

Федеральное агентство по рыболовству

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «КГТУ»)

Кафедра энергетики

ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ
ПО ДИСЦИПЛИНАМ
«МЕТОДЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»
«УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ В
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»
«ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ»**

А.К. Аксенов, В.И. Гнатюк

Калининград

2023

Содержание

Введение	3
Лабораторная работа №1	7
Лабораторная работа №2	14
Лабораторная работа №3	30
Список литературы	39
Приложение 1	40
Приложение 2	41
Приложение 3	42
Приложение 4	43

Введение

Очевидно, что в теории оптимального управления электропотреблением техноценозов, собственно понятие «электропотребление» занимает центральное место, однако, в его толковании имеется целый ряд проблем. Сразу отметим, что электропотребление, в зависимости от контекста, объекта, предмета и области исследований, может рассматриваться в трех различных смыслах: как показатель, как параметр и как процесс.

Как показатель электропотребление – мера, отражающая свойство объектов окружающего мира преобразовывать генерируемую источниками электромагнитную энергию (энергию электромагнитного поля, слагаемую из энергий электрического и магнитного полей). Процесс преобразования энергии сопровождается работой электрического поля по перемещению зарядов, а также работой магнитного поля по перемещению элементарных проводников с током. Часть этой энергии (активная) необратимо преобразовывается в другие виды энергии (механическую, тепловую, химическую и др.), а часть (реактивная) – циклично запасается в виде электромагнитного поля в объекте, а затем отдается обратно в источник. В теории электрических цепей и электроснабжении принято данное свойство кратко называть «потреблением электрической энергии» или «электропотреблением». Следует отметить, что термин «потребление» в данном контексте применяется не вполне корректно и имеет, скорее, коммерческий, нежели физический смысл. Источник, «сжигая первичное топливо», создает электромагнитное поле, которое в потребителе «возбуждает» процесс необратимого преобразования энергии в другие виды. Таким образом, потребитель, участвуя в «сжигании части первичного топлива», потребляет именно его, а электромагнитная энергия выступает лишь необходимым «посредником» в данном процессе и, сама по себе, не расходуется. Однако, зафиксировать долю участия именно данного потребителя в «сжигании первичного топлива» в источнике электроэнергии можно лишь на основе параметров электромагнитного поля в точке присоединения потребителя к общей электрической цепи, отсюда и термин – «электропотребление».

Особо выделяется определенный класс объектов, специально предназначенных для работы в электрических цепях систем электроснабжения, и эти объекты называются приемниками и потребителями электроэнергии. Приемник электроэнергии – функционально законченная система, предназначенная для преобразования электроэнергии в другие виды энергии. Потребитель – лицо (физическое или юридическое), приобретающее электрическую энергию для собственных бытовых или производственных нужд. Как правило, электропотребление служит мерой, отражающей основное свойство именно приемников или потребителей электроэнергии.

Математически электропотребление в точке присоединения к общей электрической цепи определяется как работа электрического поля, т.е. ин-

теграл функции электрической мощности в данной точке от времени, взятый в пределах, заданных тем промежутком времени, за который мы оцениваем электропотребление. При этом, в качестве электрической мощности может быть принята активная, реактивная или полная мощность. В синусоидальных электрических цепях: активная мощность – это произведение действующих значений тока и напряжения на косинус угла сдвига фаз между векторами тока и напряжения; реактивная мощность – произведение действующих значений тока и напряжения на синус угла сдвига фаз между векторами тока и напряжения; полная мощность – произведение действующих значений тока и напряжения. Следует отметить, что, при таком подходе, все параметры становятся достаточно легко измеряемыми (действующие значения тока и напряжения, а также сдвиг фаз).

Для удобства экспериментальной фиксации электропотребления приборами учета (счетчиками электроэнергии, интегрирующими мощность во времени) и нормализации договорных отношений между поставщиками и потребителями электроэнергии принято квантовать электропотребление мощностью в одну единицу на отрезке времени в один час. При этом в качестве единиц измерения электропотребления выступают внесистемные единицы: по активной мощности – кВт·ч; по реактивной мощности – кВАр·ч; по полной мощности – кВА·ч.

По конструкции счетчики электроэнергии бывают индукционными или электронными. В индукционных (электромеханических счетчиках) магнитное поле неподвижных токопроводящих катушек влияет на подвижный элемент из проводящего материала. Подвижный элемент представляет собой диск, по которому протекают токи, индуцированные магнитным полем катушек. Количество оборотов диска в этом случае прямо пропорционально потребленной электроэнергии. В электронных (статических счетчиках) переменный ток и напряжение воздействуют на электронные элементы для создания на выходе импульсов, число которых пропорционально измеряемой энергии. Счетчики электроэнергии имеют две пары зажимов, одна из которых включается в рассечку провода, по которому протекает ток нагрузки, а другая подключается параллельно на номинальное напряжение сети. Фактически, все счетчики электроэнергии реагируют на ток нагрузки (его активную и/или реактивную составляющие).

С прикладной точки зрения электропотребление в 1 кВт·ч будет зафиксировано, если электроприемник номинальной мощностью 1 кВт работает в номинальном режиме в течение 1 часа. Если взять за основу системную единицу энергии Джоуль (Дж), то 1 кВт·ч приблизительно равен 3,6 МДж. Следует отметить, что физически количество электроэнергии в 1 Дж соответствует работе электромагнитного поля по перемещению заряда в 1 Кулон (К) между точками поля с разностью потенциалов в 1 В.

Как параметр электропотребление – количественная форма одноименного показателя, фиксируемая счетчиками электроэнергии за интер-

вал времени и определяемая как разность между значениями электропотребления в конце и начале рассматриваемого интервала. В случае стандартизации интервала времени (час, сутки, месяц, квартал, год и т.д.) значение электропотребления конкретного приемника или потребителя электроэнергии в базе данных будет фиксироваться в кВт·ч (кВАр·ч, кВА·ч) за принятый промежуток времени. При этом появляется возможность строить функции времени или временные ряды электропотребления для отдельных приемников или потребителей электроэнергии, а также ранговые параметрические распределения по электропотреблению для техноценозов. Кроме того, становится возможным интегрирование функций времени и ранговых распределений с целью определения, соответственно, суммарных значений электропотребления отдельных приемников или потребителей электроэнергии либо потенциалов энергосбережения техноценоза в целом. Энергосбытовые компании зачастую называют этот параметр «расход электроэнергии», однако, с точки зрения потребителя – это не «расход», а «потребление электроэнергии», т.е., не что иное, как «электропотребление».

Следует иметь в виду, что в данном случае мы имеем дело с понятием, так называемого, дифференциального (от англ. «difference») электропотребления, отражающего разницу в электропотреблении приемника или потребителя в конце и начале стандартизированного (заранее оговоренного) промежутка времени. Данное понятие отличается от электропотребления как показателя, поэтому предлагается его называть «дифференциальным электропотреблением». В качестве единицы измерения здесь следует использовать внесистемную единицу $\text{кВт}\cdot\text{ч}\backslash T$ ($\text{кВАр}\cdot\text{ч}\backslash T$, $\text{кВА}\cdot\text{ч}\backslash T$), где T – стандартизированный интервал времени (час, сутки, месяц, квартал, год и т.д.). Следует отметить, что применяемый здесь экранирующий символ (обратная косая черта) подчеркивает то, что киловатт-часы не делятся на промежуток времени, а поступают в базу данных вместе со значением этого промежутка. Таким образом, запись «дифференциальное электропотребление объекта в феврале 2017 года составляет $300 \text{ кВт}\cdot\text{ч}\backslash\text{мес}$ » означает, что разница в показаниях установленного на объекте счетчика электроэнергии в начале и конце указанного месяца составила $300 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. В практическом плане эта цифра ляжет в основу взаиморасчетов с энергосбытовой компанией за февраль, а в ходе исследований на графике временного ряда электропотребления данного потребителя появится точка с абсциссой, соответствующей границе между февралем и мартом 2017 года (0 часов, 0 минут и 0 секунд 1 марта 2017 года), и ординатой в $300 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Как процесс электропотребление – управляемый (фиксируемый в базе данных, оцениваемый, прогнозируемый, нормируемый и потенцируемый) процесс потребления электроэнергии приемниками или потребителями, осуществляемый автономно либо в составе техноценоза. Управление электропотреблением осуществляется с целью максимальной экономии электроэнергии при минимизации затрат на всестороннее обеспечение

данного процесса. Вводится понятие «показателя качества электропотребления» приемника или потребителя, под которым понимается мера минимизации потребления электроэнергии, при условии обязательного выполнения основных функциональных задач по предназначению. Количественно данный показатель может быть оценен с помощью абсолютного или относительного дифлекс-параметра, под которым понимается отклонение (абсолютное или относительное) значения электропотребления приемника или потребителя техноценоза от нижней границы переменного доверительного интервала, построенного в процедуре дифлекс-анализа рангового параметрического распределения техноценоза по электропотреблению. Примечательно, что оценить качество электропотребления приемника или потребителя можно только в составе техноценоза.

Оптимальное управление, в конечном итоге, реализует критерий эффективности электропотребления, заключающийся в стремлении к единице целевой функции – отношения интегрального показателя качества к интегральному показателю затрат. Эффективность процесса управления электропотреблением техноценоза в целом может быть оценена по результатам реализации ZP-анализа. При этом интегральный показатель, позволяющий оценить успешность процесса оптимального управления электропотреблением, по сути, представляет собой относительный Z-потенциал энергосбережения техноценоза. При этом на отдельных этапах реализации ZP-плана энергосбережения применяются Z1- и Z2-потенциалы. Результирующий интегральный показатель, отражающий степень близости текущей аппроксимационной кривой рангового параметрического распределения по электропотреблению к нижней границе переменного доверительного интервала (ограничивающей Z1- или Z2-потенциал), определяется как отношение интегрального показателя качества, рассчитанного для текущего момента времени, к показателю, соответствующему нижней границе. Затраты на реализацию оптимального управления электропотреблением также оцениваются интегральным показателем, который отражает степень отличия совокупных затрат на энергосбережение, рассчитанных на текущем временном интервале, от стоимости электроэнергии, соответствующей Z-потенциалу (Z1 или Z2). В условиях индивидуальных тарифов на электроэнергию, предъявляемых на отдельных этапах управления, данный показатель определяется как прибавленное к единице отношение, в числителе которого находятся интегральные совокупные затраты на энергосбережение, а в знаменателе – разность в интегральной стоимости электроэнергии, потребленной техноценозом в целом. При этом от стоимости электроэнергии на текущем временном интервале отнимается стоимость на временном интервале, в котором достигается Z-потенциал энергосбережения.

