{I_{\nu} \nu U_{\text{н.л}} U_{\text{н}}}{S_{\text{к}}}$ – действующее значение напряжения ν -й гармоники, В; I_{ν} – действующее значение фазного тока ν -й гармоники, А; $U_{\text{н.л}}$ – напряжение нелинейной нагрузки, В; $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение сети, В.

Для вентильных преобразователей I_v определяется по выражению:

$$I_v = \frac{m S_{\text{пр.}}}{(\sqrt{3} \pi U_n x^* v^2) \sin \phi \cdot \sin\left(\frac{3x^* v}{m \sin \phi}\right)},$$

где m – число фаз выпрямителя; $S_{\text{пр.}}$ – потребляемая мощность преобразователем, ВА; x^* – суммарное индуктивное сопротивление сети,

приведённое к мощности трансформатора преобразователя; ϕ ($\sin \phi = \frac{Q_{\text{пр.}}}{S_{\text{пр.}}}$) –

угол, характеризующий коэффициент реактивной мощности; $Q_{\text{пр.}}$ – реактивная мощность преобразователя.

Для преобразователей учитывают следующие гармоники тока: при 6-фазной схеме – 5, 7, 11, 13; при 12-фазной схеме – 11, 13, 23 и 25; при 24-фазной схеме – 23, 25, 47 и 49-ю.

Вычисляют значение коэффициента искажения синусоидальности K_U в процентах как результат усреднения N наблюдений K_{Ui} на интервале времени равном 3 с:

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{Ui}^2}{N}}.$$

Число наблюдений N должно быть не менее девяти.

Вычисляют значение коэффициента v -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(v)i}$, %, как результат i -го наблюдения по формуле:

$$K_{U(v)i} = \frac{U_{(v)i}}{U_{(1)i}} \cdot 100.$$

Вычисляют значение коэффициента v -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(v)}$, %, как результат усреднения наблюдений $K_{U(v)i}$ в интервале времени, равном 3 с, по формуле:

$$K_{U(v)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{U(v)i}^2}{N}}.$$

Число наблюдений N должно быть не менее девяти.

1.6 Несимметрия напряжения

«Несимметрия напряжений и токов трёхфазной системы является одним из важнейших показателей качества электроэнергии. Причиной появления несимметрии напряжений и токов являются различные несимметричные режимы системы электроснабжения. Широкое применение различного рода однофазных электротермических установок значительной мощности (до 10 МВт) и трёхфазных дуговых печей также привело к значительному увеличению доли несимметричных нагрузок на промышленных предприятиях. Подключение таких мощных несимметричных одно- и трёхфазных нагрузок к трёхфазным сетям вызывает в системах электроснабжения длительный несимметричный режим, который характеризуется несимметрией напряжений и токов.

В системах электроснабжения различают кратковременные (аварийные) и длительные (эксплуатационные) несимметричные режимы. Кратковременные несимметричные режимы обычно связаны с различными аварийными процессами, как, например, несимметричные КЗ, обрывы одного или двух проводов воздушной линии с замыканием на землю и т.д. Длительные несимметричные режимы обычно обусловлены несимметрией элементов электрической сети или подключением к системе электроснабжения несимметричных (одно-, двух- или трёхфазных) нагрузок» [1].

Несимметрию напряжений и токов, обусловленную несимметрией элементов электрической сети, называют продольной. Примером продольной несимметрии являются неполнофазные режимы воздушных линий и несимметрия параметров фаз отдельных элементов сети. Продольная несимметрия характерна также для специальных систем электропередачи: два провода – земля (ДПЗ), два провода – рельсы (ДПР), два провода – труба (ДПР) и т.д.

Несимметрию напряжений и токов, вызванную подключением к сети многофазных и однофазных несимметричных нагрузок, называют поперечной. Поперечная несимметрия возникает также при неравенстве активных и реактивных сопротивлений отдельных фаз некоторых приёмников электроэнергии (дуговые электропечи).

Для анализа и расчётов несимметричных режимов в трёхфазных цепях в основном применяют метод симметричных составляющих, основанный на представлении любой трехфазной несимметричной системы величин (токов, напряжений, магнитных потоков) в виде суммы в общем случае трёх симметричных систем величин. Эти симметричные системы, которые в совокупности образуют несимметричную систему величин, называют её симметричными составляющими. Симметричные составляющие отличаются друг от друга порядком следования фаз, т.е. порядком, в котором фазные величины проходят через максимум, и называются системами прямой, обратной и нулевой последовательности.

Несимметрия междуфазных напряжений вызывается наличием составляющих обратной последовательности, а несимметрия фазных — ещё и наличием составляющих нулевой последовательности.

Несимметрия напряжения характеризуется двумя показателями:

- коэффициентом несимметрии напряжения обратной последовательности K_{2U} ;

- коэффициентом несимметрии напряжения нулевой последовательности K_{0U} .

Вычисляют коэффициент несимметрии напряжения обратной последовательности K_{2U_i} , %, как результат i -го наблюдения, по следующему выражению:

$$K_{2U_i} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{1(1)i}} 100 ,$$

где $U_{2(1)i}$ – действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты трёхфазной системы напряжений в i -м наблюдении, В; $U_{1(1)i}$ – действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты в i -м наблюдении, В.

Вычисляют значение коэффициента несимметрии напряжения K_{2U} , %, как результат усреднения N наблюдений K_{2Ui} на интервале времени равном 3 с, по формуле:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{2Ui}^2}{N}}$$

Число наблюдений $N \geq 9$.

Коэффициент несимметрии токов K_{2I} определяют аналогично K_{2U} .

Несимметрия по току значительно превышает несимметрию по напряжению. В линиях электропередачи и трансформаторах несимметрия тока снижает пропускную способность за счёт неравномерной загрузки фаз.

В практических расчётах коэффициент обратной последовательности в рассматриваемой точке сети возможно использование следующей формулы:

$$K_{2U} = (1 + \delta U) \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} e^{j\psi_U / S_k},$$

где $\delta U = (U_1 - U_n) / U_n$ – размах изменения напряжения; U_1 – напряжение первой последовательности; $\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2} (P_{AB} - P_{CA}) - \frac{1}{2} (Q_{AB} + Q_{CA}) + Q_{BC}$;
 $\beta = -\frac{1}{2} (P_{AB} - P_{CA}) - \frac{\sqrt{3}}{2} (Q_{AB} - Q_{CA}) + P_{BC}$; $P_{AB}, P_{CA}, P_{BC}, Q_{AB}, Q_{CA}, Q_{BC}$ – суммарные потери мощности соответствующих однофазных нагрузок; ψ_I, ψ_U – аргумента тока и напряжения коэффициента обратной последовательности (определяются по справочным таблицам).

Токи прямой и обратной последовательности определяют по выражениям:

$$I_1 = \frac{\sqrt{P_\Sigma^2 + Q_\Sigma^2}}{3U_n e^{j \arctg(\frac{Q_\Sigma}{P_\Sigma})}} ;$$

$$I_2 = \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{3U_n e^{j\psi_i}} ,$$

где $P_\Sigma = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$; $Q_\Sigma = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA}$ — мощности несимметричной нагрузки.

При наличии составляющих нулевой последовательности происходит смещение нейтрали трёхфазной системы, которое характеризуется коэффициентом неуравновешенности напряжений.

Вычисляют коэффициент несимметрии напряжения нулевой последовательности (коэффициентом неуравновешенности) K_{0Ui} , %, как результат i -го наблюдения, по следующему выражению:

$$K_{0Ui} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{0(1)i}}{U_{1(1)i}} 100 ,$$

где $U_{0(1)i}$ — действующее значение напряжения нулевой последовательности основной частоты трёхфазной системы напряжений в i -м наблюдении, В; $U_{1(1)i}$ — действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты i -м наблюдении, В.

Вычисляют значение коэффициента несимметрии напряжения K_{0U} , %, как результат усреднения N наблюдений K_{0Ui} по формуле:

$$K_{0U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{0Ui}^2}{N}}$$

Число наблюдений $N \geq 9$.

Коэффициент нулевой последовательности не нормируется, т.к. U_0 не оказывает влияния на трёхфазных потребителей.

Симметричные составляющие напряжений прямой U_1 , обратной U_2 и нулевой U_0 последовательностей определяют по известным соотношениям для симметричных составляющих прямой:

$$U_1 = \frac{1}{3}(U_A + aU_B + a^2U_C);$$

$$U_2 = \frac{1}{3}(U_A + a^2U_B + aU_C);$$

$$U_0 = \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C),$$

где U_A, U_B, U_C – фазные напряжения сети; $a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – комплексное число, называемое фазным множителем; $a^2 = e^{j2\pi/3}e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$.

Например, в асинхронных двигателях (АД) несимметрия напряжения вызывает противодействующий вращающий момент, что в свою очередь влечёт за собой полезный момент двигателя. Снижение полезного момента равно квадрату коэффициента несимметрии, т.е.

$$K_{2U}^2 = M_{дв.}$$

В АД сопротивление обратной последовательности в 5–7 раз меньше сопротивления прямой последовательности, поэтому даже при небольшом напряжении обратной последовательности возникает значительный ток, обуславливающий быстрое старение изоляции обмоток. В среднем при $K_{2U} = 4\%$ срок службы АД сокращается в 2 раза.

Коэффициент несимметрии K_{2U} является нормативным показателем качества электроэнергии. В соответствии с ГОСТ 32144-2013 $K_{2U} \leq 2\%$ нормально длительно допустим на зажимах любого трёхфазного симметричного приёмника электроэнергии. Предельно допустимое значение K_{2U} составляет 4%.

1.7 Длительность провала напряжения

«Провал напряжения – это внезапное, в течение 10 мс, снижение напряжения до значения ниже $0,9U_{\text{ном.}}$ с последующим его восстановлением до значений, равных или близких к первоначальному, в результате действия средств защиты и автоматики, установленных в сети» [1].

Причины возникновения провалов являются короткие замыкания в системе электроснабжения.

Провалы напряжения характеризуются глубиной $\delta U_{\text{п}}$ и длительностью $\Delta t_{\text{п}}$ (рис. 3).

Глубину провала напряжения, %, вычисляют по выражению:

$$\delta U_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ном.}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном.}}} 100 ,$$

где $U_{\text{ном.}}$ – минимальное значение из всех измеренных среднеквадратических значений напряжения, В.

«Длительность провала напряжения определяется суммарным временем срабатывания средств защиты и автоматики, под действием которых напряжение может восстановиться до первоначального значения.

Изменение длительности провала напряжения $\Delta t_{\text{п}}$ (рисунок 3) осуществляют следующим образом: фиксируют начальный момент времени $t_{\text{н}}$ резкого спада (длительностью менее 10 мс) огибающей среднеквадратических значений напряжения, определённых на каждом полупериоде основной частоты, ниже уровня $0,9U_{\text{ном.}}$; фиксируют конечный момент времени $t_{\text{к}}$ восстановления среднеквадратического значения напряжения до $0,9U_{\text{ном.}}$; вычисляют длительность провала напряжения, с.» [1].

$$\Delta t_{\text{п}} = t_{\text{к}} - t_{\text{н}} .$$

Согласно ГОСТ 32144-2013 длительности провала напряжения в сетях до 20 кВ может достигать 30 с, а длительность автоматически устанавливаемого провала напряжения определяется выдержками времени релейной защиты и противоаварийной автоматики.

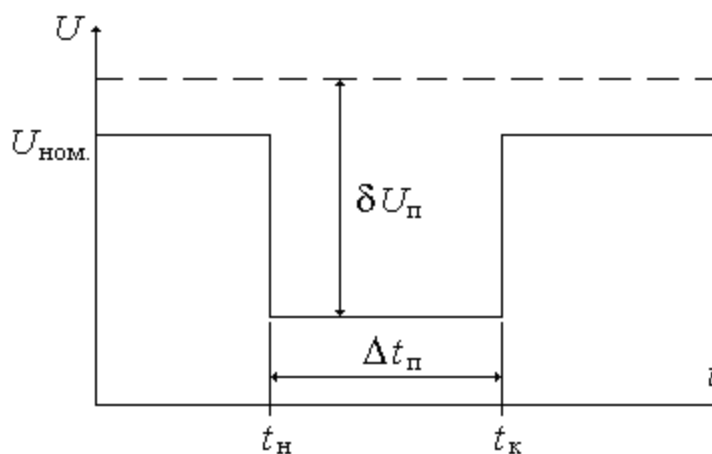


Рисунок 2 - Длительность провала напряжения

1.8 Импульс напряжения

«Импульс напряжения – это резкое изменение напряжения в точке электрической сети, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня за промежуток времени за несколько миллисекунд.

Причины импульсов напряжения – грозовые разряды, коммутации в системе электроснабжения» [1].

Импульс напряжения характеризуется импульсным напряжением $U_{\text{имп.}}$ (амплитудой импульсного напряжения $U_{\text{имп. а}}$) и длительностью $\Delta t_{\text{имп.}}$ и $\Delta t_{\text{имп. 0,5}}$ (рисунок 4).

Амплитуда импульсного напряжения – это максимальное значение напряжения при резком его изменении (длительность фронта импульса не более 5 мс).

Длительность импульса напряжения по уровню 0,5 его амплитуды, $\Delta t_{\text{имп. 0,5}}$, мкс или мс, (см. рисунок 3) вычисляют по формуле:

$$\Delta t_{\text{имп. 0,5}} = t_{\text{к 0,5}} - t_{\text{н 0,5}},$$

где $t_{\text{к 0,5}}$ и $t_{\text{н 0,5}}$ – моменты времени, соответствующие пересечению кривой импульса напряжения горизонтальной линией, проведённой на половине амплитуды импульса.

Данный показатель ограничивается после специально проведённых исследований для каждого объекта индивидуально.

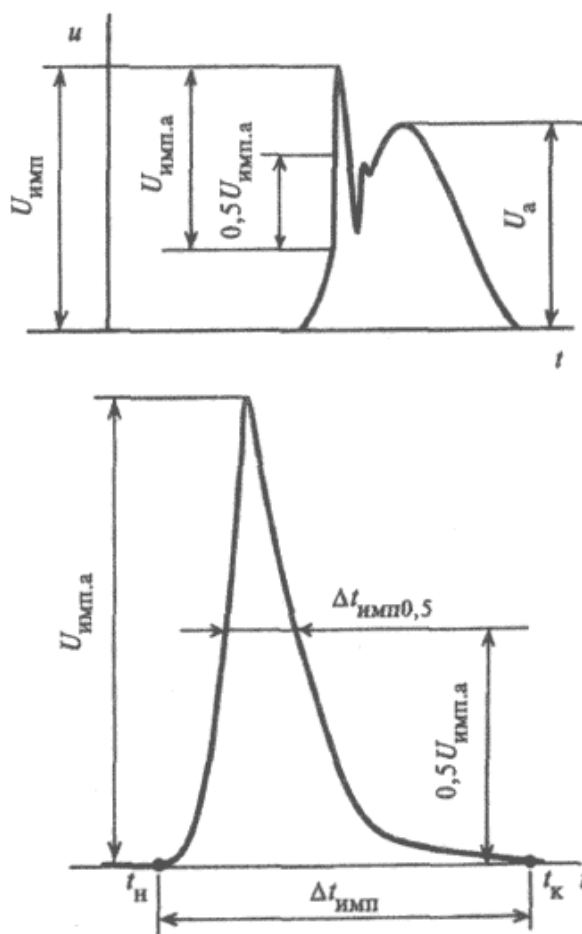


Рисунок 3 - Параметры импульсного напряжения ($U_{\text{имп.а}}$ – амплитудное значение напряжения)

1.9 Коэффициент временного перенапряжения

Временные перенапряжения – это повышения напряжения в точке электрической сети выше $1,1U_{\text{ном}}$ продолжительностью более 10 мс, возникающие в системе электроснабжения при коммутациях или коротких замыканиях за счёт энергии, накопленной в нелинейных элементах сети. Продолжительность перенапряжений определяется длительностью переходных процессов.

Значение данного показателя качества электрической энергии оценивается коэффициентом временного перенапряжения $k_{пер.U}$ и его длительностью $\Delta t_{пер.U}$.

Вычисляют коэффициент временного перенапряжения по формуле:

$$k_{пер.U} = \frac{U_{a \max}}{\sqrt{2}U_{ном.}}$$

Длительность $\Delta t_{пер.U}$, с, определяют следующим образом: фиксируют момент времени $t_{н. пер.}$ превышения действующим значением напряжения уровня, равного $1,1 \cdot U_{ном.}$, и момент времени $t_{к. пер.}$ спада напряжения до уровня $1,1 \cdot U_{ном.}$. Вычисляют $\Delta t_{пер.U}$, с, по формуле:

$$\Delta t_{пер.U} = t_{н. пер.} - t_{к. пер.}$$

Изменение $k_{пер.U}$ (рис. 4), осуществляют следующим образом: измеряют амплитудное значение перенапряжения U_a на каждом полупериоде основной частоты при резком (длительностью до 5 мс) превышении уровня напряжения, равного $1,1U_{ном.} \cdot \sqrt{2}$; определяют максимальное из измеренных амплитудных значений напряжения $U_{a. \max}$. С целью исключения влияния коммутационного импульса на значение $U_{a. \max}$ осуществляют через 0,04 с от момента превышения напряжением уровня, равного $1,1U_{ном.}$.

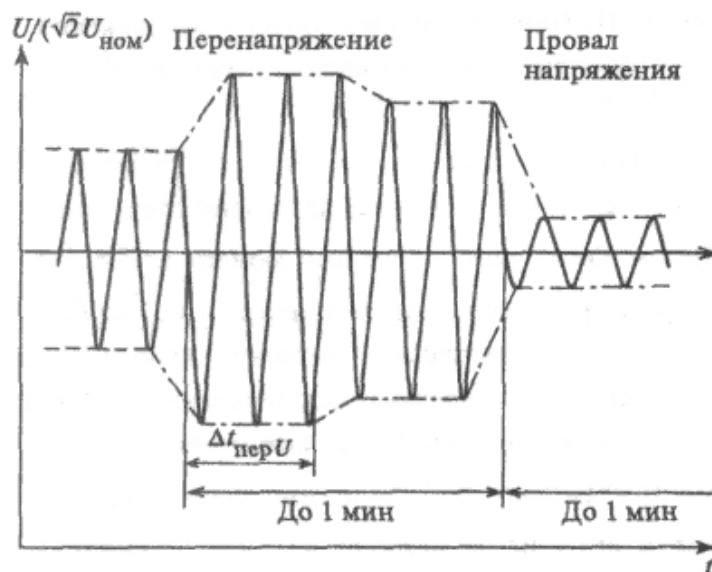


Рисунок 4 - Временное перенапряжение и провал напряжения

Значение коэффициента временного перенапряжения в точке присоединения электрической сети общего назначения в зависимости от длительности временных перенапряжений не превышают значений, указанных в таблице 2.