Целью данных лабораторных работ является ознакомление с электропотреблением, его расчетом при включении в сеть различных типов потребителей.

Лабораторная работа №1

«ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ»

Сведения из теории

1. Понятие электропотребления

Электропотребление – это количество энергоресурсов, которое необходимо и достаточно для обеспечения технологического процесса при заданных параметрах производства и окружающей среды. От чего зависит электропотребление? Базовое правило такое: чем мощней прибор и чем дольше он работает, тем больше электроэнергии потребляет. Например, LCD-телевизор мощностью 0,2 кВт за шесть часов работы израсходует столько же энергии, сколько обогреватель мощностью 1,2 кВт за час. Электропотребление приборов зависит, конечно, и от режима работы: компьютер в режиме ожидания «съедает» примерно в 25 раз меньше, чем в рабочем состоянии. А брызгер с отключенным нагревателем – в 40 с лишним раз меньше, чем с включенным на полную мощность.

Информацию о потребляемой мощности конкретного прибора можно найти в руководстве по эксплуатации и на наклейке с обратной стороны самого прибора. Чтобы рассчитать электропотребление плиты, телевизора или какого-либо иного прибора за месяц, надо его потребляемую мощность (в кВт) умножить на время его работы. Возьмем тот же телевизор мощностью 0,2 кВт. Если он работает в среднем по 3 часа в день ежедневно, то его электропотребление за месяц составит около:

$$W = 0,2 \text{ кВт} \cdot 3 \text{ ч} \cdot 30 \text{ дней} = 18 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.1)$$

Чтобы вычислить расходы на электроэнергию, нужно умножить полученное число на стоимость 1 кВт·ч по тарифу Вашего региона.

Также электропотребление можно рассчитать с помощью счетчика. Допустим, на нашем счетчике написано 400 об. Это значит, что через 400 оборотов потребленная энергия будет равна 1 кВт·ч, тогда за 1 оборот диска на счетчике энергия будет определяться по формуле:

$$K = \frac{1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}{400} = \frac{1 \text{ кВт} \cdot 3600 \text{ с}}{400} = 9 \text{ кДж} \quad (1.2)$$

То есть за 1 оборот диска выделяется 9 кДж энергии.

Тогда, чтобы найти электропотребление какого-либо прибора, нужно воспользоваться формулой:

$$W = \frac{K}{T} \cdot t \quad (1.3)$$

где T – период вращения диска счетчика.

2. Понятие коэффициента мощности ($\cos \varphi$)

В лабораторной работе рассматривается способ расчета потребляемой мощности. В частности будет рассчитываться угол φ который важно рассматривать по отношению к потребителю электроэнергии – угол сдвига между током и напряжением. Данный угол характеризует коэффициент мощности $\cos(\varphi)$. Коэффициент мощности – безразмерная физическая величина, характеризующая потребителя переменного электрического тока с точки зрения наличия в нагрузке реактивной составляющей и мощности искажения (собирательное название – неактивная мощность). Следует отличать понятие «коэффициент мощности» от понятия «косинус фи», который равен косинусу сдвига фазы переменного тока, протекающего через нагрузку, относительно приложенного к ней напряжения. Второе понятие используют в случае синусоидальных тока и напряжения, и только в этом случае оба понятия эквивалентны. В общем случае он определяется как показано на векторной диаграмме.

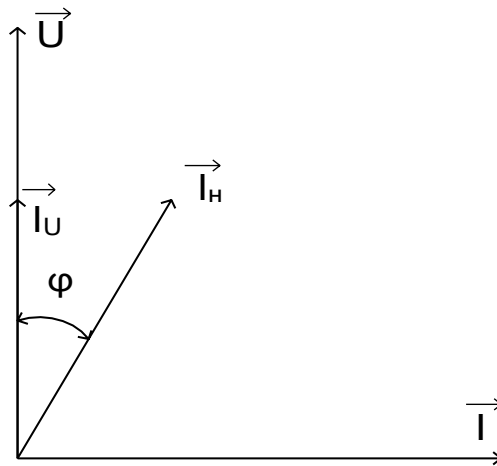


Рис. 1.1. Векторная диаграмма для определения угла φ

\vec{U} – вектор напряжения на нагрузке, \vec{I}_n – вектор тока на нагрузке, \vec{I}_U – вектор тока, совпадающий по фазе с напряжением и равный по модулю проекции тока нагрузки на вектор напряжения, \vec{I} – ток, носящий индуктивный характер

В нашем случае косинус этого угла будет определяться по формулам (1.4 – 1.6):

$$S = U \cdot I \quad (1.4)$$

$$P = \frac{K}{T} \quad (1.5)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (1.6)$$

где K – количество энергии за один оборот диска (или иной сигнал) счетчика электроэнергии кДж, T – период вращения диска счетчика, с, P – активная мощность, кВт, S – полная мощность, кВА.

Прим. отношение:

$$\frac{Q}{S} = \frac{U_c}{U} = \sin(\varphi) \quad (1.7)$$

3. Измерение коэффициента мощности ($\cos \varphi$) методом векторных диаграмм

Для измерения коэффициента мощности используются токовые клещи (ТК), тороидальная катушка индуктивности с 10, 20 витками провода, соединенная последовательно с лампой накаливания мощностью 60–200 Вт.

С помощью ТК производится измерение тока нагрузки I_n , тока катушки индуктивности I_U , совпадающего по фазе с напряжением питания и разностного тока ΔI :

$$\vec{\Delta I} = \vec{I}_n - \vec{I}_U \quad (1.8)$$

\vec{I}_n и \vec{I}_U измеряются согласно схеме рис. 1.2, а разностный ток $\vec{\Delta I}$ измеряется при совмещении двух проводов с этими токами согласно схеме рис. 1.3. Причем провода можно совместить двумя способами, тогда получится два разных значения разностного тока, для дальнейших расчетов используется наименьший.

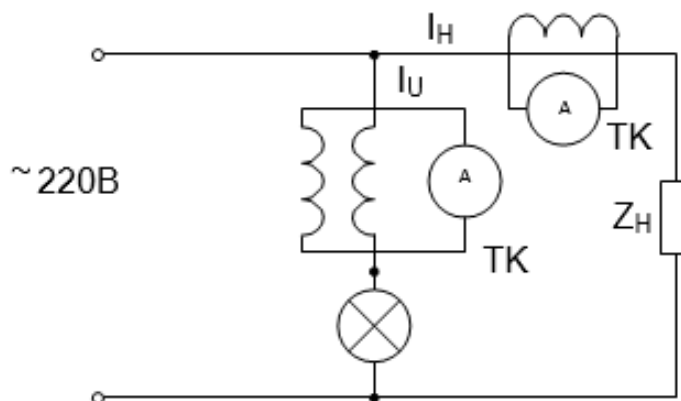


Рис. 1.2. Схема для измерения I_n и I_U

I_n – ток через нагрузку, I_U – ток, совпадающий по фазе с напряжением, ТК – токовые клещи, Z_n – нагрузочное сопротивление

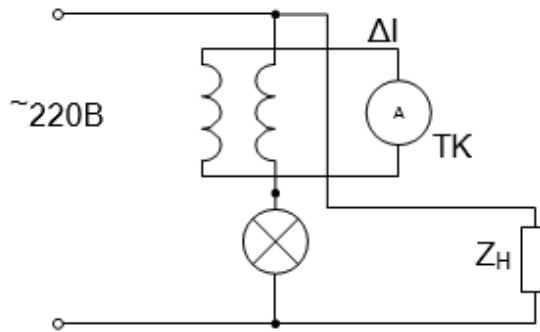


Рис. 1.3. Схема для измерения ΔI

ΔI – разностный ток, ТК – токовые клещи, $Z_{\text{н}}$ – нагрузочное сопротивление

На основании этих данных строится векторная диаграмма (рис. 1.4), по которой находится $\cos \varphi$, $\sin \varphi$. Произвольно в масштабе откладывается вектор $\vec{I}_{\text{н}}$ и относительно этого вектора с помощью циркуля откладываются векторы $\vec{I}_{\text{У}}$ и $\vec{\Delta I}$ как показано на рисунке 1.4.

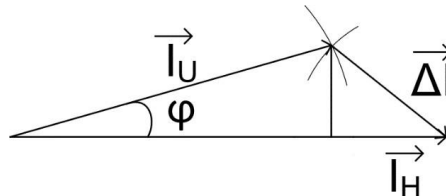


Рис. 1.4. Векторная диаграмма для определения $\cos \varphi$

$\vec{I}_{\text{н}}$ – ток через нагрузку, $\vec{I}_{\text{У}}$ – ток, совпадающий по фазе с напряжением, $\vec{\Delta I}$ – разностный ток

Вопросы для самопроверки:

- 1) Что такое электропотребление? Как его посчитать?
- 2) Что такое $\cos \varphi$? Как его посчитать?
- 3) На основании рисунков 1.2, 1.3 рассказать, как определить $\cos \varphi$ опытным путем
- 4) Рассказать ход работы.
- 5) Задача. Дано: на счётчике электроэнергии (схема на рис 1.5) написано 900 об., измеренный период вращения диска $T=5$ с, амперметр показывает $I=7,5$ А, Вольтметр $U=127$ В. Найти энергопотребление за 5 часов, сопротивление резистора и ёмкость конденсатора при частоте сети $f=50$ Гц, а также коэффициент мощности.

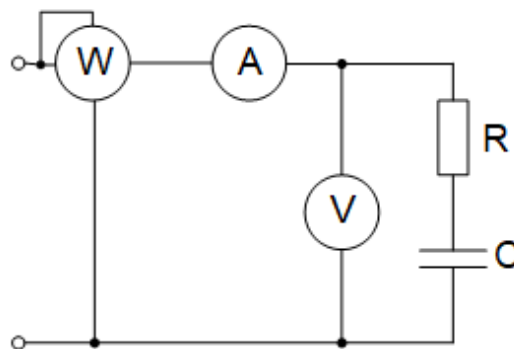


Рис. 1.5. Данная схема задачи

W – счётчик электроэнергии, R – активное сопротивление нагрузки, C – ёмкость реактивного сопротивления нагрузки, V – вольтметр, A – амперметр

Порядок выполнения лабораторной работы

Цель работы:

На основе экспериментальных данных и расчетных величин построить временные зависимости электропотребления. Рассчитать для каждого опыта R_i и X_i .

ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ НЕОБХОДИМО РАСПЕЧАТАТЬ И ПРИНЕСТИ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ БЛАНК ДЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ – [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#) ДАННОГО ПОСОБИЯ.

4. Экспериментальное исследование

4.1 Собрать схему по рисунку 1.6

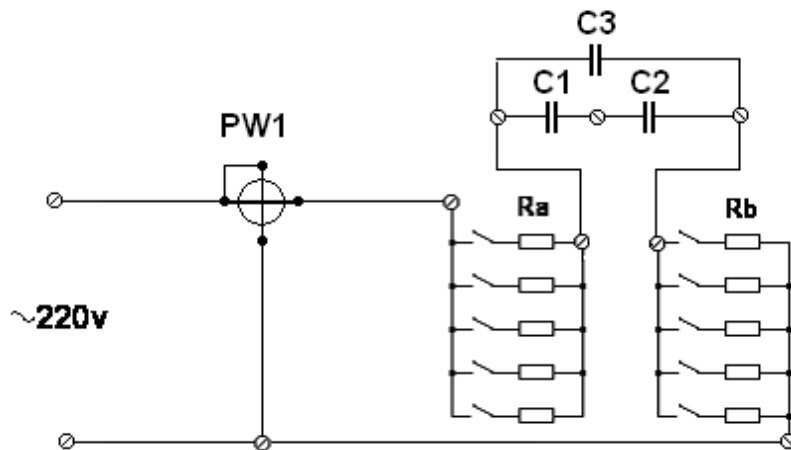


Рис. 1.6. Схема исследования электропотребления однофазной сети

R_a и R_b – активное сопротивление нагрузки, включаемые последовательно, регулируются параллельным включением параллельных резисторов соответствующими выключателями на стенде; C_1 , C_2 , C_3 – конденсаторы, имеющие одинаковую емкость; $PW1$ – индуктивный счетчик электропотребления.

Так как в процессе эксплуатации счетчика происходит изменение технических параметров и, в том числе, коэффициента K , который равен 9 кДж на 1 оборот диска, необходимо произвести калибровку счетчика с использованием тех измерительных приборов, которые применяются в ЛР. Для калибровки измеряется напряжение линии U , ток I при замкнутом конденсаторе и время одного оборота диска $T_{сч}$. Тогда скорректированный коэффициент (измерение провести при первой нагрузке), кДж:

$$K^* = \frac{U \cdot I \cdot T_{\text{сч}}}{1000} \quad (1.9)$$

4.2 Измерить электропотребление сети при разных типах нагрузки

Измерения тока и напряжения производятся при помощи измерительных клещей (U_a – фазное напряжение, U_c – напряжение на конденсаторе, I_a – фазный ток); $T_{\text{сч}}$ – период мигания лампочки счетчика, который снимается непосредственно с счетчика электроэнергии, отсюда же снимается W .

4.3 Рассчитать активную мощность счетчика P , полную мощность S_1 , реактивную мощность счетчика Q и потребляемую мощность W . Занести полученные данные в таблицу 1.1.

Таблица 1.1. Данные экспериментального исследования

Опытные данные							Расчетные данные			
	Время местн t	W, кВт·ч	U_a , В	U_c , В	I_a , А	$T_{\text{сч}}$, с	P, кВт	S_1 , ВА	Q, кВАр	W, кВт·ч
0										0
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Прим.

$$\Delta W_i = P_{i-1} \cdot \frac{t_i - t_{i-1}}{60} \quad (1.10)$$

Таблица 1.1.1

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_i - t_{i-1}$, МИН										
ΔW_i , кВт·ч										

4.4 Рассчитать $\text{Sin}(\varphi)$, φ , $\text{Cos}(\varphi)$, P_2 , R , X , Z для каждого опыта. Занести полученные данные в таблицу 1.2

Таблица 1.2. Характеристика нагрузки

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sin(φ)										
φ										
Cos(φ)										
P_2 , кВт										
R, Ом										
X, Ом										
Z, Ом										

где:

$$P_2 = U_a \cdot I_a \cdot \cos(\varphi) \quad (1.11)$$

Примечание: Токи и напряжения измеряются токовыми клещами. Определить Cos(φ) исходя из того, что Sin(φ)= U_C / U_a .

2.5 На основе экспериментальных данных и расчетных величин построить временные зависимости электропотребления.

Лабораторная работа №2
«ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ»

Сведения из теории

1. Общие сведения

Основу современного оборудования, в качестве потребителей электрической энергии, составляют различные электронные устройства, такие, как ПК (персональный компьютер), современные источники света, различные инверторы (преобразователи) и ряд других устройств. Для питания данных устройств на их входе применяется, как правило, преобразование переменного напряжения в постоянное на основе мостовых диодных выпрямителей, согласно рисунку 2.1.

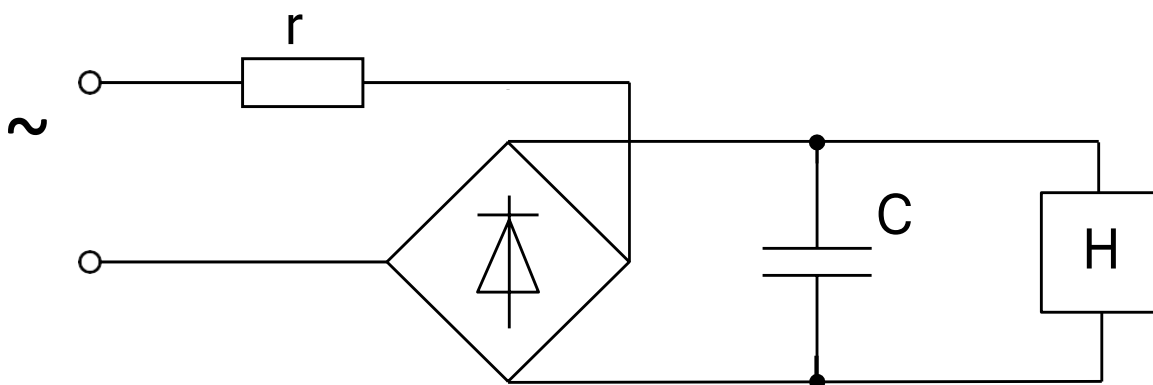


Рис. 2.1. Упрощенная схема входных цепей

r – сопротивление линии, C – емкость, H – нагрузка

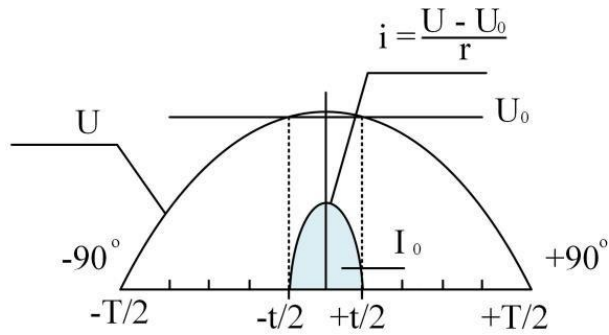


Рис. 2.2. Импульсы тока при $g_s \gg T$

I_0 – постоянная составляющая импульса тока; U_0 – напряжение на нагрузке;
 i – график импульса тока; u – график входного напряжения, t – период импульса,
 T – период половины косинусоиды входного напряжения

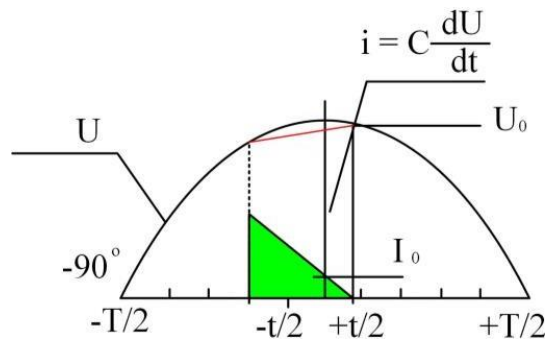


Рис. 2.3. Импульсы тока при $g_s \ll T$

I_0 – постоянная составляющая импульса тока; U_0 – напряжение на нагрузке;
 i – график импульса тока; u – график входного напряжения, t – период импульса,
 T – период половины косинусоиды входного напряжения

При этом форма тока приобретает импульсный характер (рис 2.2, 2.3). Для численного анализа, в этом случае, необходимо использовать преобразование Фурье. Среднее значение выпрямленного тока (анализ расчетных соотношений производится при рассмотрении одной полуволны, т.к. вторая идентична первой):

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} i(t) dt \quad (2.1)$$

Действующее значение N -й гармоники импульсного тока Cos и Sin составляющих согласно формулам 2.2 и 2.3:

$$I_N^C = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} i(t) \cos(\omega_N t) dt \quad (2.2)$$

$$I_N^S = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} i(t) \sin(\omega_N t) dt \quad (2.3)$$

Электрическая мощность на активном сопротивлении цепи – r , в величину которого входит также и активное сопротивление линии электропередачи:

$$P = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} i^2(t) r dt \quad (2.4)$$

Активная мощность высших гармоник в сети, где N – номер гармоники:

$$P_N = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} U_M \cos(\omega_1 t) \cdot I_{Mt} \cos(\omega_N t) dt = 0 \quad (2.5)$$

Выражение (2.5) является преобразованием Фурье для гармонического анализа сигналов на основании выражений (2.2) и (2.3), а так как синусоидальный сигнал входного напряжения высших гармоник не содержит, то интеграл сходится к нулю и высшие гармоники входного тока являются реактивными в отношении нагрузки, но, на основании выражения (2.4), они создают активные потери на сопротивлении линии передачи.