Таблица 2 - Значение коэффициента временного перенапряжения

Длительность временного перенапряжения $\Delta t_{\text{пер.}U}$, с	до 1	до 20	до 60
Коэффициент временного перенапряжения $k_{\text{пер.}U}$, отн. ед.	1,47	1,31	1,15

1.10 Отклонение и размах колебаний частоты

«Отклонение частоты – это её изменение в ЭЭС в целом в результате изменения частоты вращения оборотов синхронных генераторов электростанций, происходящего под воздействием медленного изменения баланса активной мощности, выдаваемой генераторами электростанций и потребляемой нагрузкой ЭЭС» [1].

Вычисляют отклонение частоты по разности между действительным (усреднённым) и номинальным значениями основной частоты:

$$\Delta f = f_y - f_{\text{ном.}} \quad \text{или} \quad \Delta f = \frac{f - f_{\text{ном.}}}{f_{\text{ном.}}} \cdot 100 ,$$

где $f_y = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N}$ – усреднённое значение частоты как результат усреднения данных N ($N \geq 15$) наблюдений f_i на интервале времени, равном 20 с;

В нормальном режиме работы энергосистемы допускают отклонения частоты, усреднённые за 10 мин, в пределах $\pm 0,1$ Гц. Допускается временная работа энергосистемы с отклонением частоты, усреднённым за 10 мин, в пределах $\pm 0,2$ Гц. Предельно допустимое значение отклонения частоты составляет $\pm 0,4$ Гц.

В послеаварийных режимах допускается дополнительное понижение напряжения на 5%.

«Размах колебаний частоты – разность между наибольшим и наименьшим значениями основной частоты за определённый промежуток времени:

$$\delta f = f_{\text{ном.,наиб.}} - f_{\text{ном.,наим.}} \quad \text{или} \quad \delta f = \frac{f_{\text{ном.,наиб.}} - f_{\text{ном.,наим.}}}{f_{\text{ном.}}} \cdot 100.$$

Под колебанием частоты понимают её изменения, происходящие со скоростью 0,2 Гц в секунду. Размах колебаний частоты не должен превышать 0,2 Гц» [1].

Основной причиной возникновения колебаний частоты являются мощные приёмники электрической энергии с резкопеременной активной нагрузкой. Возможность подключения таких приёмников к СЭС проверяют по допустимой скорости изменения активной мощности $\Delta P/\Delta t$ из условия:

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} \leq 1,56 \cdot S_{\kappa},$$

где S_{κ} - мощность короткого замыкания.

«Изменения отклонений и размаха колебаний частоты даже в жёстко установленных пределах влияют на работу приёмников электроэнергии и на надёжность некоторых типов электрооборудования. Асинхронные и синхронные электродвигатели с постоянным моментом на валу изменяют частоту вращения в зависимости от частоты сети, при этом возможны нарушения технологического процесс. Например, для асинхронного двигателя такую зависимость определяют по формуле:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f_1 (1 - s)}{p},$$

Где s – скольжение двигателя; f_1 – частота напряжения питающей сети, Гц; p – число пар полюсов двигателя.

Влияние отклонений частоты на производительность механизмов зависит от их типа» [1]. Потребляемая при этом активная мощность определяется по формуле:

$$P = a \cdot f^n,$$

где n –показатель степени, принимающий значения $0 \div 4$; a – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа механизма.

У металлорежущих станков мощность двигателей пропорциональна частоте и $n = 1$. Для вентиляторов центробежных насосов $n = 2 \div 4$ в зависимости от характера работы. «Характеристики ряда потребителей, таких как электрические печи сопротивления, дуговые печи и лампы накаливания, не зависят от изменений частоты.

Неблагоприятно влияют отклонения частоты на сети промышленных предприятий, в этом случае увеличиваются потери мощности и напряжения. Кроме того, в случае установки силовых фильтров с защитными реакторами, предназначенными для снижения уровня высших гармоник, возможны резонансные явления. Так, при некотором значении отклонения частоты в цепи защитный реактор -конденсаторная батарея возникает резонанс напряжения па частоте ν . При дальнейшем снижении частоты цепь будет иметь ёмкостной характер для всех высших гармоник их источника. Это может явиться причиной перегрузок конденсаторной батареи по току, выходу её из строя, а также может привести к перераспределению высших гармоник в сети» [1].

2 Приборы для измерения параметров качества электрической энергии

При выполнении энергетического обследования предприятий и организаций проводится контроль показателей качества электрической энергии на питающих вводах электрических сетей организации и непосредственно у наиболее ответственных электроприемников для определения их соответствия нормам, установленным ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Актуальность измерения показателей качества электрической энергии обусловлена также тем, что указанные показатели влияют на энергоэффективность и надежность работы электроустановок.

В данной главе мы рассмотрим различные приборы для измерения показателей качества электрической энергии. А также составим структурную схему лабораторного стенда по измерению показателей качества электроэнергии для прибора МЭТ-5035.

2.1 МЭТ-5035

Прибор комплексного контроля, МЭТ-5035 предназначен для измерения и проверки следующих величин:

- Проверку целостности и измерение сопротивления защитных проводников заземления и зануления тестовым током 200 мА и напряжением от 4 до 24 В (постоянное, без нагрузки),

- Измерение сопротивления изоляции при тестовом испытательном напряжении 50 В, 100 В, 250 В, 500 В, 1000 В (постоянное),.

- Измерение параметров УЗО переменного тока: время срабатывания (отключения), дифференциальный отключающий ток (I_{Δ}), напряжение прикосновения (U_t) (контактное напряжение), общее (полное) сопротивление заземления (R_a).

- Измерение параметров УЗО импульсного тока: время срабатывания (отключения), дифференциальный отключающий ток (I_{Δ}), напряжение прикосновения (U_t) (контактное напряжение), общее (полное) сопротивление заземления (R_a).

- Измерение полного сопротивления петли «ф-н» и «ф-з» и вычислением ожидаемого (предполагаемого) тока короткого замыкания. Измерение полного сопротивления «ф-з» и полного сопротивления заземления без отключения УЗО и вычислением тока короткого замыкания, индикацию порядка чередования фаз.

- Измерение полного сопротивления петли «ф-з» тестовым током 15 мА и вычислением ожидаемого (предполагаемого) тока короткого замыкания.

- Измерение сопротивления контура заземления и проводимости грунта с использованием дополнительных штырей-заземлителей.

Тестер представляет собой портативный измерительный прибор, выполненный в специальном ударопрочном корпусе. Управление процессом измерения осуществляется при помощи встроенного микропроцессора. Выбор режима измерения осуществляется поворотным переключателем и при помощи клавиш управления. Функциональные клавиши служат для включения и

выключения тестера, проведения измерений, выбора специальных функций при измерениях. Измеренные значения отображаются на жидкокристаллическом дисплее, имеющем основную и вспомогательную цифровые шкалы, индикаторы режимов измерения, индикаторы единиц измерения, и предупреждающие индикаторы.

На торцевой панели корпуса тестера электрического многофункционального МЭТ-5035 расположены контактные клеммы, предназначенные для присоединения измерительных проводов и подключения их к измеряемой цепи.

Тестер электрически1 многофункциональны1 МЭТ-5035 имеет возможность сохранять полученные результаты измерений во внутренней памяти или передавать их на персональный компьютер.

Далее в таблицах 3-10 представлены метрологические характеристики измерений:

Таблица 3. Режим измерения сопротивления в низкоомных цепях «Ω»

Тестовый режим	Диапазон измерений (Ом)	Разрешение (Ом)	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения сопротивления
AUTO, R + TIMER, R- TIMER	0,01...19,99	0,01	$\pm(0,02 \cdot R_{\text{изм}} + 0,02 \text{ Ом})$
	20,0...99,9	0,1	$\pm(0,02 \cdot R_{\text{изм}} + 0,2 \text{ Ом})$

Тестовый ток > постоянный ток 200мА при $R \leq 5 \text{ Ом}$ (включая измерительные провода)

Разрешение установки тестового тока: 1мА

Напряжение разомкнутой цепи (U XX): $6\text{В} \leq U_{\text{xx}} \leq 12\text{В}$

Таблица 4 - Измерение проводимости грунта (ρ)

Диапазон измерений	Разрешение	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения проводимости
0,60...19,99 Ом×м	0,01 Ом×м	$\pm(0,05 \cdot R_{\text{изм ш}} + 3k)$
20,0...199,9 Ом×м	0,1 Ом×м	
200,0...1999 Ом×м	1 Ом×м	
2,0...19,99 кОм×м	0,01 кОм×м	
20,0...125,5 кОм×м	0,01 кОм×м	

Примечание: $R_{\text{изм ш}}$ - измеренное значение полного электрического сопротивления заземления с использованием штырей заземления.

Разрешение к - единица младшего разряда в указанном диапазоне.

Расстояние между штырями 10 м

Тестовый сигнал: до 10 мА / 77,5 Гц

Напряжение ХХ: до 20 В

Таблица 5 - Режим измерения сопротивления изоляции

Тестовое постоянное напряжение, В	Диапазон измерений (МОм)	Разрешение (МОм)	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения сопротивления
50	0,01...9,99	0,01	$\pm(0,02 \cdot R_{\text{изм}} + 2k)$
	10,0...49,9	0,1	
	50,0...99,9	0,1	$\pm(0,05 \cdot R_{\text{изм}} + 2k)$
100	0,01...9,99	0,01	$\pm(0,02 \cdot R_{\text{изм}} + 2k)$
	10,0...99,9	0,1	$\pm(0,05 \cdot R_{\text{изм}} + 2k)$
	100,0...199,9	0,1	

Продолжение таблицы 5

250	0,01...9,99	0.01	$\pm(0,02 \cdot R_{\text{изм}} + 2k)$
	10,0...199,9	0,1	
	200,0...249	1	
	250...499	1	$\pm(0,05 \cdot R_{\text{изм}} + 2k)$
500	0,01...9,99	0.01	$\pm(0,02 \cdot R_{\text{изм}} + 2k)$
	10,0...199,9	0,1	
	200,0...499	1	
	500...999	1	$\pm(0,05 \cdot R_{\text{изм}} + 2k)$
1000	0,01...9,99	0.01	$\pm(0,02 \cdot R_{\text{изм}} + 2k)$
	10,0...199,9	0,1	
	200,0...999	1	
	1000...1999	1	$\pm(0,05 \cdot R_{\text{изм}} + 2k)$

Примечание; $R_{\text{изм}}$ - измеренное значение электрического сопротивления изоляции. Разрешение k - единица младшего разряда в указанном диапазоне.

Ток КЗ < 6,00 мА при 500 В тестового напряжения.

Тестовый измерительный ток > 2,2 мА при 500 В тестового напряжения на нагрузке 230 кОм.

Измерение параметров автоматических выключателей, управляемых дифференциальным током (ВДТ)

Номинальный тестовый ток ($I_{\Delta N}$): 10мА, 30мА, 100мА, 300мА, 500мА

Тип ВДТ : АС и А общего и избирательного исполнения по ГОСТ Р 51326.1-99

Тестовое напряжение Ф-3: 100-265 В; Частота: 50 Гц ± 0.5 Гц.

Таблица 6 - Измерение напряжения прикосновения $U_{п}$

Диапазон измерений (В)	Разрешение (В)	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения напряжения прикосновения
$0 \dots 2 U_{пп}$, где $U_{пп} = 25 \text{ В}$ или 50 В	0,1	$+(0,05 * U_{п \text{ изм}} + 0,3 \text{ В})$

Таблица 7 - Измерение отключающего тока

$I_{\Delta N}$	Тип ВДТ	Диапазон измерения $I_{\Delta N}$	Разрешение (мА)	Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения $I_{\Delta N}$
$I_{\Delta N} \leq 10 \text{ мА}$	АС	$(0,5 \dots 1,4) I_{\Delta N}$	0,1 $I_{\Delta N}$	Нижняя граница допуска: - 0 % Верхняя граница допуска: + 5%
	А	$(0,5 \dots 2,4) I_{\Delta N}$		
$I_{\Delta N} > 10 \text{ мА}$	АС	$(0,5 \dots 1,4) I_{\Delta N}$		
	А	$(0,5 \dots 2) I_{\Delta N}$		

Таблица 8 - Измерение частоты напряжения

Диапазон измерений (Гц)	Разрешение (Гц)	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения частоты
47,0 ... 63,6	0,1	$\pm(0,001 * f_{\text{изм}} + 0,1 \text{ Гц})$

Таблица 9 - Измерение переменного напряжения

Диапазон измерений (В)	Разрешение (В)	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения напряжения
15...460	1	$\pm(0,03 * U_{\text{изм}} + 2 \text{ В})$

Таблица 10 - Измерение сопротивления заземления с использованием
штырей заземления

Диапазон измерений (Ом)	Разрешение (Ом)	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения сопротивления
0,01 ... 19,99	0,01	$\pm(0,05 \cdot R_{\text{изм}} + 3k)$
20,0 ... 199,9	0,1	
200 ... 1999	1	

Примечание: R изм. - измеренное значение полного электрического сопротивления заземления с использованием штырей заземления.

Разрешение k - единица младшего разряда в указанном диапазоне.

Тестовый сигнал: до 10 мА / 77,5 Гц

Напряжение ХХ: до 20 В.

2.2 Энерготестер ПКЭ-А-А

Энерготестер ПКЭ-А-А совмещает в себе и измеритель параметров качества электроэнергии, и регистратор.

Область применения прибора для измерений показателей качества электрической энергии энерготестер-ПКЭ-А:

- 1) Измерения и регистрации параметров электрической энергии в однофазных и трехфазных электрических сетях: действующих значений напряжений и токов при синусоидальной и искаженной формах кривых; активной, реактивной и полной электрической мощности, и энергии;
- 2) Проверки работоспособности и правильности подключения энергетических измерительных преобразователей напряжения, тока, активной и реактивной мощности на местах их эксплуатации;
- 3) Проверки работоспособности и правильности подключения однофазных и трехфазных счетчиков электрической энергии без разрыва токовых цепей;

4) Измерения параметров вторичных цепей (мощности нагрузки) в системах учета электрической энергии;

5) Измерения потерь электроэнергии.

Энерготестер ПКЭ-А обеспечивает регистрацию с последующей передачей на персональный компьютер (ПК):

- Статистических данных по ПКЭ:

Количество измерений ПКЭ, попавших в нормально допускаемые пределы (НДП), предельно допускаемые пределы (ПДП) и не попавших в эти пределы в течение суток, при этом интервал усреднения для отклонения частоты составляет 10 с., для остальных ПКЭ 3 с., 10 мин., 2 ч глубина регистрации - 512 суток;

- Значений и длительностей провалов напряжения и перенапряжений;

- Значений кратковременной дозы фликера при интервале времени измерения 10 мин.;

- Значений ПКЭ по ГОСТ Р 51317.4.30 и параметров электрической сети со временем усреднения 3 сек., 10 мин. и 2 ч., глубина регистрации, не менее:

- 36 часов для времени усреднения 3 с,

- 12 месяцев при времени усреднения 10 мин,

- 4 месяца при времени усреднения 2 ч;

- Регистрация данных, поступающих непосредственно с АЦП, с частотой 10 кГц (3 фазы напряжения и 3 фазы тока) в режиме записи цифровой осциллограммы. Длительность регистрации - 1 час при отсутствии других архивов.

Основные метрологические характеристики энерготестера ПКЭ-А-А представлены в таблице 11.

Таблица 11 - Основные метрологические характеристики ПКЭ-А-А

Измеряемые величины	Диапазоны измерений	Пределы и вид допускаемой основной погрешности измерений
Среднеквадратическое значение напряжения переменного тока [U], В	от 0,01U _н до 2U _н	относительная, % $\pm[0,1+0,01(U_0/U-1)]$
Среднеквадратическое значение основной (первой) гармонической составляющей напряжения [U ₁], В	от 0,01U _н до 2U _н	относительная, % $\pm[0,1+0,01(U_0/U-1)]$
Напряжение постоянного тока [U _D], В	от 0,01U _н до 2U _н	относительная, % $\pm[0,2+0,02(U_н/U_D-1)]$
Угол фазового сдвига между основными гармоническими составляющими входных напряжений, градус	от 0 до 360	абсолютная, градус $\pm 0,1$
Частота переменного тока [f ₁], Гц	от 42,5 до 75	абсолютная, Гц $\pm 0,01$
Отклонение частоты, Гц	от -7,5 до 25	абсолютная, Гц $\pm 0,01$
Отрицательное отклонение напряжения, % от U ₀	от 0 до 100	абсолютная, % от U ₀ $\pm 0,1$
Положительное отклонение напряжения, % от U ₀	от 0 до 100	абсолютная, % от U ₀ $\pm 0,1$
Установившееся отклонение напряжения, % от U ₀	от -100 до 40	абсолютная, % от U ₀ $\pm 0,1$

Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности и по нулевой последовательности, %	от 0 до 20	абсолютная, % $\pm 0,15$
Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $[K_u]$, %	от 0 до 100	абсолютная, % $\pm 0,05$
		относительная, % $\pm 5,0$
Коэффициент гармонической составляющей напряжения порядка h $[K_u(h)]$, %	от 0 до 50	абсолютная, % $\pm 0,05$
		относительная, % $\pm 5,0$
Длительность временного перенапряжения, с	от 0,02 с до 600 с	абсолютная, с $\pm 0,02$
Напряжение прямой последовательности, нулевой последовательности и обратной последовательности, В	от 0 до $2U_N$	абсолютная, В $\pm 0,0015U_0$
Остаточное напряжение (при провале), В	от $0,01U_N$ до $1,1U$	относительная, % $\pm [0,1 + 0,01(U_0/U - 1)]$
Глубина провала напряжения, %	от 10 до 100	абсолютная, % $\pm 0,2$
Длительность провала напряжения, с	от 0,02 с до 600 с	абсолютная, с $\pm 0,02$

Максимальное значение напряжения при перенапряжении, В	от 1,1U _Н до 2U _Н	приведенная, % от U ₀ ±0,2
Кратковременная доза фликера, отн. ед	от 0,2 до 10	относительная, % ±5,0
Длительная доза фликера, отн. ед.	от 0,2 до 10	относительная, % ±5,0

На рисунке 5 представлена структурная схема энерготестера ПКЭ-А-А

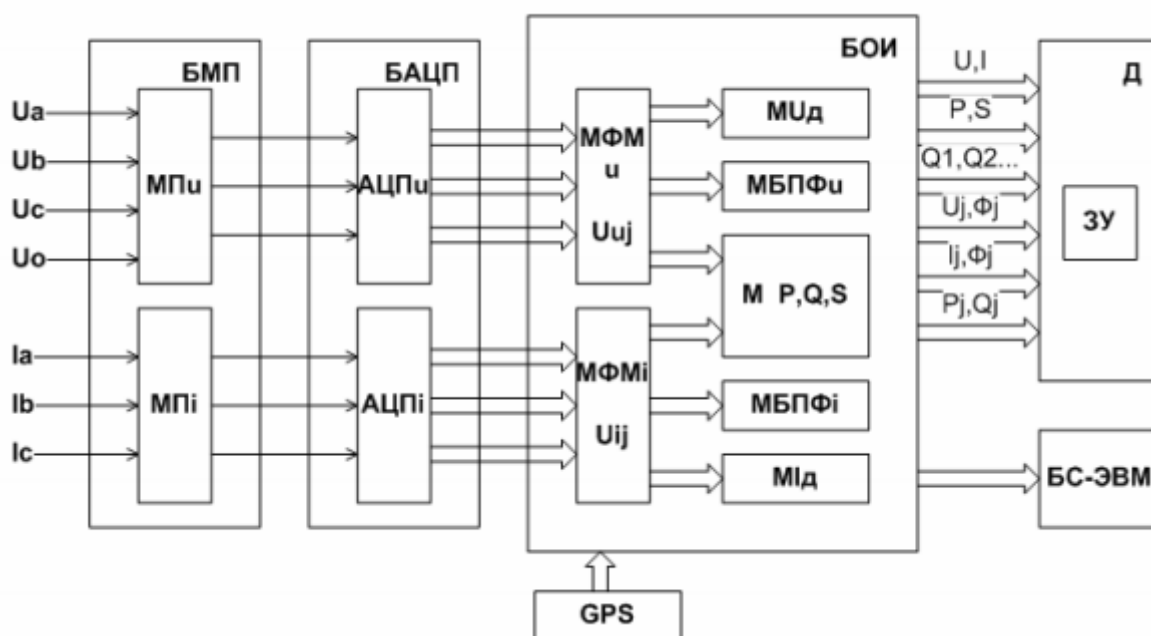


Рисунок 5 - Структурная схема энерготестера

«БМП — блок масштабных преобразователей напряжения (МПу) и тока (МПи); БАЦП — блок АЦП напряжения (АЦПу) и тока (АЦПи); Д — блок отображения информации (графический дисплей и клавиатура); ЗУ — запоминающее устройство; БС-ЭВМ — блок связи с ПК; GPS — приемник сигналов системы GPS; БОИ — блок обработки информации; МФМу, МФМи — модули формирования массивов мгновенных значений; МУд, МИд — модули вычисления действующих значений; М P,Q,S — модуль вычисления активной,

реактивной и полной мощностей; МБПФ_U, МБПФ_I — модули быстрого преобразования Фурье» [5].