Импульсный характер тока приводит к целесообразности использования параметров импульсных сигналов, таких как скважность Q (рисунок 2.2). Скважность Q определяет, во сколько раз период импульса T больше его длительности t_1 . Скважность Q определяется как:

$$Q = \frac{T}{t_1} \quad (2.6)$$

Или по углу отсечки:

$$Q = \frac{180^\circ}{\varphi_{отс}} \quad (2.7)$$

Величина, обратная скважности, называется коэффициентом заполнения K_z . Он характеризует долю временного интервала импульса тока относительно полупериода сетевого напряжения. Коэффициент заполнения обратно пропорционален скважности:

$$K_3 = \frac{1}{Q} = \frac{t_1}{T} = \frac{\varphi_{\text{отс}}}{180^\circ} \quad (2.8)$$

Вывод:

- 1) Из выражения (2.7) мы видим, что увеличение угла отсечки ведет к уменьшению гармоник, а для токов схемы, изображенной на рисунке 2.1, при угле отсечки в 180 градусов, гармоники вообще отсутствуют.
- 2) Токи высших гармонических составляющих не создают активной нагрузки, а являются токами реактивной мощности, повышающими нагрев линий питания электрооборудования.

2. Основные расчетные соотношения

Рассмотрим наиболее применяемую схему питания, соответствующую рисунку 2.2. Форма тока хорошо аппроксимируется полуволной косинусоиды, повышенной в Q раз частоты, а ее числовые параметры являются общеизвестными величинами.

Постоянная составляющая импульсов тока из выражения (2.1):

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_{-t/2}^{+t/2} I_{Mt} \cos(Q\omega_1 t) dt = \frac{t}{T} \frac{2}{\pi} I_{Mt} = \frac{2}{\pi} K_3 I_{Mt} \quad (2.9)$$

где I_{Mt} – амплитудное значение импульса тока с длительностью t ;
 K_3 – коэффициент заполнения.

Из выражения (2.4) найдем рассеиваемую мощность на ограниченном сопротивлении r , а также действующее значение тока сети – I :

$$P = \frac{1}{T} \int_{-t/2}^{+t/2} I_{Mt}^2 \cos^2(Q\omega_1 t) r dt = \frac{t}{T} \frac{I_{Mt}^2}{2} r = K_3 \frac{I_{Mt}^2}{2} r \quad (2.10)$$

Поделим обе части уравнения на r и получим уравнение для тока:

$$I = \sqrt{K_3} \frac{I_{Mt}}{\sqrt{2}} \quad (2.11)$$

Отнесем эту мощность к рассеиваемой мощности постоянной составляющей импульсов тока:

$$P_0 = I_0^2 r = \frac{4}{\pi^2} K_3^2 I_{Mt}^2 r \quad (2.12)$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{I^2}{I_0^2} = \frac{\pi^2}{8} \frac{1}{K_3} = 1,23Q \text{ или } Q = 0,81 \frac{I^2}{I_0^2} \quad (2.13)$$

Для качественного анализа эффективности использования сети введем коэффициент полезной нагрузки (КПН) линии. КПН представляет отношение потерь на сопротивление линии от первой косинусной гармоники импульсов тока к суммарным тепловым потерям:

$$\text{КПН} = \frac{P_1}{P} = \frac{I_1^2 r}{I^2 r} = \frac{I_1^2}{I^2} \quad (2.14)$$

Следует понимать, что именно первая косинусная гармоника является активной, а все остальные являются реактивными составляющими и не создают полезной нагрузки, но создают тепловые потери в сети.

Для количественной оценки КПН из косинусной части выражений (2.2) и (2.3) выразим активную составляющую тока первой гармоники:

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_{-t/2}^{+t/2} I_{Mt} \cos(Q\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) dt \quad (2.15)$$

При $K_3=1$ ($Q=1$):

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_{-t/2}^{+t/2} I_{Mt} \cos^2(\omega_1 t) dt = I \quad (2.16)$$

$$\frac{I_1}{I} = 1; \quad \frac{I_1}{I_0} = K_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 \Rightarrow \text{КПН} = 1 \quad (2.17)$$

При $K_3 < 1$, в зависимости от K_3 , изменение тока первой гармоники происходит в диапазоне от $K_1=(1,41 \dots 1,11)$ от постоянной составляющей, а относительное изменение от 1,27 до 1.

При этом КПН, с учетом соотношения (2.9), можно выразить относительно тока I_0 и K_3 :

$$\text{КПН} = \frac{P_1}{P} = \frac{I_1^2}{I^2} = K_1^2 \frac{I_0^2}{I^2} = K_1^2 \cdot 0,81 \cdot K_3 \quad (2.18)$$

$$0,81 \cdot K_1^2 = K_{\Pi}; \quad \text{КПН} = K_{\Pi} \cdot K_3 \quad (2.19)$$

Где $K_{\Pi} = (1,62 \dots 1)$ – коэффициент поправки. Коэффициент изменения тока первой гармоники K_1 от угла отсечки, с высокой точностью, можно аппроксимировать функцией:

$$K_1 = 1,11 + 0,3 \cdot \cos \varphi = 1,11 \cdot (1 + 0,27 \cdot \cos \varphi) \quad (2.20)$$

$$K_{\Pi} = (1 + 0,27 \cdot \cos \varphi)^2; \quad \varphi = 90^\circ \cdot K_3 \quad (2.21)$$

Извлекая квадратный корень из числового значения, для КПН получим эквивалентный косинус угла нагрузки:

$$\sqrt{\text{КПН}} = \sqrt{\frac{I_1^2}{I^2}} = \frac{I_1}{I} = \cos(\varphi_{\text{H}}) \quad (2.22)$$

Таблица 2.1. Данные эксперимента

K_3	K_1	K_{Π}	КПН	$\cos \varphi$
0	1,41	1,61	0	0
0,1	1,406	1,601	0,16	0,4
0,2	1,395	1,576	0,31	0,55
0,3	1,377	1,535	0,46	0,67
0,4	1,352	1,48	0,59	0,76
0,5	1,322	1,415	0,7	0,83
0,6	1,286	1,339	0,8	0,89
0,7	1,246	1,257	0,87	0,93
0,8	1,202	1,17	0,93	0,96
0,9	1,156	1,082	0,97	0,98
1	1,11	1	1	1

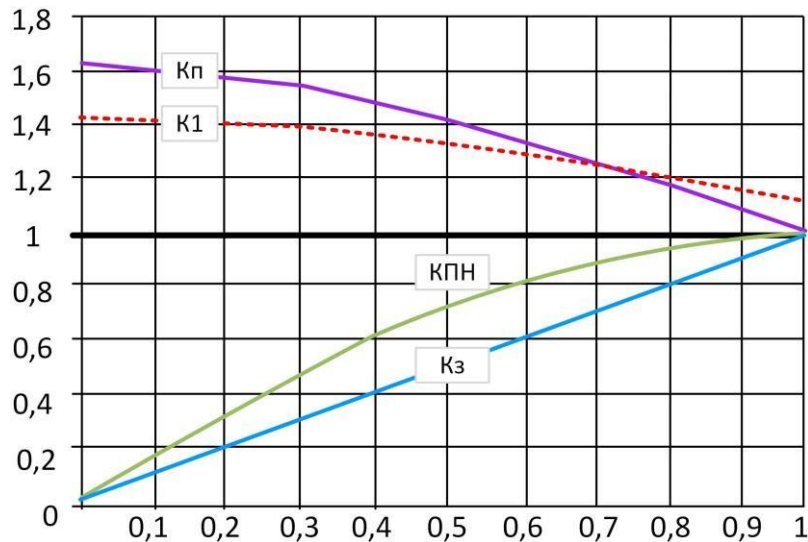


Рис. 2.4. Графики коэффициентов

Коэффициент тепловых потерь можно применить при определении длины подводящей линии, при условии равенства тепловых потерь с гармоническим и импульсным токами, т. е.:

$$P_1 = I_1^2 \cdot r_1 = K \cdot I_1^2 \cdot l_1 \quad (2.23)$$

Соответственно:

$$P = I^2 \cdot r_2 = K \cdot I^2 \cdot l_2 \quad (2.24)$$

При равенстве $P_1=P$ имеем:

$$\frac{K \cdot I_1^2 \cdot l_1}{K \cdot I^2 \cdot l_2} = 1 \quad (2.25)$$

Тогда:

$$\frac{l_2}{l_1} = \text{КПН} \quad (2.26)$$

Данный пример показывает экономическую целесообразность разработки методов и способов анализа потерь, при негармоническом токе в сетях промышленной частоты.

В трехфазной сети питания с нулевым обратным проводом возникает проблема его перегрузки (рис. 2.5). Если при обычных активных потребителях и равномерной фазовой нагрузке ток нулевого провода отсутствует, то, в данном случае, импульсы тока в обратном проводе взаимно не компенсируются и имеют частоту следования в три раза выше частоты сети и происходит трехкратная перегрузка обратного провода.

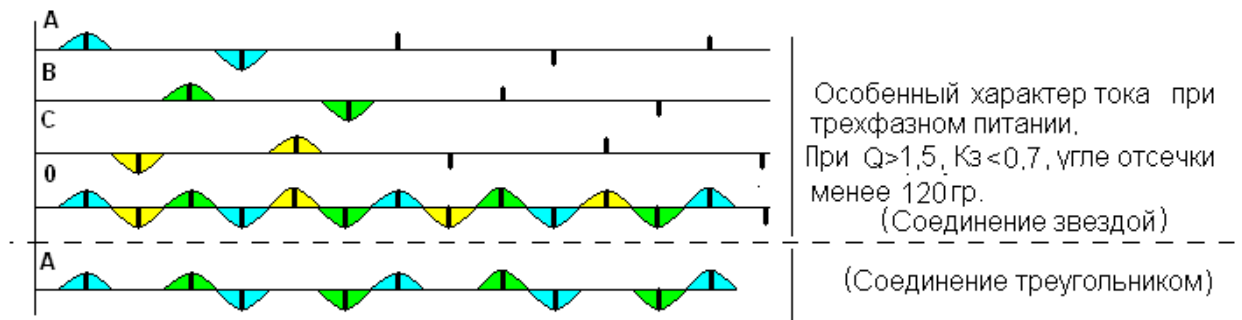


Рис. 2.5. Характер тока в фазах и нулевом проводе

Для схемы питания, соответствующей рисунку 2.3, импульсы тока имеют треугольную форму и несложно показать, что для данной формы действующее значение тока за время t будет определяться как:

$$I = \frac{I_{Mt}}{\sqrt{3}} \quad (2.27)$$

А среднее значение:

$$I_0 = \frac{I_{Mt}}{2} \quad (2.28)$$

Тогда отношение $I_0/I = 0,87$, что близко к аналогичному отношению для косинусных импульсов: $I_0/I = 0,9$. При малых углах отсечки отношения сетевых токов для этих схем (интегральные значения) $I_1/I_0 = 1,41$ равны между собой. Эти показатели предполагают, что все остальные расчетные соотношения этих схем одинаковы.

3. Методы повышения КПН

В целом, требуется дальнейший анализ методов и способов повышения КПН для реальных устройств:

- 1) Использование схемы «мотор – генератор».

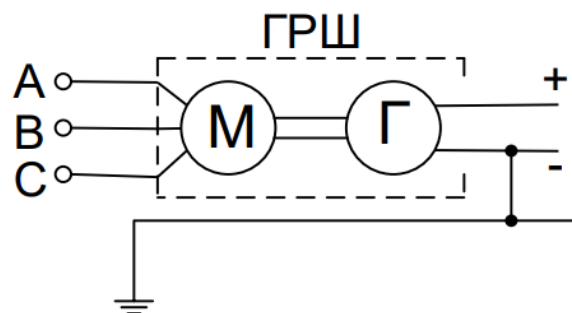


Рис. 2.6. Схема «мотор-генератор»

- 2) Фильтрация пассивными и активными фильтрами.

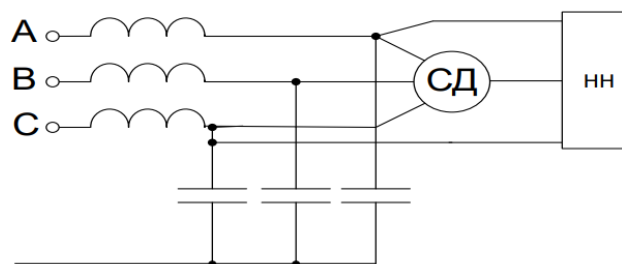


Рис. 2.7. Схема фильтрации фильтрами

СД – синхронный двигатель; НН – нелинейная нагрузка

3) Фильтрация с помощью буферного синхронного генератора / двигателя.

4) Применение схем постоянного тока.

Основу регулируемого корабельного привода в настоящее время составляют частотные преобразователи. Схемой питания этих преобразователей служит выпрямительный диодный мост с низким КПН ≤ 0.3 .

Поэтому возникает необходимость применения некоторых схем повышения КПН:

1) Переход на системы постоянного тока.

2) Применение активных и пассивных фильтров.

Рассмотрим работу активного фильтра на примере корректора коэффициента мощности RFG-FAN7530.

Активный корректор коэффициента мощности должен удовлетворять трем условиям:

- Форма потребляемого тока должна быть «в фазе» с напряжением. Мгновенное значение тока, потребляемого от источника, должно соответствовать мгновенному напряжению сети.
- Отбираемая от источника мощность должна оставаться постоянной даже в случае изменения напряжения сети. Это значит, что при снижении напряжения сети ток нагрузки должен быть увеличен, и наоборот.
- Напряжение на выходе PFC-корректора не должно зависеть от величины нагрузки. При снижении напряжения на нагрузке должен быть увеличен ток через нее, и наоборот.

Существует несколько схем, при помощи которых можно реализовать активную коррекцию коэффициента мощности. Наиболее популярна в настоящее время «схема преобразователя с повышением» (boost converter). Эта схема удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к современным источникам питания.

Во-первых, она позволяет работать в сетях с различными значениями питающего напряжения (от 85 до 270 В) без ограничений и каких-либо дополнительных регулировок.

Во-вторых, она менее восприимчива к отклонениям электрических параметров сети (скачки напряжения или кратковременное его отключение).

Еще одно достоинство этой схемы – более простая реализация защиты от перенапряжений. Упрощенная схема корректора коэффициента мощности, «преобразователя с повышением», приведена на рис. 2.8.

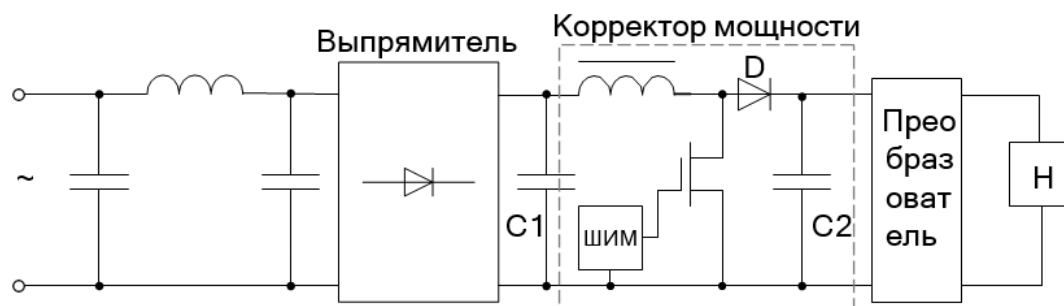


Рис. 2.8. Схема корректора коэффициента мощности

ШИМ – широтно-импульсный модулятор, Н – нелинейная нагрузка;
С1 и С2 – конденсаторы

4. Принцип работы корректора

Стандартный корректор коэффициента мощности представляет собой AD/DC-преобразователь с широтно-импульсной (PWM) модуляцией. Модулятор управляет мощным ключом, который преобразует постоянное или выпрямленное сетевое напряжение в последовательность импульсов, после выпрямления которых на выходе получают постоянное напряжение.

Временные диаграммы работы корректора показаны на рисунке 2.9. При включенном MOSFET-ключе ток в дросселе линейно нарастает – при этом диод заперт, а конденсатор С2 разряжается на нагрузку. Затем, когда транзистор запирается, напряжение на дросселе «открывает» диод и накопленная в дросселе энергия заряжает конденсатор С2 (и одновременно питает нагрузку). В приведенной схеме (в отличие от источника без коррекции) конденсатор С1 имеет малую емкость и служит для фильтрации высокочастотных помех. Частота преобразования составляет 50...100 кГц. В простейшем случае схема работает с постоянным рабочим циклом. Существуют способы увеличения эффективности коррекции динамическим изменением рабочего цикла (согласованием цикла с огибающей напряжения от сетевого выпрямителя).

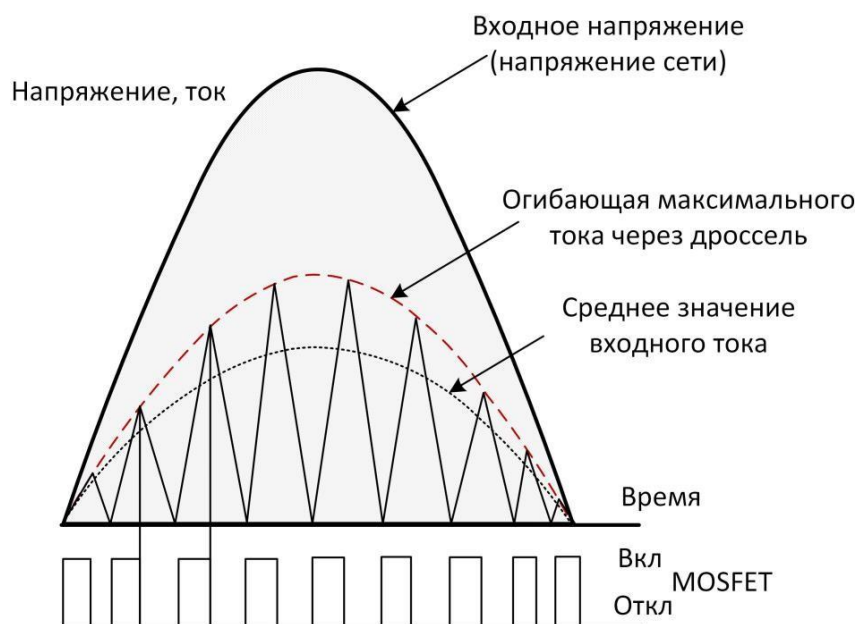


Рис. 2.9. Временные диаграммы работы корректора коэффициента мощности
MOSFET – полевой транзистор

Схема «преобразователя с повышением» может работать в трех режимах: непрерывном, дискретном и так называемом «режиме критической проводимости». В дискретном режиме в течение каждого периода ток дросселя успевает «упасть» до нуля и через некоторое время снова начинает возрастать, а в непрерывном – ток, не успев достигнуть нуля, снова начинает возрастать. Режим критической проводимости используется реже, чем два предыдущих. Он сложнее в реализации. Его смысл в том, что MOSFET открывается в тот момент, когда ток дросселя достигает нулевого значения. При работе в этом режиме упрощается регулировка выходного напряжения.

Выбор режима зависит от требуемой выходной мощности источника питания. В устройствах мощностью более 400 Вт используется непрерывный режим, а в маломощных – дискретный. Активная коррекция коэффициента мощности позволяет достичь значений 0,97...0,99 при коэффициенте нелинейных искажений THD (Total Harmonic Distortion) в пределах 0,04...0,08.