«Работа Приборов основана на использовании принципа аналого-цифрового преобразования (АЦП) с использованием «метода выборок». В БМП трехфазные напряжения и токи подвергаются масштабному преобразованию до уровня 5В, соответствующего значению диапазона измерения U и I. Мгновенные значения сигналов силы тока и напряжения преобразуются в цифровые коды шестью АЦП и передаются в БОИ, где формируются массивы мгновенных значений сигналов напряжения U_{cj} и тока I_{ij} (j — номер выборки). Результаты вычисленных значений измеряемых величин, полученные с помощью программных модулей, отображаются на дисплее Д, сохраняются в памяти и выводятся при необходимости на внешний ПК» [5].

Приборы одновременно могут измерять все параметры цепи переменного тока: ток, напряжение, частота, углы, коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения (с 1-й по 50-ю), активную, реактивную и полную мощность.

БМП включает в себя токоизмерительные клещи (или измерительные трансформаторы тока — 3 шт.) калиброванные индивидуально с соответствующим измерительным каналом, и три делителя напряжения. Реле БМП управляются командами от платы процессора. Процессор выдает команды потенциалами для переключения входов напряжения. Контроллер выводит текущее значение предела измерения на графический дисплей. Реле служат для переключения пределов входных напряжений для входных преобразователей.

Плата АЦП представляет собой 6 идентичных независимых каналов для преобразования мгновенного значения входного аналогового сигнала $\pm 5В$ в 24-разрядное представление. Канал содержит две микросхемы: входной усилитель и собственно АЦП. В качестве входного усилителя используется микросхема AD8656, имеющая малое смещение выходного напряжения, малый температурный дрейф и ультрамалые входные токи, что необходимо для согласования с масштабными преобразователями. Входное сопротивление

канала более 50 МОм. Сигнал с выхода усилителя поступает на вход собственно АЦП, в качестве которого используется микросхема, обеспечивающая полное 24-разрядное преобразование «без потерь кода» и выдающая информацию в последовательном коде процессору по его запросу. Плата измерительная обеспечивает оцифровку уровней напряжений, поданных на измерительные входы и вывод результатов в плату процессоров.

Плата процессора обеспечивает управление работой Энерготестера, проведение расчетов по массивам оцифрованных выборок от измерительной платы, сохранение результатов в энергонезависимой памяти, счет времени, обмен с внешними устройствами (компьютерами), вывод результатов на индикатор, прием команд и данных от клавиатуры. Плата контроллера является центральной платой, отвечающей за работоспособность Энерготестера в целом. Основу контроллера составляют двухядерный сигнальный процессор производства «Texas Instruments». Такое решение позволяет гибко и оперативно менять программное обеспечение Энерготестера, не затрагивая его аппаратной части. Результаты полученных от АЦП данных обрабатываются в соответствии с заложенной программой и отображаются на графическом дисплее. Расчет производится на основании измерений АЦП за 0,2 с, при этом на частоте 50 Гц на один период приходится 800 измерений. Текущие значения выводятся на ЖКИ каждые 3 с.

Запоминающее устройство служит для хранения данных, полученных в результате измерения.

Блок питания служит для выработки необходимых напряжений для платы процессора и измерительной платы.

Дисплей графический жидкокристаллический (ЖКИ) устанавливается на переднюю панель и соединяется с платой процессора. Клавиатура мембранная устанавливается на переднюю панель и соединяется с платой процессора. С помощью клавиатуры можно управлять видом отображаемых данных, вводить требуемые значения и выполнять другие сервисные и технологические операции.

Приемник сигналов системы GPS служит для синхронизации внутренних часов прибора со шкалой UTC, что обеспечивает реализацию алгоритмов расчёта ПКЭ в соответствии с ГОСТ 30804.4.30 (ГОСТ Р 51317.4.30) класс А и маркирование данных.

2.3 Fluke 1736

Идеальный тестовый инструмент для проведения исследований энергии и базовой регистрации качества электроэнергии, автоматически получает и регистрирует более 500 параметров качества электроэнергии, обеспечивая лучший обзор данных, необходимых для оптимизации надежности и экономичности системы.

С помощью четырех гибких токоизмерительных датчиков измеряет все 3 фазы и нейтраль.

В приборе может быть сохранено более 20 отдельных сеансов регистрации. Фактически, все измеренные значения автоматически регистрируются, так что вы никогда не потеряете графики измерений.

Регистрация провалов, выбросов, и пусковых токов: включает снимок сигнала события и профиль RMS высокого разрешения с указанием даты, метки времени и серьезности, чтобы помочь определить потенциальные причины проблем с качеством электроэнергии.

Область применения Fluke 1736:

- 1) проверка возможностей электрической системы перед добавлением нагрузок
- 2) определение потребления энергии до и после внесения улучшений для подтверждения эффективности энергосберегающих устройств
- 3) обнаружение гармонических искажений, которые могут привести к повреждению или нарушению нормального режима работы важных узлов оборудования
- 4) контроль провалов, выбросов и пусковых токов, вызывающих ложные сбросы или несвоевременное отключение выключателя.

Таблица 12 - Погрешности измерения параметров Fluke 1736

Параметр		диапазон	Макс. разрешение	Собственная погрешность при нормальных условиях (% от показаний + % от полной шкалы)
Напряжение		1 000 В	0,1 В	$\pm (0,2 \% + 0,01 \%)$
Сила тока	i17xx-flex 1500 12"	150 А	0,1 А	$\pm (1 \% + 0,02 \%)$
		1 500 А	1 А	$\pm (1 \% + 0,02 \%)$
	i17xx-flex 3000 24"	300 А	1 А	$\pm (1 \% + 0,03 \%)$
		3000 А	10 А	$\pm (1 \% + 0,03 \%)$
	i17xx-flex 6000 36"	600 А	1 А	$\pm (1,5 \% + 0,03 \%)$
6000 А		10 А	$\pm (1,5 \% + 0,03 \%)$	
Клещи i40s-EL	4 А	1 мА	$\pm (0,7 \% + 0,02 \%)$	
	40 А	10 мА	$\pm (0,7 \% + 0,02 \%)$	
Частота		От 42,5 до 69 Гц	0,01 В	$\pm (0,1 \%)$
Мин./макс. напряжение		1 000 В	0,1 В	$\pm (1 \% + 0,1 \%)$
коэффициент гармоник по напряжению		1 000 %	0,1 %	$\pm 0,5$
коэффициент гармоник тока		1 000 %	0,1 %	$\pm 0,5$
Гармоники напряжения со 2-й по 50-ю		1 000 В	0,1 В	$\geq 10 \text{ В: } \pm 5 \%$ показаний
Несимметрия		100 %	0,1 %	$\pm 0,2$

Fluke 1736 выполняет следующие измерения:

- Основные измерения: Напряжение (В), ток (А), частоту (Гц), указание порядка чередования фаз, 2 канала постоянного тока (поддерживают устанавливаемые пользователем внешние датчики для выполнения таких измерений, как температура, влажность и скорость ветра)
- Мощность: активная мощность (Вт), полная мощность (ВА), неактивная мощность, (var), коэффициент мощности.
- Мощность основной гармоники: активная мощность основной гармоники (Вт), полная мощность основной гармоники (ВА), реактивная мощность основной гармоники (var), DPF (Cos Φ)
- Энергия: активная энергия (Вт-ч), эффективная энергия (ВА-ч), неактивная энергия (вар-ч)
- Энергопотребление: энергопотребление (Вт-ч), максимальное энергопотребление (Вт-ч), стоимость электроэнергии
- Гармоники: гармонические составляющие до 50-й гармоники включительно и суммарное гармоническое искажение напряжения и тока.

Трехфазный регистратор потребляемой мощности Fluke 1736, совместимый с мобильным приложением Fluke Connect® и программой для настольного компьютера, предоставит вам все данные, необходимые для принятия критических решений относительно качества электроэнергии в реальном времени. Лучший тестовый инструмент для энергетических исследований и регистрации показателей качества электроэнергии, 1736 автоматически получает и регистрирует более 500 параметров качества электроэнергии, обеспечивая лучший обзор данных, необходимых для оптимизации надежности и экономичности системы.

2.4 АКЭ-824

Измерительный прибор анализатор качества электроэнергии АКЭ-824 представляет абсолютно новый подход к электрическим средствам измерения на основе анализа показателей качества сетевого напряжения общего

назначения (ПКЭ). Прибор на основе Windows CE позволяет производить автоматизированный, простой, удобный и быстрый анализ огромного количества данных, что было бы невозможно сделать, используя любую другую систему.

АКЭ-824 позволяет произвести:

- 1) Визуализацию в реальном времени числовых значений любых электрических параметров однофазных (1ф) и трехфазных 3-проводных или 4-проводных систем (3ф 3пр/ 3ф 4пр).
- 2) Гармонический анализ напряжений и токов вплоть до 49-ого порядка, детектирование и регистрация аномалий напряжения (выбросов, перенапряжений, провалов, отклонений) с разрешающей способностью 10 мсек.
- 3) Измерение входных напряжений, разбаланса напряжений, измерения бросков пускового тока, фликера: кратковременная (Pst) и длительная (Plt) доза.
- 4) Измерение коэфф. несимметрии: по обратной последовательности (NEG%); по нулевой последовательности (ZERO%).
- 5) Детектирование и быстрый анализ импульсов напряжения с разрешением 5 мкс.
- 6) Отображение в реальном времени любой формы входного сигнала, графиков гистограмм гармонического анализа и векторных диаграмм общих углов между напряжениями и токами.
- 7) Определение последовательности чередования фаз (SEQUENCE).
- 8) Запись в энергонезависимую память прибора:
 - TRMS-значений напряжений (5 входов) и токов (4 входа),
 - результатов гармонического анализа,
 - значений мощности (активной, реактивной и полной), коэфф. мощности и $\cos\varphi$,
 - энергии (активной, реактивной и полной),
 - аномалий напряжения.

Аномалии напряжения (отклонения от норм)

Прибор способен детектировать и осуществлять регистрацию в качестве аномалий напряжения все такие его TRMS значения, которые находятся вне пределов максимального ($Lim+$) и минимального ($Lim-$) отклонения от уровня опорного (номинального) напряжения = $U_{оп}$ (V_{ref}). Данные значения вычисляются на интервале полпериода частоты напряжения. т.е. за каждые 10 мс для 50 Гц (за 8,3 мс для 60 Гц). В процессе выбора параметров регистрации пределы отклонения от выбранного номинального значения могут быть заданы в процентах: от $\pm 1\%$ до $\pm 30\%$ (с шагом 1%). Эти пределы остаются неизменными в течение всего периода текущей регистрации. Максимальное количество аномалий, доступных для регистрации анализатором составляет 20.000 событий.

Гармоники напряжения и тока

Любой периодический несинусоидальный сигнал может быть представлена как сумма синусоидальных составляющих колебаний (гармоник), частота каждой, из которых определяется кратным коэффициентом от частоты основной гармоники.

Присутствие гармоник: причины

Любое устройство, которое изменяет форму синуса или вносит только частичный вклад в формирование причин таких искажений формы волны, вызывает явление возникновения кратных (четных и нечетных) гармоник.

Все текущие сигналы (напряжение, ток) в некотором роде уже фактически искажены. Наиболее обычная ситуация - гармоническое искажение, вызванное использованием нелинейных нагрузок, таких как электрические бытовые приборы, персональные компьютеры или блоки управления приводов для двигателей (ст. машина, пылесос и др.). Гармоническое искажение являются причиной существенных токов потребления на частотах, которые являются нечетными гармониками основной частоты.

Токи гармонических составляющих в значительной мере воздействуют на нулевой провод (нейтраль) электрических сооружений. В большинстве стран,

система энергоснабжения является 3-х фазной (50/60Гц), первичная обмотка трансформатора – по схеме «треугольник» (Δ-дельта), а вторичная - «звезда». Обычно вторичная обмотка обеспечивает $U \sim 230\text{В}$ между фазой и нейтралью или $\sim 400\text{В}$ между фазами. Сбалансированность нагрузок на каждой фазе (т.е. их равномерное распределение) всегда представляет определенную трудность (предмет головной боли) для проектировщиков энергосистем распределения и электропитания.

Еще около 10 лет назад, в хорошо сбалансированной системе, векторная сумма токов в нейтральной цепи была равна нулю или имела весьма низкое значение (в виду трудности получения полного баланса). Применяемые в сетях освещения лампы, маломощные двигатели и другие устройства, которые являлись в основном линейными нагрузками. В результате обеспечивался по существу синусоидальный ток в каждой фазе при малом значении тока в цепи нейтраль частоты 50Гц.

"Современные" устройства: телевизоры, флуоресцентные лампы, видео, устройства оргтехники и микроволновые (СВЧ) печи обычно вызывают искажение формы тока только для части каждого периода, вызванного нелинейными нагрузками и как следствие, наличие нелинейных токов. Все это является причиной появления нечетных гармоник 50Гц - частоты питающей сети. По этой причине, ток в распределительных устройствах (РУ) и распределительных трансформаторах, наряду с гармониками 50Гц содержит также и составляющие 150Гц, а также другие значимые гармоники до 750 Гц и даже выше.

Векторная сумма токов в хорошо сбалансированной энергосистеме, которая питает нелинейные нагрузки и потребителей может в итоге быть весьма низкой. Однако, это суммирование не устраняет негативного влияния всех токовых гармоник. Нечетные гармоники, кратные 3-й третьей основной гармонике (называемые "TRIPLENS") объединенные вместе и протекающие в нейтрали могут привести к перегреву трансформатора даже при условии сбалансированности нагрузок.

Присутствие гармоник: последствия

Как правило, четные гармоники, то есть 2-я, 4-я и т.д., не создают проблем при эксплуатации электросетей. Тройные гармоники, нечетные гармоники кратные 3-й третьей основной гармонике, накладываясь в цепи друг на друга (вместо взаимной компенсации), создают условия для перегрева провода, что является чрезвычайно опасным. Проектировщики при проектировании и пользователи при эксплуатации систем распределения электроэнергии, которые наверняка будут содержать гармонический ток должны учитывать нижеперечисленные проблемы:

- нулевой провод должен иметь достаточное сечение;
- трансформатор распределения должен иметь дополнительную систему охлаждения, чтобы в случае присутствия гармоник обеспечить его номинальную мощность и рассеивание тепла. Это необходимо по причине того, что гармонический ток в нулевом проводе вторичной обмотки циркулирует и в связанной с ним первичной обмотке, выполненной по схеме «треугольник» (Δ -дельта). Этот циркулирующий ток гармоник вызывает перегрев трансформатора;
- токи гармоник в фазах отражаются от первичной обмотки и возвращаются назад к источнику напряжения (энергии). Это может вызывать искажение формы волны напряжения в такой степени, что не хватит возможностей устройств коррекции коэффициента мощности (КРМ) для ее исправления (т.е. превышение возможностей КРМ).

5-я и 11-я гармоника противоположная по фазе току, протекающему через электродвигатели, затрудняют управление им и приводят к сокращению их среднего срока службы. Как правило, чем выше порядковый номер гармоники, тем меньше ее энергия и, следовательно, воздействие, которое она будет оказывать на потребителей и устройства (кроме трансформаторов).

Пусковые токи, броски (Inrush)

Приборы серии АКЭ-82х способны в реальном времени детектировать события связанные с бросками тока, характерными обычно для пусковых токов электрических механизмов и машин. Это может быть связано с другими ситуациями: моменты переключения нагрузок, срабатывания защитных устройств, колебания токов до установившегося значения (осцилляция) и т.д. Типичный вид пускового тока показан на рисунке 6.