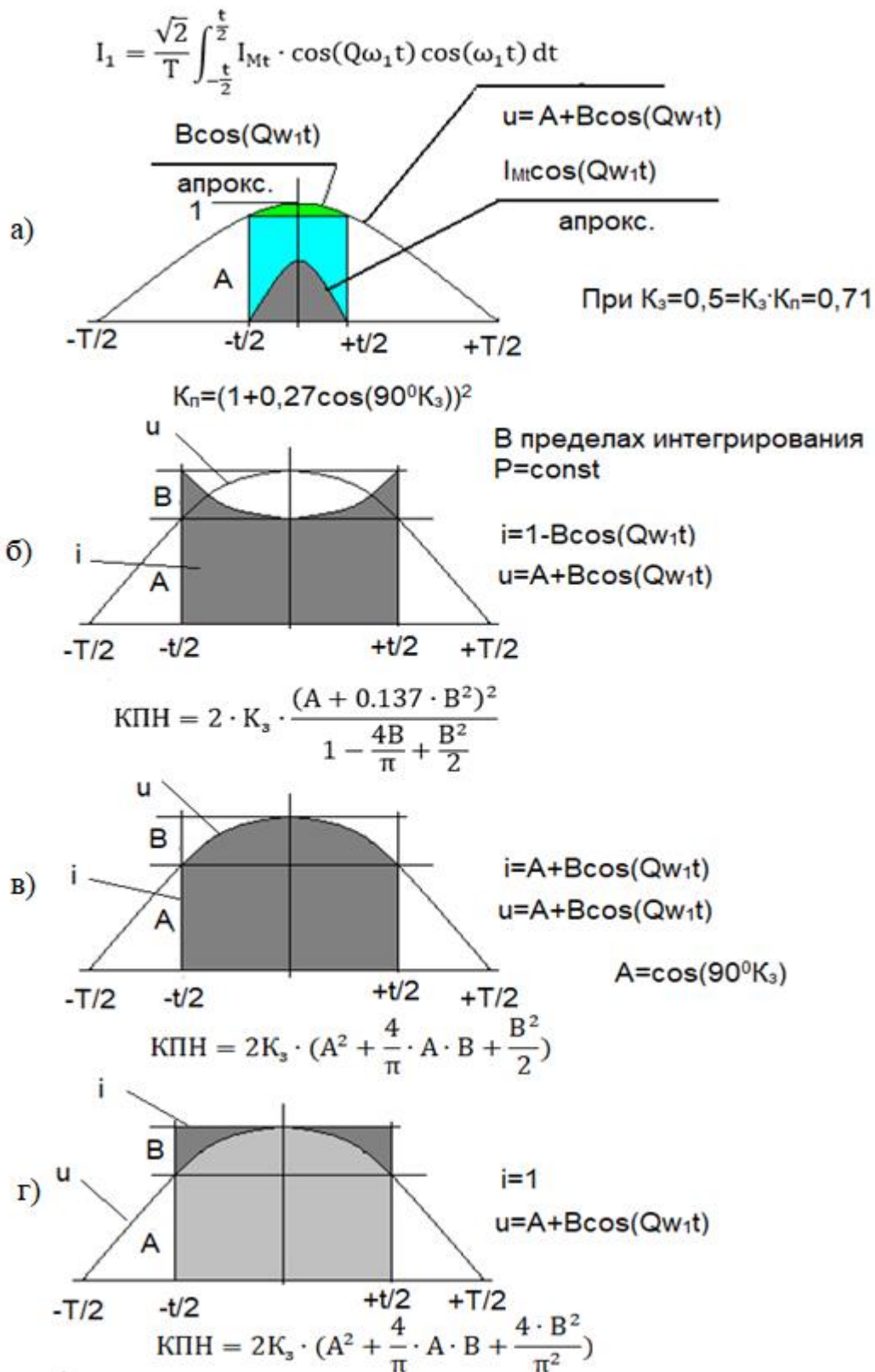


Рис. 2.10. Аналитическое определение коэффициента нагрузки в зависимости от формы тока

Вопросы для самопроверки:

- 1) Записать закон Фурье для определения нулевой, а также N–й гармоники импульсного тока Cos и Sin составляющих.
- 2) Что такое скважность? Как ее посчитать?
- 3) Что такое КПН? Как его посчитать?
- 4) Токи каких гармоник идут на полезную работу, а какие создают потери в сети?
- 5) Как будет меняться КПН при изменении скважности Q ?
- 6) Какие существуют способы повышения КПН для реальных устройств?
- 7) Рассказать принцип работы корректора мощности.
- 8) Рассказать ход работы.
- 9) Определить КПН в зависимости от угла нагрузки φ при различных формах тока (рис. 2.10) и заполнить таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Определение КПН

	30°	45°	60°
а			
б			
в			
г			

Порядок выполнения лабораторной работы

Цель работы:

Исследовать влияние современного оборудования на параметры электрических сетей, способы измерения электропотребления нелинейных элементов. Рассмотреть методы и способы повышения КПН для реальных устройств. Найти КПН при различных формах тока, реализуемых электронными корректорами мощности.

ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ НЕОБХОДИМО РАСПЕЧАТАТЬ И ПРИНЕСТИ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ БЛАНК ДЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ – [ПРИЛОЖЕНИЕ 2](#) ДАННОГО ПОСОБИЯ.

5. Общие сведения и формулы, необходимые для понимания для проведения эксперимента

Основу современного оборудования, в качестве потребителей электрической энергии, составляют различные электронные устройства, такие, как ПК (персональный компьютер), современные источники света, различные инверторы

(преобразователи) и ряд других устройств. Для питания данных устройств на их входе применяется, как правило, преобразование переменного напряжения в постоянное на основе мостовых диодных выпрямителей (рис. 2.11, а). При этом форма тока приобретает импульсный характер (рис. 2.11, б и 2.11, в). Для численного анализа, в этом случае, необходимо использовать преобразования Фурье.

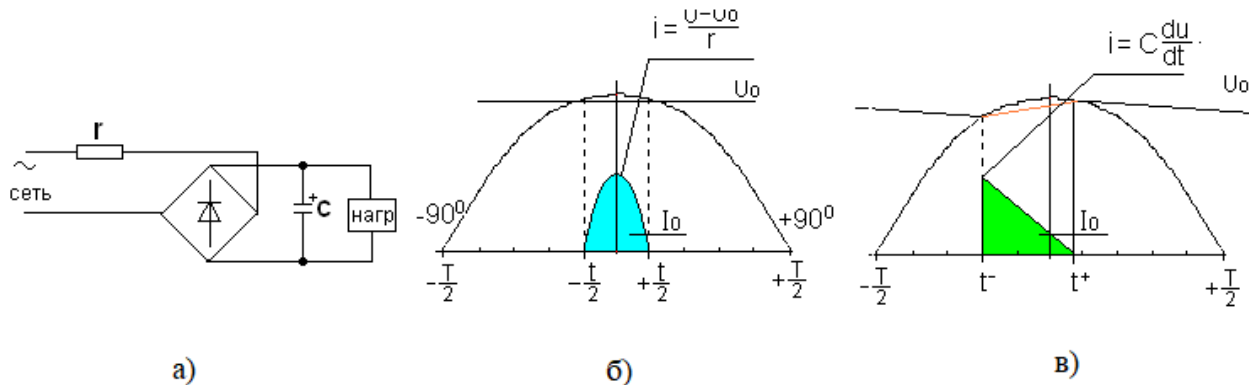


Рисунок 2.11 – Мостовой диодный выпрямитель и импульсы тока

а) упрощенная схема входных цепей

б) импульсы тока при $rC \gg T$

в) импульсы тока при $rC \ll T$

Отношение $T/t=Q$ определяется как скважность, а $1/Q=K_3$ – коэффициент заполнения. Угол отсечки тока $\varphi=90^\circ \cdot K_3$.

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_{-t/2}^{+t/2} I_{Mt} \cos(Q\omega_1 t) dt = \frac{t}{T} \frac{2}{\pi} I_{Mt} = \frac{2}{\pi} K_3 I_{Mt} \quad (2.29)$$

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_{-t/2}^{+t/2} I_{Mt}^2 \cos^2(Q\omega_1 t) dt = \frac{t}{T} \frac{I_{Mt}^2}{2} = K_3 \frac{I_{Mt}^2}{2} \quad (2.30)$$

$$\frac{I_0^2}{I^2} = 0,81 \cdot K_3; \quad I = 1,11 \cdot I_0 \cdot \sqrt{Q} \quad (2.31)$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_{-t/2}^{+t/2} I_{Mt} \cos(Q\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) dt \quad (2.32)$$

Определяем коэффициент полезной нагрузки сети (КПН) как отношение мощностей потерь ЛЭП от полезной и полной нагрузок:

$$\text{КПН} = \frac{P_1}{P} = \frac{I_1^2}{I^2} = K_1^2 \frac{I_0^2}{I^2} = K_1^2 \cdot 0,81 \cdot K_3 \quad (2.33)$$

$$0,81 \cdot K_1^2 = K_{\Pi}; \quad K_{\Pi} = K_{\Pi} \cdot K_3 \quad (2.34)$$

Где $K_{\Pi} = (1,62...1)$ – коэффициент поправки. Коэффициент изменения тока первой гармоники K_1 от угла отсечки, с высокой точностью, можно аппроксимировать функцией:

$$K_1 = 1,11 + 0,3 \cdot \cos \varphi = 1,11 \cdot (1 + 0,27 \cdot \cos \varphi) \quad (2.35)$$

$$K_{\Pi} = (1 + 0,27 \cdot \cos \varphi)^2; \quad \varphi = 90^\circ \cdot K_3 \quad (2.36)$$

Активная мощность высших гармоник в сети, где N – номер гармоники:

$$P_N = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} U_M \cos(\omega_1 t) \cdot I_{Mt} \cos(\omega_N t) dt = 0 \quad (2.37)$$

Данное выражение является преобразованием Фурье для гармонического анализа сигналов, а так как синусоидальный сигнал входного напряжения высших гармоник не содержит, то интеграл сходится к нулю и высшие гармоники входного тока являются реактивными в отношении нагрузки.

6. Экспериментальное исследование

6.1 Собрать схему экспериментальной установки.