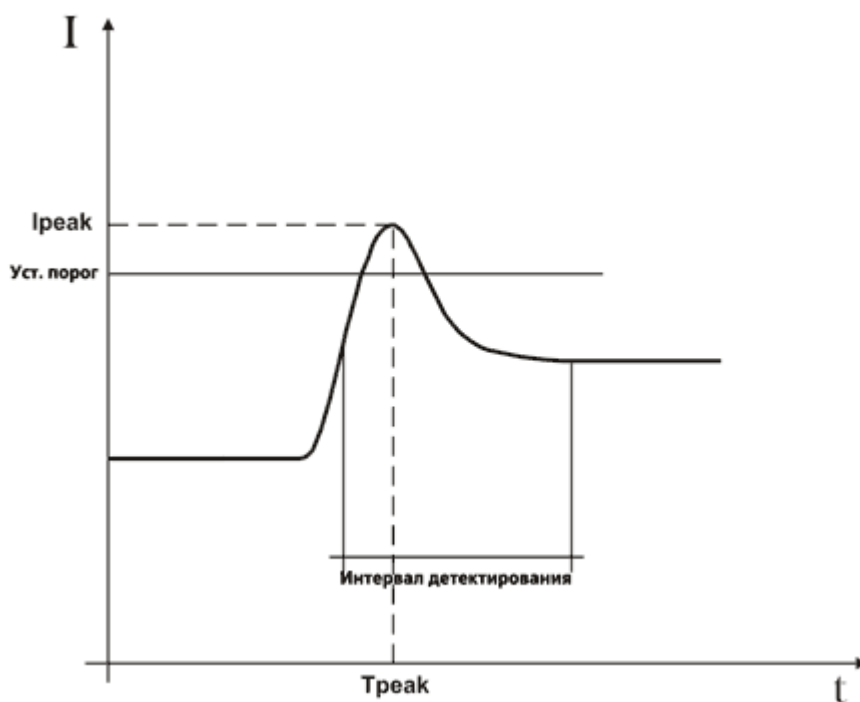


Рисунок 6 - Параметры, характеризующие бросок тока

Однако броски тока могут быть связаны и с другими ситуациями: маневрирование нагрузками, переключение фидеров электропитания, срабатывание защитных устройств, колебания токов до установившегося значения (осцилляция, рисунок 7) и т.д.

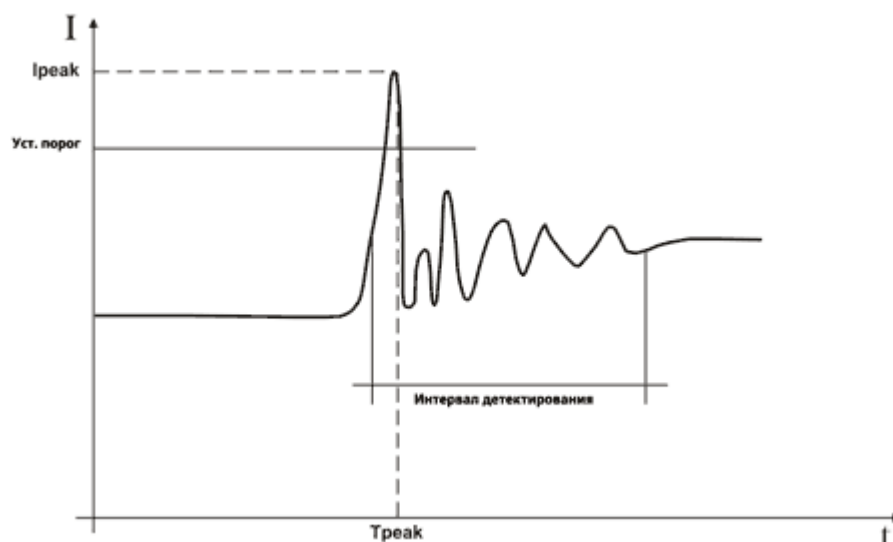


Рисунок 7 - Параметры, характеризующие пульсации после броска тока

Прибор обнаруживает и регистрирует как «пусковой ток» все такие события, при которых текущее TRMS значение тока превышает установленный оператором порог (лимит). Максимальное число сохранённых событий 1000 бросков.

Фликер

В соответствии с теоретическим определением, фликер возникает вследствие колебаний напряжения сетевого питания и появляется в виде изменения светового потока от обычной лампы накаливания (мерцание).

Основная причина появления фликера – это резкие включения/выключения больших нагрузок, подключенных к данной электрической сети.

С помощью фликерметров, возможно получить отношение между искаженным и идеальным сигналом, а также провести статистический анализ.

Разбаланс напряжения (Unbalance)

При нормальных условиях источник напряжения и оконечная нагрузка должны быть идеально сбалансированы. Разбаланс может возникать при

ошибках (сбоях) в системе питания. Кроме того, баланс в однофазной сети может быть только статистическим.

Для оценки разбаланса системы применяется теория симметричных компонентов. Исходя из этой теории, всегда возможно любую тройку векторов разложить на 3 вида троек: прямая (положительная) последовательность, обратная (отрицательная) последовательность и нулевая последовательность.

На основе анализа этих результатов следует, что любую разбалансированную трехфазную систему можно разложить на 3 трехфазные системы, которые могут быть упрощены до отдельного изучения 3 однофазных систем относительно прямой, обратной и нулевой последовательностей соответственно.

Прибор осуществляет измерение и запись следующих параметров, которые характеризуют разбаланс напряжения энергосистемы:

$NEG\% = \frac{E_r}{E_d} \times 100 =$ коэфф. несимметрии по обратной
последовательности

$ZERO\% = \frac{E_0}{E_d} \times 100 =$ коэфф. несимметрии по нулевой
последовательности

где:

E_r = обратная последовательность

E_d = прямая последовательность

E_0 = нулевая последовательность

Импульсы напряжения/ Spikes

Прибор анализирует все возможные события, связанные с фазным напряжением, удовлетворяющие следующим критериям и условиям: быстрое изменение крутизны нарастания кривой сигнала напряжения (больше заданной), превышение порога, заданного пользователем. Максимальное количество записываемых событий – 4 импульса за половину периода $f=50$ Гц. Максимальное общее количество регистрируемых событий – до 20000. Для

пояснения возможностей анализа приведён пример типичного импульса напряжения (рис. 8):

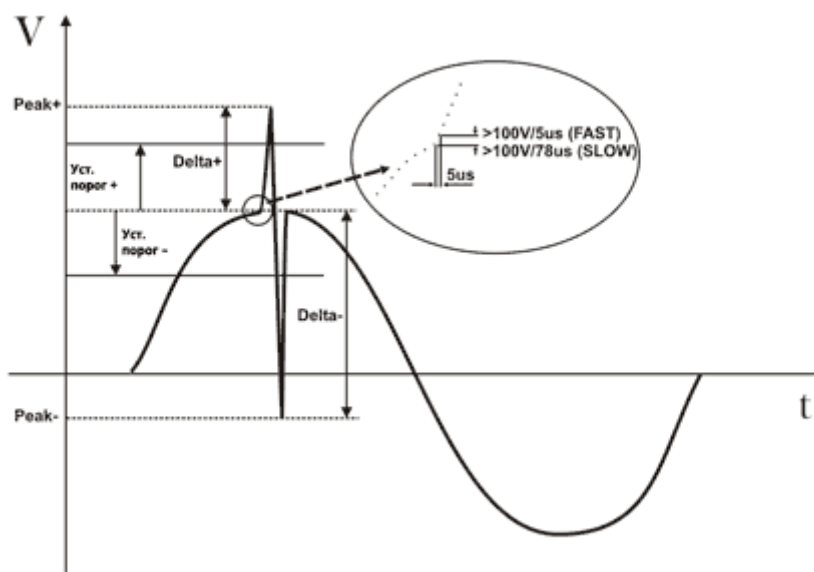


Рисунок 8 - Типичный импульс напряжения (частота 50 Гц)

Прибор на входе непрерывно проверяет и преобразует с помощью 2-х 16 битных АЦП напряжение сигнала одновременно по двум внутренним параллельным трактам с различной частотой дискретизации: SLOW / медленно: оцифровка с частотой 256 выборок за период 50 Гц FAST / , быстро: оцифровка с частотой дискретизации 200 кГц. При возникновении на входе события, прибор автоматически проверяет его на соответствие одному из следующих условий: $dV/dt > 100V/5ms > FAST$ $dV/dt > 100V/78ms > SLOW @ 50Hz$ во время интервала регистрации, определяемого как: $32 \times 5ms = 160ms$ $32 \times 78ms = 2.5ms$. Положительный и отрицательный выбросы (DELTA + и DELTA -) определяются, если амплитуда импульса превышает условное «сито», заданное пользователем. По окончании записи на дисплее прибора отображается общее количество зарегистрированных событий.

2.5 Лабораторный стенд для измерения параметров электрических сетей

Короткое замыкание, перегрузка сети и обрыв линий – основные неприятности, которые возможны в процессе электроснабжения. И если, обрыв сети чаще всего приносит просто дискомфорт, то короткое замыкание и перегрузка сети могут являться причиной пожаров. К сожалению, об этом большинство людей задумывается только тогда, когда это произошло. Для того чтобы электроснабжение было без перебоев и безопасным, необходимо соблюдать несколько правил. Во-первых, производить электромонтажные работы, подключения электрооборудования и ремонт силами профессионалов в данной области, во-вторых, ответственно относиться к эксплуатации электроприборов и электросети (например, не перегружать розетки электроприборами и т.п.), в-третьих, периодически производить обследование электрохозяйства с целью профилактики неисправностей электропроводки, аппаратов защиты и заземления.

Для того, чтобы следить за состоянием электроснабжения используют различные приборы, тестеры, мультиметры. Мы рассмотрели несколько приборов для измерения показателей качества электроэнергии. Но самым доступным для нас является многофункциональный электрический тестер МЭТ-5035.

МЭТ-5035 - это многофункциональный измеритель параметров электрических сетей. К основным функциям данного электроизмерительного прибора относятся: измерение сопротивления электроизоляции кабелей и проводов, измерение параметров срабатывания устройств защитного отключения (УЗО) типов А и АС, измерение полного сопротивления петли (цепи) "фаза-нуль" и расчет ожидаемого тока короткого замыкания, измерение сопротивления заземляющих устройств и сопротивление контактных соединений в системе заземления и др. С помощью прибора МЭТ-5035 инженеры-электрики производят практически полный спектр измерений

параметров электрических сетей с целью поиска слабых мест электроустановки. Функциональная схема МЭТ 5035 изображена на рисунке 9.

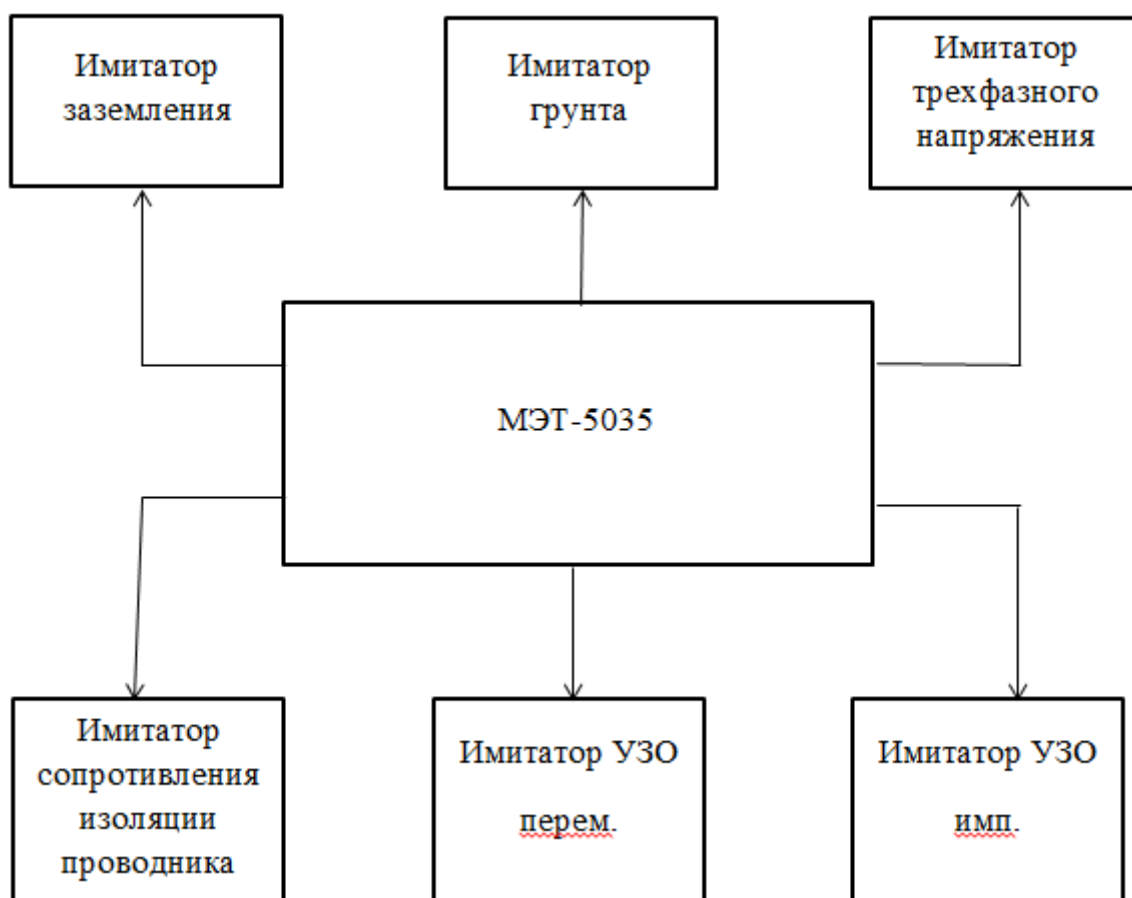


Рисунок 9 - Функциональная схема МЭТ-5035

При помощи имитатора заземления можно проверить целостность и измерить сопротивление защитных проводников заземления и зануления тестовым током 200 мА и напряжением от 4 до 24 В(постоянное, без нагрузки).

При помощи имитатора грунта можно измерить сопротивление контура заземления и проводимости грунта с использованием дополнительных штырей-заземлителей.

При помощи имитатора трехфазного напряжения можно измерить полное сопротивление петли «ф-н» и «ф-з» и вычислить ожидаемый (предполагаемый) ток короткого замыкания. Измерить полное сопротивление «ф-з» и полное

сопротивление заземления без отключения УЗО и вычислить ток короткого замыкания, индикацию порядка чередования фаз.

При помощи имитатора сопротивления изоляции проводника можно измерить сопротивление изоляции при тестовом испытательном напряжении 50 В, 100 В, 250 В, 500 В, 1000 В.

При помощи имитаторов УЗО переменного и импульсного тока можно измерить следующие параметры:

- время срабатывания;
- дифференциальный отключающий ток;
- напряжение прикосновения;
- полное сопротивление заземления.

2.6 Расчет основных параметров трехфазного трансформатора

Повышение и понижение напряжения переменного тока и выполняют силовые трансформаторы. Трансформаторы сами электрическую энергию не производят, а только ее трансформируют, т. е. изменяют величину электрического напряжения. При этом трансформаторы могут быть повышающими, если они предназначены для повышения напряжения, и понижающими, если они предназначены для понижения напряжения. Но принципиально каждый трансформатор может быть использован либо как повышающий, либо как понижающий в зависимости от его назначения, т. е. он является обратимым аппаратом. Силовые трансформаторы обладают весьма высоким коэффициентом полезного действия (к. п. д.), значение которого составляет от 95 до 99,5%, в зависимости от мощности. Трансформатор большей мощности имеет соответственно и более высокий к. п. д.

Для безопасного проведения измерений на лабораторном стенде следует установить трехфазный трансформатор малой мощности в 0,3 кВА и понизить входное напряжение с 380 В. до 38 В. Далее приведем расчет основных параметров этого трансформатора. $P_0=40\text{Вт}$, $P_k=40\text{Вт}$, $U_k=5,5\%$, $I_0=4\%$. Напряжение вторичной обмотки при активно-индуктивной нагрузке,

составляющей 75% от номинальной ($\beta=0,75$) и $\cos\varphi_2=0,9$; к.п.д. при нагрузке, составляющей 50% ($\beta=0,5$) от номинальной и $\cos\varphi_2=0,8$.

У трансформатора первичная обмотка соединена в звезду, а вторичная – в треугольник, поэтому фазные напряжения равны:

$$U_{1\phi} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} \approx 220 \text{ В}$$

$$U_{2\phi} = U_{2H} = 36 \text{ В}$$

Фазный и линейный коэффициенты трансформации соответственно равны:

$$n_{\phi} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{220}{36} \approx 6$$

$$n_{л} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{380}{36} \approx 11$$

Номинальные токи первичной и вторичной обмоток определим из формулы номинальной мощности трансформатора:

$$S_H = \sqrt{3}U_{2H}I_{2H} = \sqrt{3}U_{1H}I_{1H}$$

Откуда

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{1H}} = \frac{0,3}{1,73 \times 0,38} = 0,46 \text{ А}$$

$$I_{2H} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{2H}} = \frac{0,3}{1,73 \times 0,036} = 4,82 \text{ А}$$

Находим активные сопротивления обмоток R_1 и R_2 , с учетом того, что в каждой обмотке трансформатора по три фазы и ток короткого замыкания I_k равен номинальному току I_{1H} :

$$R_1 = \frac{P_K}{2 \times 3 \times I_{I_k}^2} = \frac{P_K}{2 \times 3 \times I_{1H}^2} = \frac{60}{6 \times 6^2} = 0,28 \text{ Ом}$$

$$R_2 = \frac{P_K}{2 \times 3 \times I_{2H\phi}^2} = \frac{60}{6 \times 2,79^2} = 1,28 \text{ Ом}$$

$$I_{2\text{н}\phi} = \frac{I_{2\text{н}}}{\sqrt{3}} = \frac{4,82}{1,73} = 2,79 \text{ A}$$

U_a и U_p – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, выраженные в процентах

$$\Delta U = \left[\frac{U_{2\text{н}} - U_2}{U_{2\text{н}}} \right] 100 \approx \beta (U_a \cos \varphi_2 + U_p \sin \varphi_2) = 2,7\%$$

$$U_a = \frac{P_k}{S_n} \times 100\% = 0,2 \%$$

$$U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2} = 5,5 \%$$

В свою очередь S_n – это мощность всех трех фаз, а P_k – мощности потерь в тех фазах, указанные в паспорте.

Следовательно,

$$U_2 = U_{2\text{н}} \frac{1 - \Delta U}{100\%} = 36 \times 1 - 0,027 = 35\text{В1}$$

К.п.д. трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta \times S_n \cos \varphi \times 100\%}{\beta \times S_n \cos \varphi + P_0 + \beta^2 P_k} = 97\%$$

Вывод по главе 2

В данной главе рассмотрели приборы для измерения показателей качества электроэнергии такие как: многофункциональный тестер МЭТ-5035, энерготестер ПКЭ-А-А, тестовый инструмент Fluke 1736 и анализатор качества электроэнергии АКЭ-824. И на основе прибора МЭТ-5035 составили структурную схему лабораторного стенда для измерения показателей качества электроэнергии. А также рассчитали основные параметры трехфазного трансформатора для безопасного проведения измерений.