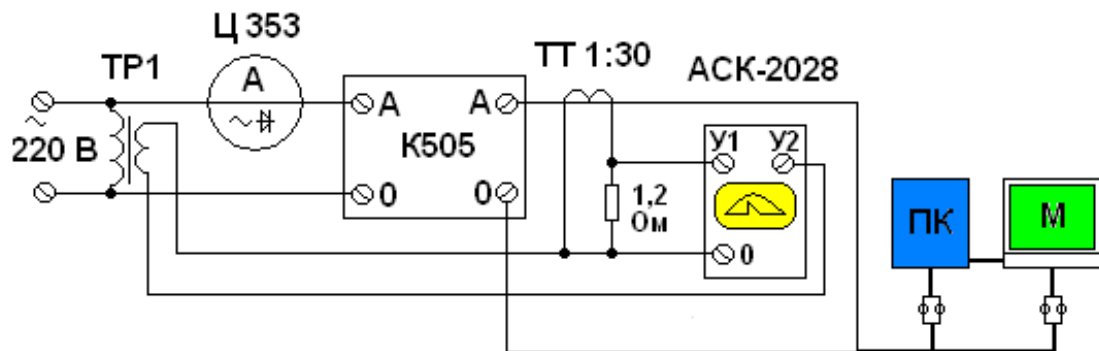


Рис. 2.12. Схема экспериментальной установки

6.2 Перед началом измерений осуществить калибровку ТК и крутизну преобразования S (А/мВ) ТТ относительно К505, при подключении вместо нелинейной нагрузки реостата 500 Ом. Выставив ток по прибору К505 – 0,71 А:

$$K = \frac{0,71 \text{ А}}{I_{\text{ТК}} \text{ (А)}} \quad (2.38)$$

Так как амплитуда тока К505 равна 1 А, то:

$$S = \frac{1 A}{U_{max}} \quad (2.39)$$

где U_{max} – амплитудное значение осциллограммы, мВ.

Учитывая, что $I_0=0,9 \cdot I$ для ТК:

$$I_M = S \cdot U_{max} \quad (2.40)$$

$$\cos\varphi = (\text{КПН})^{0,5} = \sqrt{\text{КПН}} \quad (2.41)$$

6.3 Произвести измерение электрических параметров и на основании измеренных данных заполнить таблицу 2.3.

Таблица 2.3. Данные эксперимента и расчетов

Опытные данные							Расчетные данные						
	Ц352		К505			АСК-2028							
№	I (А)	I ₀ (А)	U (В)	P (Вт)	I (А)	I _M (А)	K _з	I ₀ (А)	I ₁ (А)	I (А)	P (Вт)	КПН	cosφ нагр.
1													
2													

6.4 По результатам работы сделать выводы.

Лабораторная работа №3

«ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ»

Сведения из теории

1. Понятие электропотребления

Электропотребление – это количество энергоресурсов, которое необходимо и достаточно для обеспечения технологического процесса при заданных параметрах производства и окружающей среды. От чего зависит электропотребление? Базовое правило такое: чем мощней прибор и чем дольше он работает, тем больше электроэнергии потребляет. Например, LCD–телевизор мощностью 0,2 кВт за шесть часов работы израсходует столько же энергии, сколько обогреватель мощностью 1,2 кВт за час. Электропотребление приборов зависит, конечно, и от режима работы: компьютер в режиме ожидания «съедает» примерно в 25 раз меньше, чем в рабочем состоянии. А брызгер с отключенным нагревателем – в 40 с лишним раз меньше, чем с включенным на полную мощность.

Информацию о потребляемой мощности конкретного прибора можно найти в руководстве по эксплуатации и на наклейке с обратной стороны самого прибора. Чтобы рассчитать электропотребление плиты, телевизора или какого-либо иного прибора за месяц, надо его потребляемую мощность (в кВт) умножить на время его работы. Возьмем тот же телевизор мощностью 0,2 кВт. Если он работает в среднем по 3 часа в день ежедневно, то его электропотребление за месяц составит около

$$W = 0.2 \text{ кВт} \cdot 3 \text{ ч} \cdot 30 \text{ дней} = 18 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (3.1)$$

Чтобы вычислить расходы на электроэнергию, нужно умножить полученное число на стоимость 1 кВт·ч по тарифу Вашего региона.

Также электропотребление можно рассчитать с помощью счетчика. Допустим, на нашем счетчике написано 400 об. Это значит, что через 400 оборотов потребленная энергия будет равна 1 кВт·ч, тогда за 1 оборот диска на счетчике энергия будет определяться по формуле:

$$K = \frac{1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}{400} = \frac{1 \text{ кВт} \cdot 3600 \text{ с}}{400} = 9 \text{ кДж} \quad (3.2)$$

То есть за 1 оборот диска выделяется 9 кДж энергии.

Тогда, чтобы найти электропотребление какого-либо прибора, нужно воспользоваться формулой:

$$W = \frac{K}{T} \cdot t \quad (3.3)$$

где T – период вращения диска счетчика.

2. Понятие коэффициента мощности ($\cos \varphi$)

В лабораторной работе рассматривается способ расчета потребляемой мощности. В частности, будет рассчитываться угол φ , который важно рассматривать по отношению к потребителю электроэнергии. φ – угол сдвига между током и напряжением. Данный угол характеризует коэффициент мощности ($\cos \varphi$). Коэффициент мощности – безразмерная физическая величина, характеризующая потребителя переменного электрического тока с точки зрения наличия в нагрузке реактивной составляющей и мощности искажения (собирательное название – неактивная мощность). Следует отличать понятие «коэффициент мощности» от понятия «косинус фи», который равен косинусу сдвига фазы переменного тока, протекающего через нагрузку, относительно приложенного к ней напряжения. Второе понятие используют в случае синусоидальных тока и напряжения, и только в этом случае оба понятия эквивалентны.

Коэффициент мощности определяется по формулам (3.4 – 3.6):

$$S = U \cdot I \quad (3.4)$$

$$P = \frac{K}{T} \quad (3.5)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (3.6)$$

где K – количество энергии за один оборот диска (или иной сигнал) счетчика электроэнергии кДж, T –период вращения диска счетчика, с, P – активная мощность, кВт, S – полная мощность, кВА.

3. Электропотребление трехфазной сети

Что касается трехфазных потребителей, то при симметричной нагрузке мы можем найти общее электропотребление, как электропотребление одной фазы, умноженное на три. В случае несимметричной нагрузки надо измерить электропотребление на каждой фазе и сложить их. Для этого на практике применяется специальный трехфазный счетчик. Он требуется для организации контроля расхода энергии в промышленных цепях напряжения 380 В. Основное преимущество такого счетчика состоит в том, что трехфазные потребители (силовое оборудование) можно подсоединять к нему напрямую, без каких-либо промежуточных преобразователей. Эти приборы традиционно устанавливаются в линиях энергоснабжения промышленных предприятий или в загородных частных хозяйствах, в которых используется силовое оборудование на 380 В.

При монтаже таких устройств трехфазное напряжение следует подавать на входные клеммы, каждая из которых предназначена для подключения фаз А, В и С соответственно.

При трехфазном подключении приборов учета обеспечиваются следующие преимущества:

Во-первых, они гарантируют более высокую точность фиксации показаний, передавать которые в соответствующие инстанции можно в автоматическом или ручном режиме;

Во-вторых, при их применении, как правило, не наблюдается так называемого «перекоса фаз», обычно возникающего при одновременном включении нескольких мощных потребителей.

Также нужно отметить, что единственным недостатком этих изделий являются их значительные габариты и более сложное внутреннее устройство. При исследовании вопроса о том, как считать расход энергии в трехфазном приборе следует принять во внимание, что эта процедура ничем не отличается от уже рассмотренного процесса для однофазных счетчиков.

4. Искусственный ноль

В трехпроводных сетях трехфазного тока нейтрального провода нет. Однако в ряде случаев приходится создавать искусственную нулевую точку. Она может получиться при соединении в звезду трех одинаковых сопротивлений. Ими могут быть: три активных сопротивления r , например три одинаковые лампы накаливания, либо три одинаковых конденсатора C , либо три одинаковых индуктивных сопротивления L , либо три ветви, каждая из которых содержит сопротивление r_1 и индуктивность L_1 и т.д. Искусственный ноль является заземлением. Заземление – это устройство для защиты человека или животного от поражения электрическим током. Благодаря ему, в случае, когда человек дотронется до металлического корпуса электрооборудования, которое находится под напряжением, ток пройдет не через тело, а в землю. Также заземление обеспечивает пра-

вильные условия для работы электрооборудования.

Он может получиться при соединении в звезду трех одинаковых сопротивлений. Ими могут быть: три активных сопротивления r (рис. 3.1 а), например три одинаковые лампы накаливания, либо три одинаковых конденсатора C (рис. 3.1 б), либо три одинаковых индуктивных сопротивления L (рис. 3.1 в), либо три ветви, каждая из которых содержит сопротивление r_1 и индуктивность L_1 (рис. 3.1, г), и так далее.