3 Методика проведения измерений

В данной главе мы рассмотрим методики измерения, прибором МЭТ-5035, таких параметров как:

- измерение сопротивления заземления;
- измерение сопротивления грунта;
- измерение сопротивление изоляции проводов;
- измерение полного сопротивления цепи, сопротивления КЗ и вычисление ожидаемого тока КЗ;
- проверку импульсного и переменного УЗО

А также составим схему определения времени срабатывания УЗО.

3.1 Методика измерения сопротивления заземления

Надёжная защита от поражения электрическим током на предприятии, обеспечивается электроизоляцией токопроводящих частей и заземлением металлических конструкций. Кроме того, заземление требуется, чтобы электроустановки работали нормально. Периодически проверяется его сопротивление растеканию тока в грунте (R_z).

Виды заземления:

1) Рабочее – заземление определённых мест, например, нейтральных точек трансформаторов. Служит для правильной эксплуатации электроустановок.

2) Защита от молний – заземление приёмников молний для стока возникающих токов на металлоконструкции, в жилом доме или другом строении.

3) Защитное – заземление корпусов бытовых приборов или не токопроводящих частей электроустановок. Защищает от поражения электрическим током при случайном прикосновении к деталям, не предназначенным для пропускания электрического тока.

Заземляющие устройства (ЗУ) должны снимать заряды с частей электроустановок, на которых не должно быть напряжения, образующегося в следующих случаях:

- статическое электричество;
- наведение напряжения;
- вынос потенциала;
- электрический разряд.

В качестве устройства (очага) заземления, выступает закопанный в грунт контур из металлических стержней, вместе с подключёнными к нему проводниками. Место соединения с ЗУ провода от защищаемого оборудования называется точкой заземления.

В большей степени напряжение появляется, когда нарушается изоляция или повреждаются проводники. В обычных условиях контур защитного заземления контактирует с корпусами бытовых приборов и не работает, пока на нём по какой-либо причине не появится потенциал.

Когда цепи исправны, через него не проходят никакие токи, кроме фоновых. Как только на металлическом корпусе бытового электроприбора появляется потенциал, начинается его стекание на землю, через заземляющий контур.

При этом на нетоковедущих частях из металла, напряжение должно снижаться до более низкого уровня. Если нарушается целостность контура заземления или соединённых с ним проводов, напряжение на них остаётся высоким со стороны источника тока, что представляет значительную опасность для человека.

Периодичность замеров сопротивления защитного заземления регламентируется ПТЭЭП (1 раз в 6 лет). Кроме того, делается регулярная проверка его исправности.

Для проверки соответствия ЗУ, нормативным требованиям, производится замер его сопротивления растеканию тока R_z . В идеале оно должно быть равно нулю, но на практике это невозможно.

Величина (R_z) складывается из нескольких составляющих:

1) Сопротивление металла, закопанного в грунт электрода и на его контакте с проводником. В связи с хорошей проводимостью применяемых материалов (сталь с медным покрытием или медь), а также при надёжном соединении с проводом, величинами сопротивлений обычно пренебрегают.

2) Сопротивление между грунтом и штырём, которым можно пренебречь, если электрод сидит плотно, а его место контакта свободно от краски и других диэлектрических покрытий. Со временем сталь корродирует, и электропроводность электрода снижается. Поэтому целесообразно использовать омедненные стержни и периодически измерять сопротивление растеканию. Места сварки покрываются лаком, чтобы уменьшить коррозию.

3) Сопротивление грунта – это основной фактор, который следует учитывать. Особенно это относится к близлежащим слоям. По мере удаления их, сопротивление снижается, и на определённом расстоянии принимается за нулевое.

4) Неоднородность электрических характеристик грунта трудно учесть. Поэтому важным является замер фактического R_z . На одиночную простую конструкцию заземлителя, преимущественно влияют поверхностные слои грунта, а на контурную – глубинные слои.

Проверке подвергаются искусственные ЗУ, которые выполняются в виде одиночных электродов или контуров. К ним не относятся PEN,-и PE-проводники, входящие в виде отдельной жилы в состав кабеля.

Искусственные ЗУ выполняются в виде:

1) Углублённого заземлителя из горизонтальных стальных полос или круга, уложенных на дно котлована.

2) Вертикального заземлителя из угловой стали – вбиваемых стержней или труб. Они размещаются в грунте на дистанции не меньше их длины и объединяются в контур горизонтальными полосами или круглым стержнем на глубине около 0,5 м. Распространённой конструкцией в частном доме, и не

только в нём, является треугольная. Обязка для заземляющих электродов учитывается в расчётах.

Методика основана на законе Ома для определённого места электроцепи. Величина сопротивления вычисляется, если к ЗУ от источника напряжения подать ток и измерить его с высокой точностью. В принципе это можно сделать мультиметром, но погрешность здесь будет высокая. Поэтому применяются только приборы высокой точности.

Измерение сопротивления заземлителя прибором МЭТ 5035.

В МЭТ 5035 встроенный генератор преобразует напряжение постоянного тока в напряжение переменного тока частотой 77,5 Гц. Для измерения сопротивления заземлителя при помощи МЭТ 5035 используются вспомогательный электрод, служащий для создания цепи прохождения тока через испытываемый заземлитель, а также потенциальный электрод, служащий для измерения падения напряжения на заземлителе.

Сопротивление измеряется вольтамперметрическим методом с использованием 4-х измерительных проводов, поэтому измеренное значение сопротивления не зависит от используемых кабелей. По этой причине этот метод не требует проведения никакой дополнительной калибровки измерительных проводов.

Кнопка FUNC обеспечивает выбор одного из следующих видов измерений (которые могут выбираться последовательно при каждом очередном ее нажатии):

- «2P» (прибор производит измерение сопротивления заземления между двумя точками).

- «3P» (прибор производит измерение сопротивления заземления с использованием двух дополнительных штырей).

Проведение измерений сопротивления заземления 2-х полюсным методом «2P»:

1. Выбираем режим «2P» измерения сопротивления заземления с помощью кнопки FUNC.

2. Соединяем черный, красный, зеленый и синий тестовые провода с соответствующими с входными гнездами прибора В1, В2, В3 и В4 как указано на рисунке 1

3. Соединяем черный и зеленый провода к заземлителю контура, а красный и синий – к дополнительному (вспомогательному) штырю заземления как указано на рисунке 10.

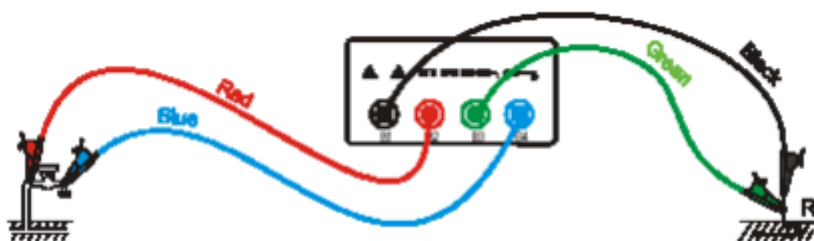


Рисунок 10 - Подключение прибора для измерения сопротивления заземления 2-х полюсным способом (2P)

4. Нажимаем кнопку СТАРТ/СТОП. Прибор начинает тестирование.

По завершении тестирования прибор выдает на экран Сопротивление заземления, выраженное в Омах и усредненное значение сопротивления заземления, вычисленное по результатам тестов.

Проведение измерений сопротивления заземления 3-х полюсным методом «3P».

1. Выбираем режим «3P» измерения сопротивления заземления с помощью кнопки FUNC.

2. Соединяем черный, красный, зеленый и синий тестовые провода с соответствующими с входными гнездами прибора В1, В2, В3 и В4 как указано на рисунке 2.

3. Соединяем черный и зеленый провода к заземлителю контура, а красный и синий – к дополнительному (вспомогательному) штырю заземления как указано на рисунке 11.

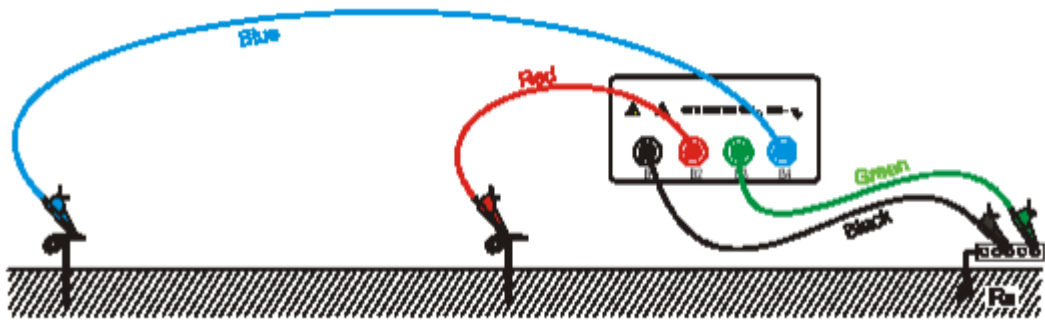


Рисунок 11 - Подключение прибора для измерения сопротивления заземления 3-х полюсным методом «3Р».

Измеряя небольшие сооружения заземления, штырь с токовым пробником должен размещаться от шины заземления на соответствующем расстоянии (не менее пяти диагоналей от площади тестируемого контура заземления). При измерении достаточно обширных и разнесенных сооружений заземления это расстояние может быть уменьшено до одной диагонали площади контура.

4. Нажимаем кнопку СТАРТ/СТОП. Прибор начинает тестирование.

По завершении тестирования прибор выдает на экран Сопротивление заземления, выраженное в Омах и усредненное значение сопротивления заземления, вычисленное по результатам тестов.

Когда по условиям окружающей обстановки и места проведения измерений невозможно использовать «3Р» метод, например, в городском центре, при измерениях в ТТ энергообъектах возможно измерить сопротивление заземления упрощенным методом - «2Р» при котором получаются большие значения, чем при «3Р» методе. В данном случае необходим некий вспомогательный штырь. Он должен иметь незначительное (минимальное) сопротивление заземления и быть независимым от сооружения заземления, подлежащего тестированию (без прямой гальванической связи).

Измерение сопротивления заземления должно производиться при благоприятных погодных условиях. Это делается в середине лета или зимы, когда грунт обладает максимальным сопротивлением. Периодичность

измерения R_3 в частном доме и на предприятиях определяется в соответствии с ПТЭЭП.

3.2 Методика измерения сопротивления грунта

Основной величиной, которая вводится в расчет заземления и от которой зависят конструкции заземления, является удельное сопротивление грунта. Этот важнейший параметр, говорит об уровне "электропроводности" земли в роли проводника, то есть как хорошо будет идти в этой среде электрический ток от заземлителя.

Земля – достаточно плохой проводник, ее проводимость в тысячи раз ниже, проводимости воды или металлов. Удельное сопротивление грунта – это физическая величина, характеризующая сопротивление грунта протеканию электрического тока, простыми словами – этим параметром мы делаем выводы о электропроводности грунта в качестве проводника при прокладке заземления.

Удельное сопротивление грунта – это сопротивление, оказываемое различными веществами земли (грунта) в виде куба с размерами $1 \times 1 \times 1$ метр, к которому подключены измерительные электроды к противоположным сторона куба. За физическую единицу объемного удельного сопротивления считают Ом на метр (международное обозначение Ом*м).

Значение удельного сопротивления грунта это исходный и главный физический параметр для осуществления расчетов сопротивления заземления. Чем выше это значение, тем больше заземлителей потребуется, чтобы добиться требуемого значения сопротивления заземления. При расчете любого заземляющего устройства необходимо знать точное значение этого параметра в конкретном месте, где будем подключать заземление.

Данный параметр грунта зависит от большого числа внешних факторов: температуры, влажности, состава, структуры и уплотненности грунта, времени года, присутствия солей, щелочных и кислотных остатков.

На основе различных геодезических исследований, проводимых в верхних слоях грунта, можно сделать вывод о том, что электрическая

составляющая структуры земли носит выраженный вид слоев, которые имеют совершенно различное сопротивление с достаточно определенными горизонтальными границами. Причем удельное сопротивление в горизонтальном направлении практически одинаковое и изменяется несущественно. При этом верхний слой земли подвергается интенсивным сезонным изменениям, из-за сильных температурных колебаний, а также от количества попадающей в почву влаги. Другие факторы, влияют менее выражено. Наибольшее значение удельного сопротивления наблюдается в зимнее время года, когда грунт промерзает, и летом – при высыхании последнего. Самым высоким значением обладают как раз на вечномерзлые грунты в зоне мерзлоты. У воды в переходном состоянии из жидкого в твердое практически не идут процессы передачи заряда.

Не менее важное значение, при расчетах заземления имеет и уровень влажности – при его даже незначительном падении у некоторых типов грунтов (пески, глина и суглинок) удельное сопротивление увеличивается в разы. Примеры этого, как раз, приводится в таблице ниже 13.

Таблица 13 - Удельное сопротивление некоторых видов грунта

Тип грунта	Удельное сопротивление, Ом*м
Графитовая крошка	0,1
Вода морская	0,2
Влажная глина	20
Чернозем	60
Сухой песок	800-4000
Кварц	15000
Вечномерзлый песок	50000

Точное и правильное измерение удельного сопротивления грунта позволяет существенно снизить затраты при монтаже заземления. Так, нет необходимости устанавливать лишние заземлители. Для получения правильного результата измерения необходимо осуществлять в течение всего года, как минимум по разу в течение каждого временного сезона. Гораздо чаще

все замеры проводят в конце весны – начала лета, возможное увеличение сопротивления учитывают, вводя различные повышающие коэффициенты.

Методика проведения измерения проводимости грунта прибором МЭТ-5035.

Проводимость грунта (удельное сопротивление) - очень важный и ценный параметр, т.к. его значение поможет проектировщикам в правильном определении размеров и глубины установки элементов контура заземления.

- 1) Устанавливаем переключатель режимов в положение « ρ (ГРУНТ)».
- 2) Соединяем черный, красный, зеленый и синий тестовые провода с соответствующими с входными гнездами прибора В1, В2, В3 и В4 как указано на рисунке 1.
- 3) Подключаем провода к дополнительным штырям заземления тоже как указано на рисунке 12.

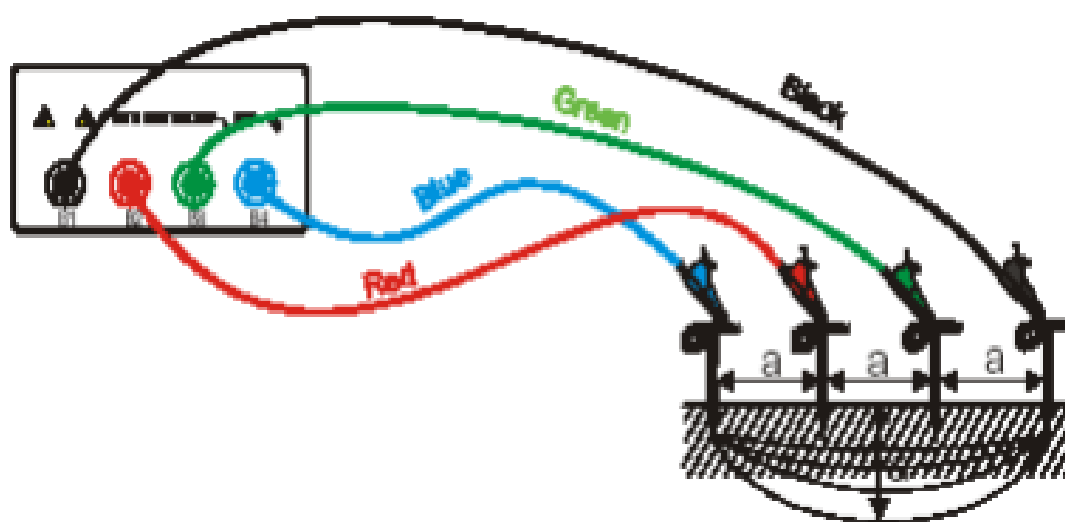


Рисунок 12 - Подключение прибора для измерения проводимости грунта (4 штыря)

4) С помощью кнопки DIST выбираем требуемую дистанцию (расстояние между штырями заземления). Этот параметр может принимать следующие значения: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 (метров).

5) Используя кнопки UL и S, выбираем требуемую дистанцию установки штырей заземления.

6) Нажимаем кнопку СТАРТ/СТОП. Прибор начинает тестирование.

И при окончании тестирования МЭТ 5035 выдаст на экран значение проводимости грунта.

3.3. Методика измерения сопротивления изоляции проводов

Каждый вид кабелей и проводов имеет свои специфические, первичные и вторичные электрические параметры, которыми эта продукция характеризуется. К одному из основных параметров кабельной продукции относится сопротивление изоляции.



Рисунок 13 - Конструкция двухжильного кабеля

Нормы сопротивления изоляции – это те данные, на которые опираются все виды работ по строительству, эксплуатации и обслуживанию кабелей.

Две металлических жилы, по которым передаются электрические сигналы (токи), почти всегда подвергаются разнообразному мешающему или опасному влиянию со стороны окружающей среды. Соответственно, и сами эти жилы тоже являются своеобразным влияющим фактором, в первую очередь они оказывают влияние друг на друга. Таким образом, ничем не защищенные металлические провода несут потери за счет всевозможных паразитных утечек, вплоть до создания аварийных ситуаций.

Для того чтобы свести к минимуму или существенно уменьшить появление подобного рода негативных ситуаций, токопроводящие жилы в кабелях защищают изолирующим покрытием из диэлектрического, не

проводящего электрического тока, материала. Для создания изоляционных оболочек и покровов используют такие материалы, как резина, бумага и пластические массы, отдельно или в разных комбинациях. Изоляция для разных марок и видов кабелей существенно отличается как по применяемым материалам, так и по принципам использования изолирующих покровов. В настоящее время выпускается огромное количество кабельной продукции для всевозможного применения.

Различаются кабели связи, общего применения, силовые, контрольные, распределительные, радиочастотные и множества других типов и марок. Такая продукция может различаться не только по функциям, но и по своим конструктивным и физическим характеристикам, разработанным применительно к средам, в которых предполагается ее использование. Разнообразные потребности в проводных материалах для всевозможных нужд привели к созданию различных модификаций существующих и уже востребованных типов кабелей. К примеру, для строительства подземных распределительных телефонных сетей непосредственно в грунте конструкцию применяемых в телефонной канализации кабелей дополнительно усиливают, заключая их сердечник в металлические ленты брони. Или для защиты жил кабеля от внешних токов помещают его сердечник в алюминиевую оболочку.

Применяемые для создания проводной продукции материалы, в том числе изолирующие, не в последнюю очередь зависят от того, для использования в каких условиях и в каких средах изготавливается конкретный вид и марка изделия. К примеру, для изолирования токопроводящих жил в условиях высоких температур больше подходит резина, устойчивая к температурным воздействиям, чем другие материалы типа обычной пластмассы.

Таким образом, изолирование составных элементов кабельной продукции – это конструктивная защита его токопроводящих жил от взаимных и внешних электрических влияний, от появления наводок и утечек до короткого замыкания. Величину этого параметра для каждой жилы и всего сердечника в целом характеризует величина сопротивления постоянному току в цепи между

жилой (жилами) и возможным источником влияния, например, землей. Поэтому для определения защищенности, работоспособности кабельной продукции применяется термин «сопротивление изоляции». Для контроля исправности кабельных пар используются такие понятия, как сопротивление изоляции между жилами и металлическим экраном кабеля.

Диэлектрические материалы, используемые в кабелях для создания изоляционных покрытий, с течением времени теряют свои свойства за счет старения. Кроме того, от физического воздействия они могут просто разрушиться. Чтобы определить, изменились ли параметры изоляционного покрытия и в каких пределах, необходима для сравнения некоторая отправная точка – норма на параметр изделия, установленная изготовителем.

Сопротивление изоляции для различных марок кабеля, как определенная величина одного из основных параметров изделия, закладывается в ТУ или ГОСТ на изготовление конкретной кабельной продукции. На отгружаемую к реализации продукцию должен прилагаться паспорт с ее электрическими параметрами. К примеру, норма сопротивления изоляции для кабелей связи дается в приведении к 1 км длины, причем данные указываются для температуры окружающей среды +20°C.

Норма для кабелей связи городских низкочастотных – не менее 5000 МОм/км. Для коаксиальных и магистральных симметричных кабелей норма сопротивления изоляции достигает 10000 МОм/км. Практически использовать паспортные данные сопротивления изоляции при оценке состояния проверяемого кабеля можно только в пересчете их к длине реального куска кабеля. Если участок кабеля больше километра, то норматив делится на эту длину. Если меньше, то, наоборот, умножается. Полученные таким путем расчетные цифры могут применяться для оценки кабельной линии.

Однако не стоит забывать о том, что паспортные данные приводятся для температуры +20°C, поэтому следует учитывать поправки при проведении контрольных измерений на температуру и влажность. К примеру, при проведении контрольных измерений в сырую, дождливую погоду можно

получить данные, которые будут ниже действительного сопротивления изоляции кабеля только за счет влажной поверхности контактных колодок или распределительных (оконечных) устройств. В таких случаях имеет смысл просушить поверхности с клеммами, на которые распаяны жилы измеряемого кабеля.

Для некоторых марок кабелей, имеющих алюминиевую оболочку и шланговое полиэтиленовое покрытие, нормируется сопротивление изоляции между оболочкой и землей. Норма на такое сопротивление изоляции – не менее 20 МОм/км. Для использования в реальной работе указанного норматива его также следует пересчитывать под действительную длину участка.

Для силовой кабельной продукции действуют следующие положения по сопротивлению изоляции постоянному току:

Для силовых кабелей, применяемых в сетях с напряжением более 1000 В, величина указанного параметра не нормируется, но не может быть менее 10 МОм.

Для силовых кабелей, применяемых в сетях с напряжением менее 1000 В, величина параметра не должна быть менее 0,5 МОм.

Для контрольных кабелей величина норматива не должна принимать значения менее 1 МОм.

Контроль над изоляцией проводов

Сопротивление изоляции кабеля является одним из основных показателей его работоспособного состояния, поэтому проверочные измерения изоляции электрических и электротехнических сетей являются обязательными. Для каждой отрасли директивными материалами определены периодичность и порядок проведения таких контрольных измерений.

К примеру, измерения сопротивления изоляции электрического оборудования, электрических сетей различного уровня и применения проводят специальными приборами, называемыми мегаомметрами, а измерения сопротивления изоляции линий связи проводят предназначенными для этого кабельными мостами. Указанные приборы имеют высокое выходное

напряжение (до 2500 В), что предъявляет особые требования к обеспечению выполнения правил охраны труда и техники безопасности при производстве подобных измерений.

В соответствии с действующими регламентными документами, измерения изоляции должны проводиться:

- для мобильных электроустановок не реже одного раза в 6 месяцев;
- для наружных электроустановок, кабелей и проводов в особо опасных помещениях не реже одного раза в 12 месяцев;
- для остальных видов оборудования и сетей не реже одного раза в 36 месяцев.

Иными словами, измерение сопротивления изоляции электропроводки в магазине или в офисе должно проводиться не реже одного раза в 3 года.

По результатам проведенных измерений составляют соответствующий акт, в котором фиксируют полученные данные.

Сравнивая известную норму на сопротивление изоляции электрической сети с полученными результатами измерений, делают вывод о ее работоспособности. Если измеренное сопротивление изоляции постоянному току не соответствует норме, то проверяемая сеть выводится в ремонт до восстановления ее рабочих параметров. Подтверждением окончания ремонтных работ и правомерности ввода сети в эксплуатацию будет являться протокол итоговых послеремонтных измерений сопротивления изоляции.

В связи с тем, что сопротивление изоляции по постоянному току для линий связи нормируется более жестко, то и алгоритм контроля над его состоянием несколько иной. Контрольные измерения этого параметра для линий, не стоящих под избыточным воздушным давлением, проводятся весной, перед началом ремонтного сезона, с тем, чтобы можно было спланировать соответствующие ремонтные работы, если состояние кабельной линии не нормальное.

Ремонт считается законченным, а кабельная линия работоспособной, если итоговые измерения ее параметров подтверждают соответствие сопротивления изоляции участка сети установленной норме (в пересчете на реальную длину).

Методики производства указанных выше измерений имеют некоторые специфические особенности, характерные для силовых сетей и для линий связи. К примеру, при измерении сопротивления изоляции электросети офиса или магазина прибор мегаомметр подключают к измеряемой сети в точках «жила» и «земля», не отсоединяя от нее отводы к розеткам и переключателям.

Сопротивление изоляции линейных элементов линий связи измеряют по схемам «жила-жила» и «жила (все жилы)-земля», предварительно отключив полностью все жилы измеряемой кабельной продукции от любых контактов с аппаратурой. То есть измерение проводят в режиме холостого хода.

Однако перед проведением любых измерений обязательно следует убедиться в отсутствии на измеряемой линии мешающего или опасного напряжения и принять соответствующие меры по защите как измерителя, так и других людей, имеющих доступ к измеряемым цепям. После окончания измерений необходимо снять с измеренных жил остаточный электрический заряд.

В итоге для содержания в исправном состоянии проводного линейного хозяйства и электроустановок достаточно выполнять установленные регламенты и вовремя контролировать такой важный параметр, как сопротивление изоляции постоянному току. Применяя соответствующие нормы, следует помнить о соотношении величины сопротивления изоляции и длины участка. То есть чем длиннее участок проводной линии, тем меньше для него норма по изоляции.

При измерении тестером МЭТ 5035 методика выполнения измерений обеспечивает погрешность не более $\pm 0,05\%$ от длины шкалы. Измерение сопротивления изоляции производится мегаомметром.

Методика проведения измерения изоляции при помощи МЭТ 5035

1) Обесточить тестируемую цепь.

- 2) Установить переключатель режимов в положение $M\Omega$.
- 3) Выбрать требуемый режим измерений с помощью кнопки FUNC.
- 4) Соединить черный и синий тестовые провода с входными гнездами В1 и В4 соответственно, как указано на рисунках 14-15.
- 5) Подключить входные терминалы прибора к тестируемому объекту, для измерения изоляции как показано на рисунках 14-15.
- 6) С помощью кнопок UN / IΔ N установите требуемое тестовое напряжение для соответствующего типа тестируемого оборудования и цепей.
 - 50 В (тест систем телекоммуникаций и связи)
 - 100В ; 250В; 500В; 1000В
- 7) Нажимаем кнопку СТАРТ/СТОП. Прибор начинает выполнение тестирования

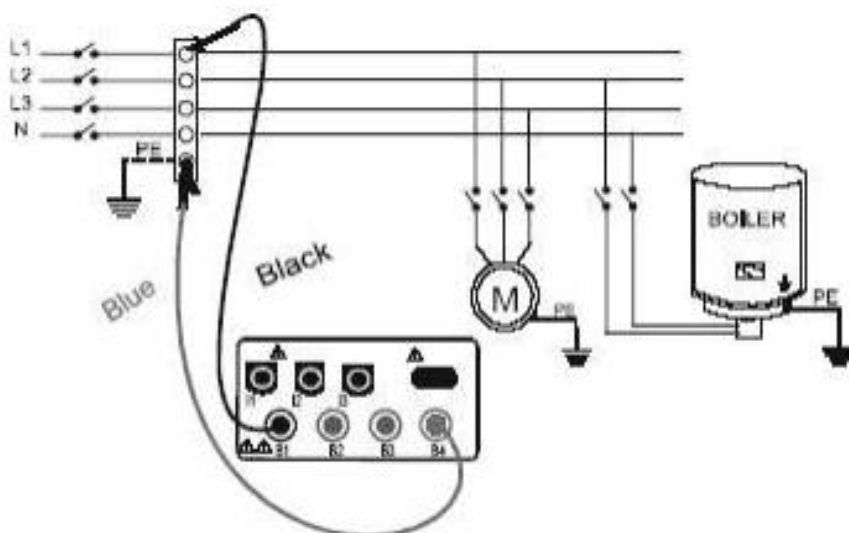


Рисунок 14 - Измерение сопротивления изоляции между Ф (L1) и З (PE) в электроустановках с использованием отдельных измерительных проводников

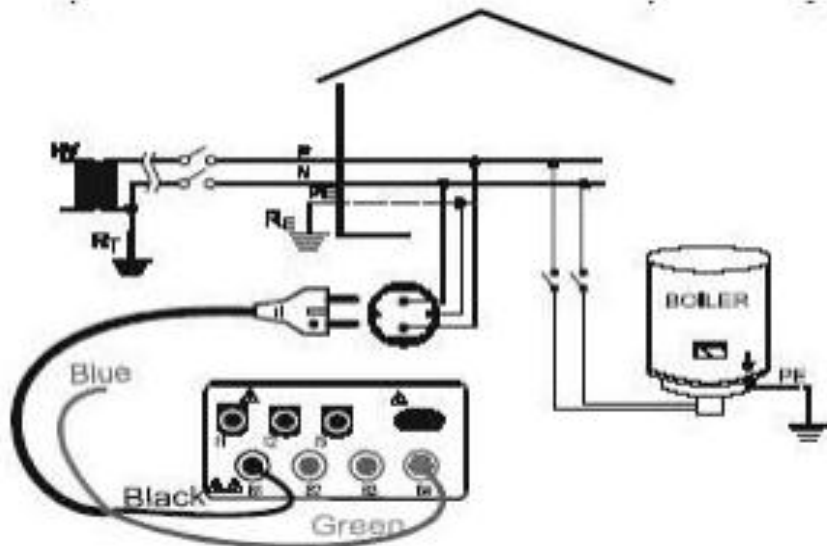


Рисунок 15 - Измерение сопротивления изоляции между Ф (Р) и З (РЕ) в электроустановках с использованием кабеля–переходника

После завершения тестирования на экран высветится следующее сообщение

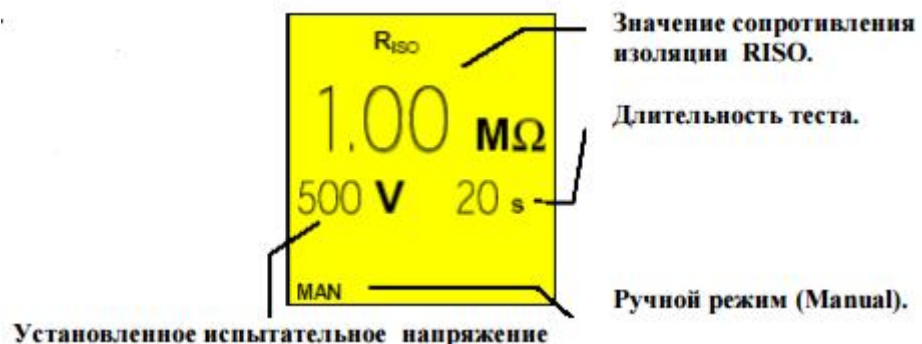


Рисунок 16 - Результат теста

3.4. Методика измерения полного сопротивления цепи

Методика проведения измерений полного сопротивления цепи сопротивления петли КЗ, вычисление ожидаемого тока КЗ.

Для проведения измерений устанавливаем переключатель режимов в положение ПЕТЛЯ. И при помощи кнопки FUNC выбираем один из следующих видов и условий измерений:

1) Режим «P- N»/ «Ф-Н» (прибор измеряет сопротивление в цепи фаза-нейтраль и вычисляет ожидаемый в ней ток короткого замыкания).

2) Режим «P- P»/ «Ф-Ф» (прибор измеряет сопротивление в цепи фаза-фаза и вычисляет ожидаемый в ней ток короткого замыкания).

3) Режим «P- PE»/ «Ф-З» (прибор измеряет сопротивление в цепи фаза-земля и вычисляет ожидаемый в ней ток короткого замыкания).

Проведение измерений и отсчет результатов в режиме «Ф-Н» («P-N»).

1) Выбираем режим измерения «Ф-Н» (P-N) с помощью кнопки FUNC

2) Отсоединяем все низкоомные нагрузки (потребители), находящиеся после места подключения (точки измерения), так как их входное сопротивление включено параллельно тестируемой цепи.

3) Соединяем тестовые провода соответственно с входными гнездами В1, В3 и В4 как указано на рисунке 17.

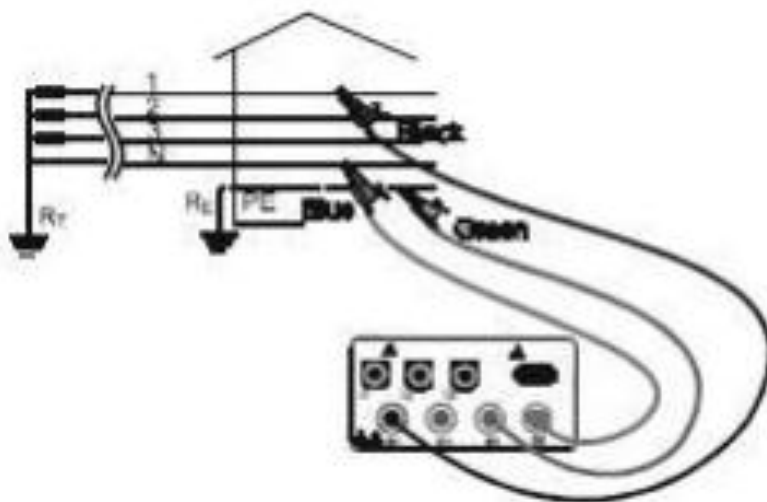


Рисунок 17 - Подключение прибора к 3-х фазной сети ~ 380 В

4) С помощью наконечников «крокодил» к проводникам 3-х фазной сети электропитания как указано на рисунке 1.

5) Нажимаем кнопку СТАРТ/СТОП. Прибор начинает тестирование

После завершения теста прибор выдает двойной звуковой сигнал, означающий, что испытание успешно завершено и на дисплей выводятся:

- сопротивления цепи Ф-Н выраженное в Омах
- эффективное значение напряжение Ф-Н выраженное в вольтах (В)

- значение ожидаемого тока КЗ цепи Ф-Н выраженное в амперах, вычисленное по формуле 1.1

$$I_{CC} = \frac{U_N}{Z_{PN}} \quad (3.1)$$

где U_N - напряжение Ф-Н, Z_{PN} - сопротивления цепи Ф-Н

Проведение измерений и отсчет результатов в режиме «Ф-Ф» («Р-Р»).

- 1) Выбираем режим измерения «Ф-Ф» («Р-Р») с помощью кнопки FUNC
- 2) Отсоединяем все низкоомные нагрузки (потребители), находящиеся после места подключения (точки измерения), так как их входное сопротивление включено параллельно тестируемой цепи.
- 3) Соединяем тестовые провода соответственно с входными гнездами В1, В3 и В4 как указано на рисунке 18.

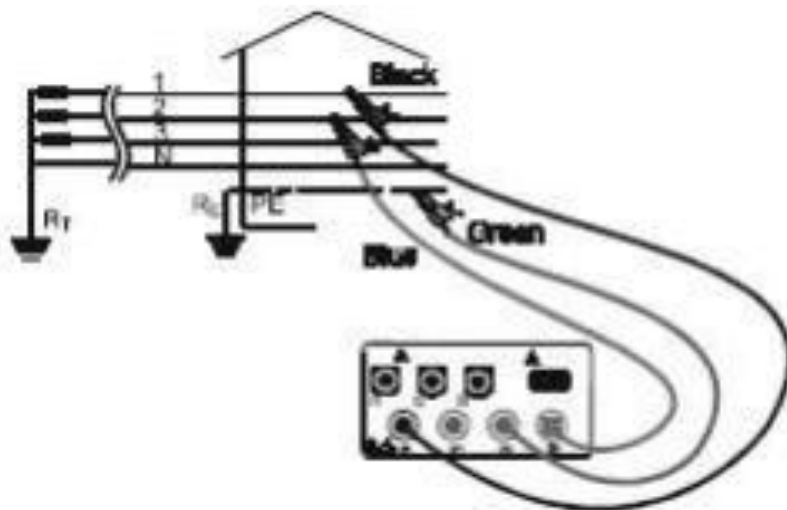


Рисунок 18 - Подключение прибора для тестирования «Ф-Ф» в 3-х фазной сети ~380 В

- 4) С помощью наконечников «крокодил» к проводникам 3-х фазной сети электропитания как указано на рисунке 18.
- 5) Нажимаем кнопку СТАРТ/СТОП. Прибор начинает тестирование. После завершения теста прибор выдает двойной звуковой сигнал, означающий, что испытание успешно завершено и на дисплей выводятся:
 - сопротивления цепи Ф-Ф выраженное в Омах
 - эффективное значение напряжение Ф-Ф выраженное в вольтах (В)

- значение ожидаемого тока КЗ цепи Ф-Ф выраженное в амперах, вычисленное по формуле 1.2

$$I_{CC} = \frac{U_N}{Z_{PP}} \quad (3.2)$$

где U_N - напряжение Ф-Н, Z_{PP} - сопротивления цепи Ф-Ф

Проведение измерений и отсчет результатов в режиме «Ф-З» («P-PE»)

1) Выбираем режим измерения «Ф-З» («P-PE») с помощью кнопки FUNC..

2) Соединяем тестовые провода соответственно с входными гнездами В1, В3 и В4 как указано на рисунке 19.

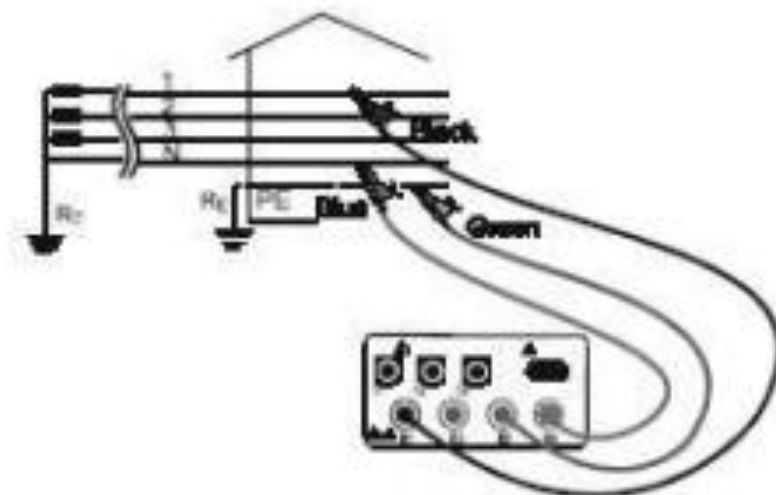


Рисунок 19 - Подключение прибора к 3-х фазной сети ~ 380 В

3) С помощью наконечников «крокодил» к проводникам 3-х фазной сети электропитания как указано на рисунке 19

4) Прибор выполняет испытание, проверяющее, что напряжение прикосновения U_t в цепях сооружения (контакта), в соответствии с фактически протекающим тестовым током прибора не превышает предельного значения.

5) Нажимаем кнопку СТАРТ/СТОП. Прибор начинает тестирование.

После завершения теста прибор выдает двойной звуковой сигнал, означающий, что испытание успешно завершено и на дисплей выводятся:

- сопротивления цепи Ф-З выраженное в Омах
- эффективное значение напряжение Ф-З выраженное в вольтах (В)

- значение ожидаемого тока КЗ цепи Ф-З выраженное в амперах, вычисленное по формуле 1.3

$$I_{cc} = \frac{U_N}{Z_{PE}} \quad (3.3)$$

где U_N - напряжение Ф-Н, Z_{PE} - сопротивления цепи Ф-Н

3.5 Методика проведения измерений УЗО

Как только применение электрического тока вошло в нашу жизнь, сразу возникла необходимость в защите от его поражающего воздействия на здоровье человека. Прежде всего – это выполнение изоляции токопроводящих частей проводки и деталей приемников тока. Но полная изоляция невозможна, так как в любой электрической схеме присутствуют технологические разрывы и контактные группы. Всегда есть вероятность нарушения (разрушения) изоляционного слоя токопроводящих элементов и их механического повреждения, и самое главное – статистическая регулярность в нарушении техники безопасности, инструкций и правил эксплуатации электрооборудования, как на производственном, так и бытовом уровне.

Одним из самых эффективных способов защиты от поражающего воздействия электрического тока является организация контура заземления. Контур заземления – это искусственное проводниковое соединение с «землей» (т.н. РЕ-проводник) нейтральных токопроводящих корпусов или частей электромеханизмов, имеющий сопротивление не выше 4 Ом. Перечисленные элементы электрооборудования могут оказаться под напряжением по причине замыкания на корпус фазного провода или тока молнии.

Главное назначение устройства контура заземления — это исключить возможность поражения электрическим током человека или животного в случае прикосновения к корпусу или части механизма электрооборудования, оказавшимся под напряжением по причине замыкания на них фазного электрического тока.

Проблему максимально эффективной защиты от воздействия электричества на человека решили так называемые устройства дифференциального тока (УДТ) – это большой сегмент контрольно-защитных приборов различного назначения и конструктивных особенностей. Классификация сегмента УДТ довольно обширная: от способа управления, вида установки и числа полюсов, до возможности регулирования и задержки по времени отключающего дифференциального тока.

Новатором в разработке УЗО была Германия. Первый действующий образец устройства защиты был сконструирован и изготовлен в тридцатых годах прошлого века. В качестве датчика тока утечки использовался минимальный из возможных по размеру трансформатор дифференциального тока, а контрольным элементом использовалось поляризованное магнитное реле с чувствительностью 100 миллиампер (mA) и быстродействием не более 0,1 секунды.

Порог фиксирования дифференциального тока у опытного образца был около 80 mA. Разработать контрольное реле с чувствительностью менее 80 mA в то время было невозможно из-за отсутствия материалов с нужными электромагнитными характеристиками. И только в середине двадцатого века было предложено новое конструктивное решение УЗО. В конструкции были учтены механизмы по устранению ложных срабатываний от разрядов во время грозы и весомо увеличена чувствительность по дифференциальному току до 30 mA. Также претерпели изменения и габаритные размеры УЗО: от размера посылочного ящика до современного формата, способного быть установленным на DIN-рейку в современных электрических шкафах.

К числу наиболее востребованных из защитных УДТ, работающих в бытовых условиях, относятся устройства защитного отключения (УЗО). УЗО работает как защитник человека от поражения электрическим током и как превентивный механизм по предотвращению случайного возгорания кабелей проводки и подключаемых шнуров электроприборов.



Рисунок 20 - Устройства защитного отключения

Функциональная идея рассматриваемого устройства основана на законах электротехники, постулирующих равенство входящего и выходящего тока в замкнутых электрических цепях с активными нагрузками.

Это значит, что ток, протекающий через фазный провод, должен быть равен току, протекающему через нулевой провод – для цепей однофазного тока при двухпроводной разводке и что ток в нейтральном проводе должен быть равен сумме токов, которые протекают в фазах для трехфазной четырехпроводной цепи.

Когда в таком контуре из-за случайного прикосновения человека к незащищенным частям токопроводящих элементов цепи или при контакте оголенной части проводки (из-за повреждения) с другими токопроводящими предметами, образующими новую электрическую цепь, происходит так называемая утечка тока – равенство входящего и выходящего токов нарушается.

Это нарушение может быть зарегистрированным и использоваться как команда на отключение всей электрической цепи. На этом процессе и было

сконструировано УЗО. А ток «утечки» в рамках электротехники стали называть дифференциальным током.

УЗО защищает от:

1) замыкания фазного провода на корпус электроприбора. В большом количестве случаев — это нагревательные элементы стиральных машин, водонагревателей и обогревателей. Причём пробой может возникать только тогда, когда тепловой элемент нагреется под воздействием тока;

2) неправильного монтажа проводки, когда недобросовестные электромонтажники замуруют в штукатурке «скрутку» проводов без использования монтажной коробки. Если стенка мокрая – с этой скрутки будет происходить утечка дифференциального тока в стену и УЗО все время будет обесточивать линию, пока полностью не высохнет штукатурка или будет произведен правильный ремонт соединений;

3) неправильного монтажа в электрическом щитке, когда, казалось бы, небольшие, но «полезные» изменения, внесенные в схему, меняют токораспределение и приводят к потере высокой эффективности работы устройства.

Основное применение в бытовых условиях УЗО получило при использовании в электрических группах ванных комнат, кухонь и розеточных группах большого числа подключаемых приборов и оборудования. Это не означает, что использовать УЗО на общей входящей сети не имеет смысла. Данная выборочная схема продиктована только оперативностью управления и маркетинговой целесообразностью, так как УЗО для небольших токов гораздо

дешевле по цене устройств с большей мощностью.



Рисунок 21 - Схема подключения УЗО

Принцип работы УЗО

При прикосновении человека к открытым токопроводящим частям или к корпусу электроприемника, который в результате пробоя изоляции оказался под напряжением, по фазному проводнику через УЗО кроме тока нагрузки I_1 потечет дополнительный ток I_D (ток утечки), являющийся для трансформатора тока дифференциальным (разностным). Неравенство токов в первичных обмотках - $I_1 + I_D$ в фазном проводнике и $I_2 = I_1$ в нулевом рабочем проводнике - вызывает небаланс магнитных потоков и, как следствие, возникновение во вторичной обмотке трансформированного дифференциального тока. Если этот ток превышает заданное значение тока порогового элемента пускового органа 2, последний срабатывает и воздействует на исполнительный механизм 3. Исполнительный механизм, который состоит из пружинного привода, спускового механизма и группы силовых контактов, размыкает электрическую цепь. В результате защищаемая УЗО электроустановка обесточивается. Для осуществления периодического контроля исправности (работоспособности) УЗО предусмотрена цепь

тестирования 4. При нажатии кнопки "Т" искусственно создается цепь протекания отключающего дифференциального тока. Срабатывание УЗО в этом случае означает, что устройство в целом исправно. Этот принцип указан на рисунке 3.

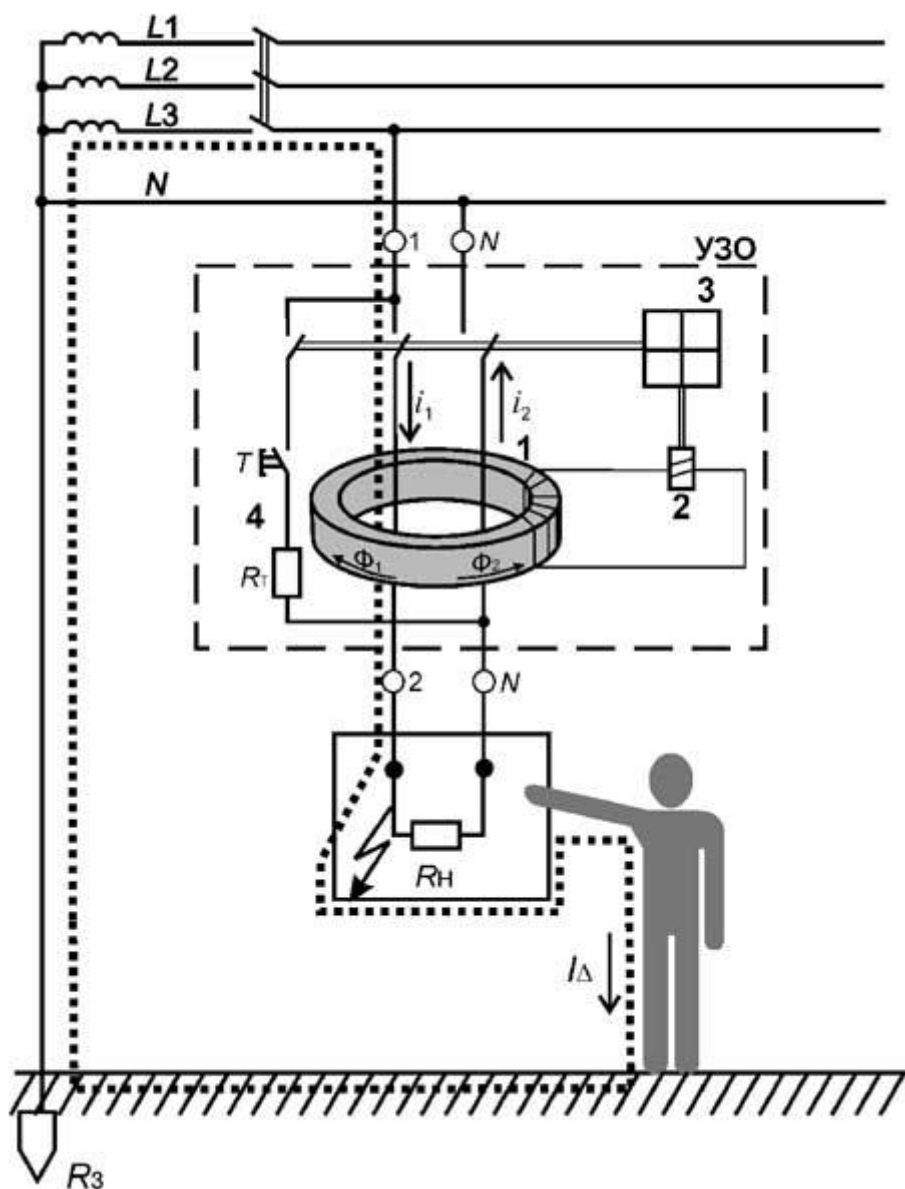


Рисунок 22 - Схема, иллюстрирующая принцип действия УЗО

Есть несколько проверки УЗО. Все они основаны на имитации тока утечки, который создается с помощью переменного и постоянного (добавочного) резисторов. Ток срабатывания УЗО контролируется миллиамперметром, включенным последовательно с резисторами.

Проверка устройств защитного отключения при помощи МЭТ 5035

Автоматическое тестирование отключающей способности устройств УЗО заключается в его срабатывании и размыкании при этом цепи дифференциального тока утечки. Непосредственно перед тестированием надо убедиться, что все электропотребители соединены к сети «в обход» УЗО (перемычкой) с целью исключения их вывода из строя (повреждения) при его срабатывании (т.е. при отключении напряжения). По возможности отключаем все нагрузки, подключенные к сети после места установки RCD, т.к. они могут добавлять в цепи дополнительные токи утечки к тестовому току и тем самым искажать результаты тестирования.

Устанавливаем переключателем режим в положение УЗО ИМП. (УЗО типа А - реагирующее на импульсный ток утечки) или УЗО ПЕРЕМ. (УЗО типа АС - реагирующее на синусоидальный ток утечки).

Кнопкой FUNC выбираем один из следующих видов и условий измерений (отображаются последовательно при каждом очередном нажатии FUNC):

1) «х 1/2» (прибор выполняет тест током утечки равным половине установленного (номинального) значения срабатывания УЗО)

2) «х 1» (прибор выполняет тест током утечки равным номиналу установленного значения срабатывания УЗО).

3) «х 2» (прибор выполняет тест током утечки равным 2-х кратной величине установленного (номинального) значения срабатывания УЗО).

4) «х 5» (прибор выполняет тест током утечки равным 5-и кратной величине установленного (номинального) значения срабатывания УЗО).

5) «АУТО» (прибор выполняет тест автоматически с последовательно устанавливаемыми токами утечки равными: половине, номиналу, 2-х кратной и 5-и кратной величине номинального значения тока срабатывания).
Рекомендуемый способ тестирования.

6) «RAMP » (прибор выполняет тест с дискретно нарастающим током утечки, током утечки с начальной фазой 0° или 180° относительно напряжения. Используйте данный тест для измерения тока отключения УЗО).

7) «Ut» (прибор выполняет тест током утечки равным половине номинального значения срабатывания УЗО и вычисляет напряжение прикосновения, также как и R_a (сопротивление заземления) при протекании синфазного с напряжением тока утечки или с начальной фазой 180° относительно напряжения.

Рекомендуется выполнять тест УЗО токами с начальной фазой как 0° так и 180° . Поэтому тестирование должно быть повторено для обоих значений фазы испытательного тока. Если испытанию подвергаются УЗО общего типа (чувствительное к обоим типам утечки – АС (синусоид.) и А (импульсный ток утечки), то желательно произвести испытание как током синусоидальной формы, так и импульсным током утечки, с начальной фазой 0° и 180° по каждому виду сигнала.

Для проведения измерений:

- 1) Выбираем нужный режим теста с помощью кнопки FUNC
- 2) Соединяем черный, синий и зеленый штекеры 3-х проводного shuko-кабеля или отдельные тестовые провода соответственно с входными гнездами В1, В3 и В4. Возможные варианты подключения указаны на рисунках 23-26.

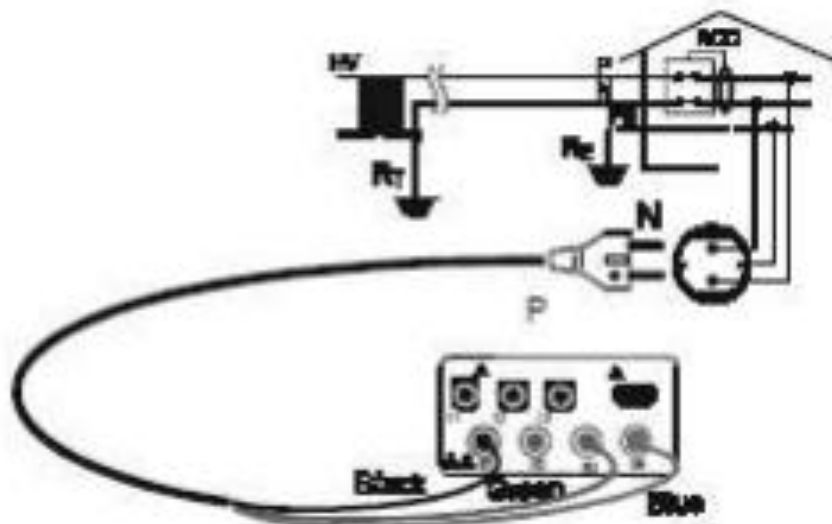


Рисунок 23 - Подключение прибора для проверки УЗО в однофазной сети
220 В

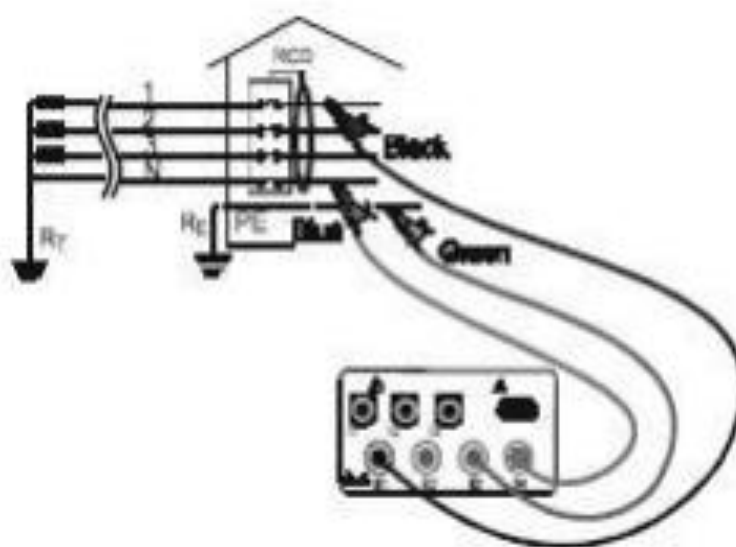


Рисунок 24 - Подключение прибора для проверки УЗО в трехфазной сети
380В + N + PE

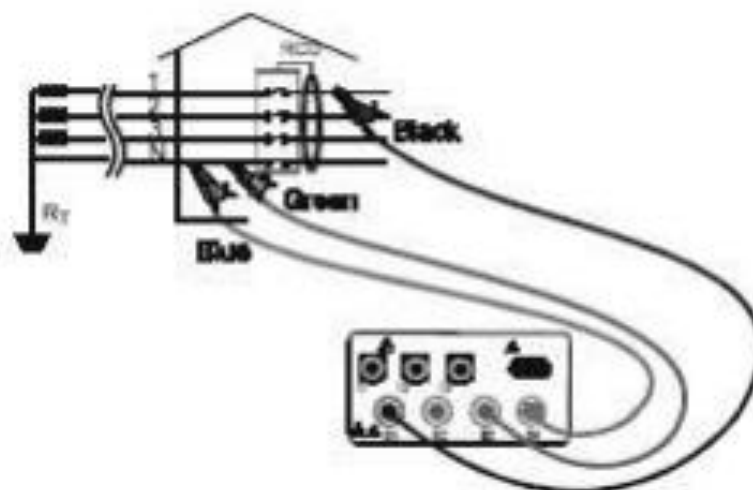


Рисунок 25 - Подключение прибора для проверки УЗО в трехфазной сети 380В + N (нет PE)

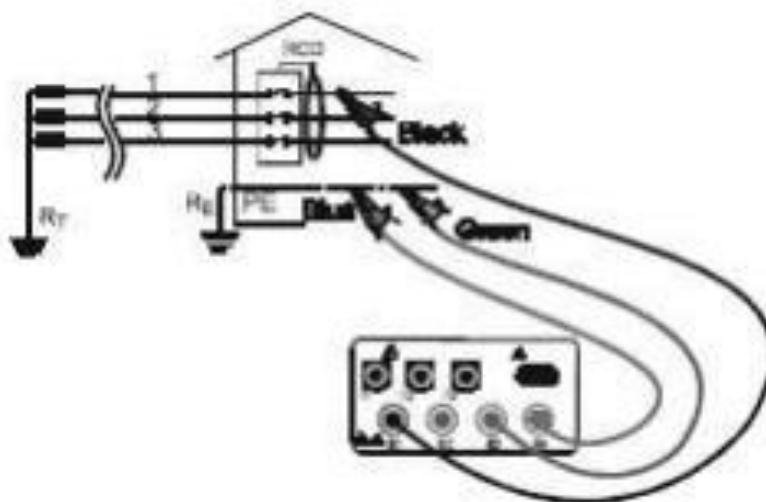



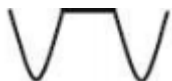


Рисунок 26 - Подключение прибора для проверки УЗО в трехфазной сети 380В + PE (нет N)

3) Подключаем 3-х проводной переходник-вилку к электророзетке 220В/50Гц или измерительные провода с наконечником «крокодил» тестируемой энергосистеме как указано на одном из рисунков 23-26.

4) Нажимаем и отпускаем кнопку СТАРТ/СТОП (однократное нажатие). Прибор начинает выполнение тестирования в режиме «MAN» (ручной способ) с начальной фазой тестового тока 0° .

Нажимаем дважды кнопку СТАРТ/СТОП для выполнения теста с начальной фазой тестового тока 180° .

Тип УЗО	0° фаза тест. сигнала («+» полуволна)	180° фаза тест. сигнала («-» полуволна)
АС тип		
A тип		

Если УЗО не срабатывает, то прибор выдает двойной звуковой сигнал, означающий положительный результат. И на экране появится сообщение, изображенное на рисунке 27.

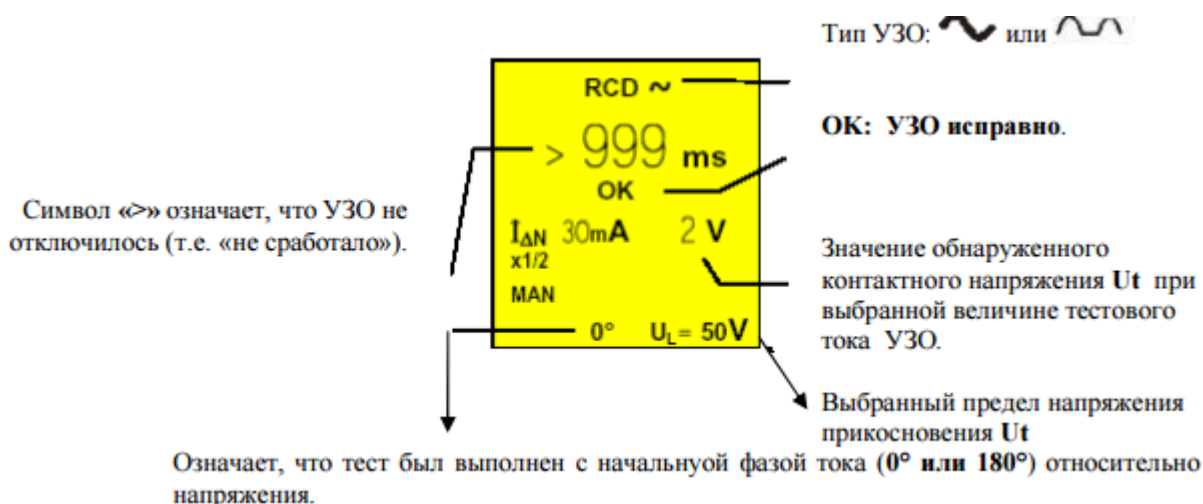


Рисунок 27 - Результат теста

Измерения должны проводиться бригадой из двух и более человек, имеющих группу по электробезопасности не ниже III. А так же, испытания может проводить человек, прошедший специальную подготовку и имеющий в удостоверении отметку о допуске к проведению испытаний.

Перед проверкой срабатывания УЗО должны быть произведены измерения сопротивления изоляции и испытания повышенным напряжением присоединения.

3.6 Структурная схема определения времени срабатывания УЗО

Дополнительно для лабораторных исследований следует измерять время срабатывания УЗО. Время срабатывания УЗО - это промежуток времени между моментом внезапного возникновения тока утечки (отключающего дифференциального тока), срабатывания отключающего механизма, размыкания контактов и гашения дуги между ними.

Для проведения лабораторных исследований предлагается схема определения времени срабатывания УЗО представленная на рисунке 28-29. Где ИРН – источник регулируемого напряжения, УЗО – устройство защитного отключения, ДТ – датчик тока, К – компаратор, Т – триггер, ГСИ – генератор счетных импульсов, С – счетчик, ДШ – дешифратор, ЦИ – индикатор.

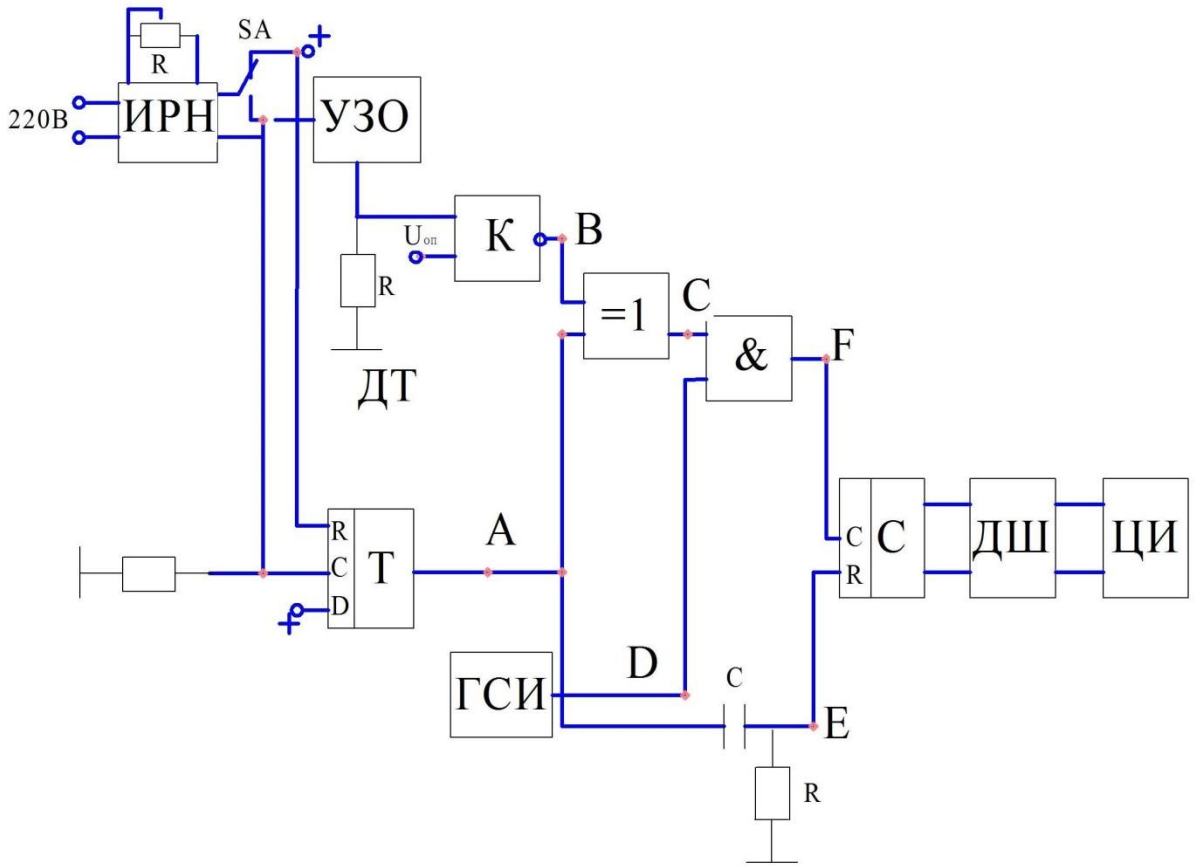


Рисунок 28 - Структурная схема определения времени срабатывания УЗО

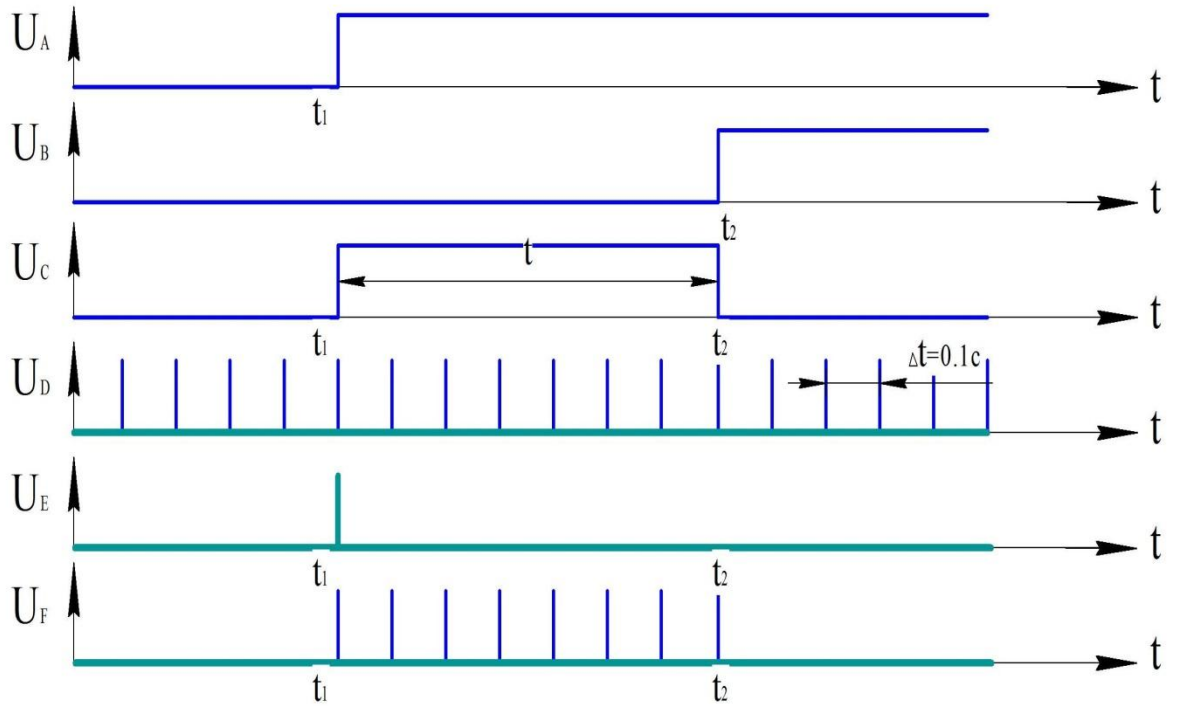


Рисунок 29 - Счетчик импульсов

Генератор счетных импульсов вырабатывает калиброванные импульсы UD, период следования которых $\Delta t=0,1\text{с}$.

Логический элемент И выделяет конъюнкцию сигналов UC и UD и на его выходе формируется серия импульсов UF. В момент t обнуляется счетчик с импульсом UE и начинает подсчет импульсов UF. Двоично-десятичный код со счетчика С преобразуется в семисегментный код дешифратором ДШ. Цифровой индикатор ЦИ высвечивает время срабатывания устройства защитного отключения УЗО.

Заключение

В данной диссертационной работе мы рассмотрели основные показатели качества электроэнергии и были проанализированы приборы для измерения показателей качества электроэнергии, такие как: многофункциональный тестер МЭТ-5035, энерготестер ПКЭ-А-А, тестовый инструмент Fluke 1736 и анализатор качества электроэнергии АКЭ-824.

Выбран самый доступный для нас прибор МЭТ-5035 и составлена структурная схема лабораторного стенда для этого прибора. Для обеспечения безопасности при проведении измерений, следует установить понижающий трансформатор 380/36 В.. Произведен расчет основных параметров такого трансформатора.

В 3 главе составлены методики измерения следующих параметров на лабораторном стенде при помощи МЭТ-5035:

- измерение сопротивления заземления,
- измерение сопротивления грунта,
- измерение сопротивление изоляции проводов,
- измерение полного сопротивления цепи, сопротивления КЗ и вычисление ожидаемого тока КЗ,
- проверка импульсного и переменного УЗО.

А также составлена схема определения времени срабатывания УЗО.

Список использованных источников

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – Москва, Стандартинформ, 2014. – 59 с.
2. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок [Текст] : РД 153-34.0-03.150-00:утв постановлением Министерства труда и социального развития Российской Федерации от 5.01.2001 г. N 3: приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 27.12. 2000 г. N 163 М.: Издательство «Омега-Л», 2007
3. Правила устройств электроустановок [Текст] : утв. Министерством энергетики РФ 08.07.02 : введ. в действие с 01.01.2003 – 7-е изд. – М.: ЭНАС, 2005
4. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: [Введ. 2003 – 07 – 01]. – Москва: Омега – Л, 2011. – 272 с.
5. Руководство по эксплуатации многофункционального электрического тестера МЭТ 5035
6. Руководство по эксплуатации. Энерготестер ПКЭ-А [Текст]. – Москва, 2010. – 78 с.
7. Руководство по эксплуатации. Анализаторы качества электрической энергии АКЭ [Текст]. – 823, АКЭ – 824. – АКИП, 2014. – 93 с
8. Руководство пользователя Fluke. Three Phase Power Quality Analyzer[Текст]. – Fluke, 2012. – 156 с.
9. Ананичева, С.С. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие [Текст]. / С. С. Ананичева, А. А. Алексеев, А. Л. Мызин.; 3-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ. 2012. 93 с.
10. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник [Текст] / Л. А. Бессонов. – Москва : Юрайт, 2012. – 701 с.
11. Боровиков, В. А. Электрические сети энергетических систем. Учебник [Текст] / В.А. Боровиков, В.К. Косарев, Г.А. Ходот. - М.: Энергия, 2008. - 392 с.

- 12.Виноградов, А. А. Анализ показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения: учебное пособие для студентов[Текст] / А. А. Виноградов, О.Г. Гриб и др. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2012. – 271 с.
- 13.Волков, Н.Г. Качество энергии в системах электроснабжения[Текст]: Н.Г. Волков – учебное пособие. Томск: национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2010. – 152 с.
- 14.Карташев, И. И. Управление качеством электроэнергии: учебное пособие для вузов [Текст] / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов и др. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
- 15.Кужеков С.Л. Практическое пособие по электрическим сетям и электрооборудованию [Текст] / С. Л. Кужеков, С. В. Гончаров. 3-е изд.. -Ростов: Феникс, 2009. -493 с.
- 16.Куско, А. Качество энергии в электрических сетях [Текст] / А. Куско, М.Томпсон – Москва: Додэка–XXI, 2008. – 336 с..
- 17.Куско, А. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества [Текст] / А. Куско, М. Томпсон – Москва : Додэка–XXI, 2010. – 336 с.
- 18.Лукутин, Б.В. Качество электрической энергии [Текст]: Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, А.И. Муравлев - Лабораторный практикум. - Томск: ТПУ, 2010. – 87 с.
- 19.Лыкин, А. В. Электрические системы и сети : учеб. пособие [Текст] / А. В. Лыкин. - Гриф УМО. - М. : Логос, 2008. - 253 с.
- 20.Папков, Б. В. Краткий словарь современной электроэнергетики: учебное пособие [Текст] / Б. В. Папков. – Нижний Новгород : НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2013. – 395 с
- 21.Папков, Б. В. Надежность и эффективность электроснабжения: учебное пособие [Текст] / Б. В. Папков, Д. Ю. Пашали. – Уфа : Уфимский государственный авиационный технический университет., 2005. – 380 с.
- 22.Папков, Б. В. Надежность электроснабжения: комплекс учебно–методических материалов [Текст] / Б.В. Папков. – Нижний Новгород : НГТУ, 2007. – 210с.

- 23.Суворин, А.В. Современный справочник электрика [Текст]: А.В. Суворин - Москва, Феникс, 2010 г. - 512 с.
- 24.Чохонелидзе, А.Н. Справочник энергетика: справочное пособие [Текст] / А.Н.Чохонелидзе.-Колос,2006.-489с.
- 25.Шеховцов, В. П. Аппараты защиты в электрических сетях низкого напряжения [Текст] / В.П. Шеховцов. - М.: Форум, 2010. - 160 с.
- 26.Расчет трехфазного сухого силового трансформатора: Методические указания к выполнению курсовой работы по курсу «Электромеханика» для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения /Сост. В.Я. Иванов. – Курган: Изд-во КГУ, 2005.–61 с.
- 27.Graaff, Roald A.A. de. Flexible distribution systems through the application of multi back-to-back converters: Concept, implementation and experimental verification / Roald Antonius Adrianus de Graaff // Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2010. – 210 p
- 28.Nikonowicz, Ł. Virtual Power Plants – General Review: Structure, Application And Optimization / Ł. Nikonowicz, J . Milewski // Journal of Power Technologies, 2012. – № 92 (3). – P. 135–149
- 29.Hanzelka Z., Bien A. “Power Quality Application Guide.Interharmonics 3.1.1”, Leonardo Power Quality Initiative, July 2004. – 24 p.
30. Ахмедов М.А. Лабораторный стенд для измерения параметров электрических сетей [Текст] М.А. Ахмедов // Новая наука: проблемы и перспективы часть 2. – Стерлитамак: АМИ, 2017. 110-111с.
- 31.Ахмедов, М.А. Методика измерения сопротивления заземляющих устройств многофункциональным электрическим тестером МЭТ-5035 [Текст] М.А. Ахмедов // Роль и значение современной науки и техники для развития общества часть 3. – Уфа: МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2017. 28-29с.