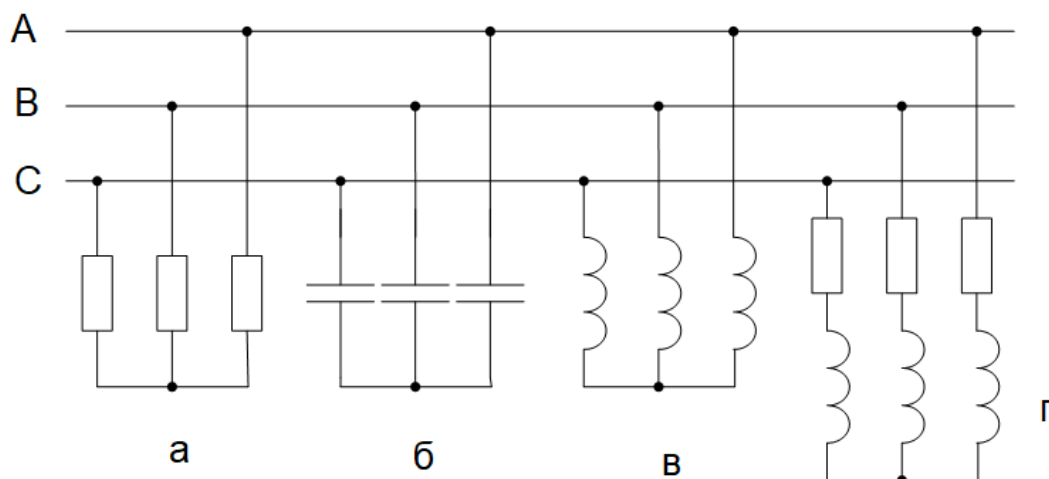


Рис. 3.1. Схема соединения сопротивлений в звезду для получения искусственного нуля

- а) Сопротивления – три одинаковых резистора
- б) Сопротивления – три одинаковых конденсатора
- в) Сопротивления – три одинаковых индуктивности
- г) Сопротивления – соединенные последовательно индуктивности и резисторы

Вопросы для самопроверки:

- 1) Что такое электропотребление? Как его посчитать?
- 2) Что такое $\cos \varphi$? Как его посчитать?
- 3) Как посчитать электропотребление трехфазной сети с симметричной и несимметричной нагрузкой?
- 4) Что такое искусственный ноль? Для чего он нужен?
- 5) Рассказать ход работы.
- 6) Задача. Дано: на трехфазном счетчике электроэнергии (схема на рис 3.2) написано 1000 об. для двух лампочек, одна из которых для активной мощности, а вторая для реактивной. Измеренный период мигания первой лампочки $T_p=2$ с, второй – $T_q=9$ с, фазный ток нагрузки $I=7,5$ А, нагрузка симметричная. Найти энергопотребление за 3 часа, сопротивление резистора и емкость конденсатора при частоте сети $f=50$ Гц, а также коэффициент мощности одной фазы.

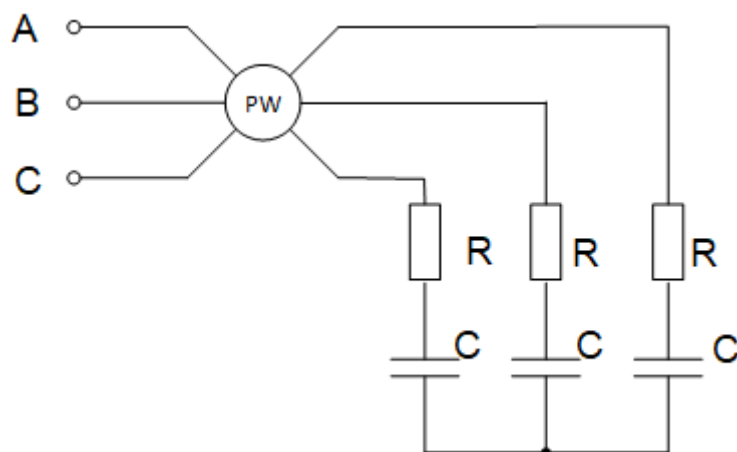


Рис. 3.2. Схема задачи

PW – трехфазный счетчик электроэнергии, R – активное сопротивление нагрузки,
C – емкость реактивного сопротивления нагрузки

Порядок выполнения лабораторной работы

Цель работы:

Исследовать электропотребление трехфазной сети с симметричной и нелинейной нагрузкой. На основании экспериментальных и расчетных величин построить временные зависимости электропотребления, мощности, $\text{Cos}(\varphi)$. Сделать выводы.

ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ НЕОБХОДИМО РАСПЕЧАТАТЬ И ПРИНЕСТИ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ БЛАНКИ ДЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ – [ПРИЛОЖЕНИЕ 3](#) И [ПРИЛОЖЕНИЕ 4](#) ДАННОГО ПОСОБИЯ.

5. Экспериментальное исследование симметричной нагрузки

5.1 Собрать схему экспериментальной установки

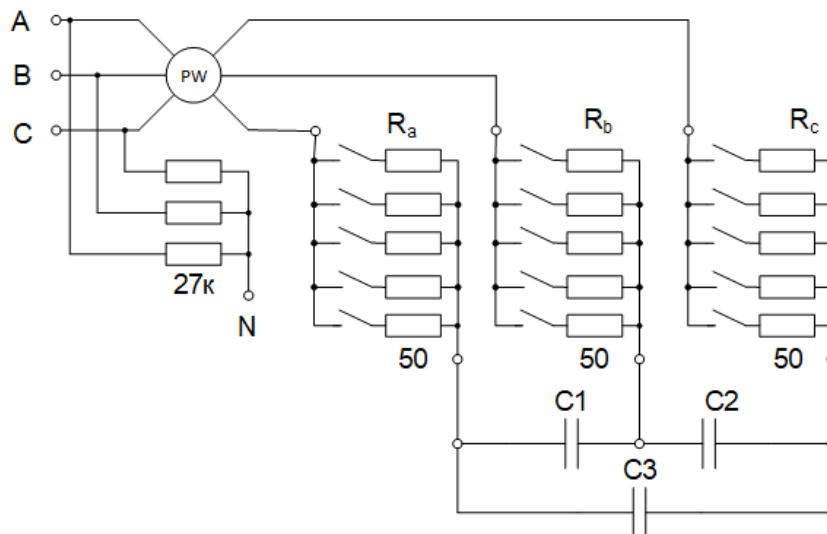


Рис. 3.3. Экспериментальная схема

PW – трехфазный электросчетчик; N – искусственная нулевая точка

Так как в процессе эксплуатации счетчика происходит изменение технических параметров и, в том числе, коэффициента K , который равен 9 кДж на 1 оборот диска, необходимо произвести калибровку счетчика с использованием тех измерительных приборов, которые применяются в ЛР. Для калибровки измеряется напряжение линии U , ток I при замкнутом конденсаторе и время одного оборота диска $T_{сч}$. Тогда скорректированный коэффициент (измерение провести при первой нагрузке), кДж:

$$K^* = \frac{U \cdot I \cdot T_{сч}}{1000} \quad (3.7)$$

$$K = \frac{1 \cdot 3600}{1000} = 3,6 \text{ кДж} \quad (3.8)$$

$$P = \frac{K}{T_p} \quad (3.9)$$

$$Q = \frac{K}{T_q} \quad (3.10)$$

$$S_1 = 3 \cdot U_a \cdot I_a \quad (3.11)$$

$$\Delta W = P \cdot \Delta t \quad (3.12)$$

Электрическая мощность счетчика определяется по формулам (3.8 – 3.11), электропотребление по формуле (3.12), в таблицу 3.1 заносятся расчетные параметры.

Таблица 3.1. Опытные и расчетные данные

Опытные данные							Расчетные данные			
	Время местн t	W, кВт·ч	U _a , В	U _c , В	I _a , А	T _{сч} , с	ЗР, кВт	S ₁ , кВА	Q, кВАр	ΔW, кВт·ч
0										
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Прим.

$$\Delta W_i = P_{i-1} \cdot \frac{t_i - t_{i-1}}{60} \quad (3.13)$$

Таблица 3.1.1

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t _i - t _{i-1} , МИН										
ΔW _i , кВт·ч										

Таблица 3.2. Расчетные данные

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cos(φ)										
P ₂ , кВт										
Z, Ом										
R, Ом										
X, Ом										

Примечание: Токи и напряжения измеряются токовыми клещами. Нейтраль – X₁.
 Определить Cos(φ) исходя из того, что Sin(φ) = U_c / U_a.

6. Экспериментальное исследование нелинейной нагрузки в 3-хфазной цепи

Как и в однофазной цепи, для определения K_3 применяется осциллограф АСК-2028, либо иной двухлучевой. Схема исследования (рис. 3.4) представляет 3х-фазный выпрямитель с активной нагрузкой R1, на резисторе R_{00} фиксируется ток нулевого провода. Изменение угла отсечки тока производится коммутатором S1.

Перед началом работы производится выравнивание сопротивлений частей реостата R1, затем, при большом угле отсечки (S1 выключен, конденсаторы отключены), движок потенциометра устанавливается в среднее положение таким образом, чтобы положительные и отрицательные импульсы тока были равны.

Осциллограмма тока фаз снимаются на резисторе $R_{01}...R_{03}$ (R_{00} – закорочен, переключатель S-O-R в положении S). В положении O-R фиксируется ток нулевого $I_0=U_0/10$ и фазного $I_L=U_L/20$ токов.

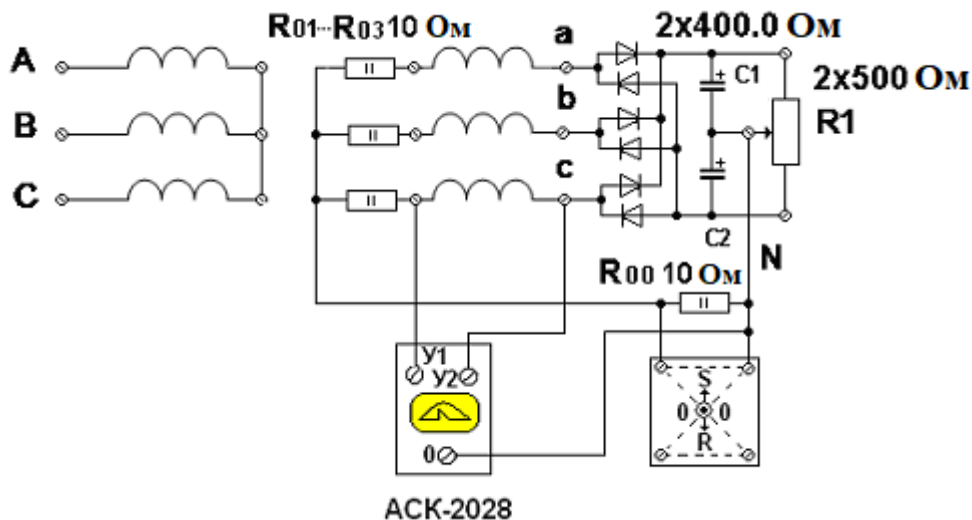


Рис. 3.4. Экспериментальная схема

R1 – реостат; R_{00} , $R_{01}...R_{03}$ – резисторы; S1 – коммутатор с положениями: S – прямое, R – перекрестное, 0 – выключенное; C0 – конденсатор

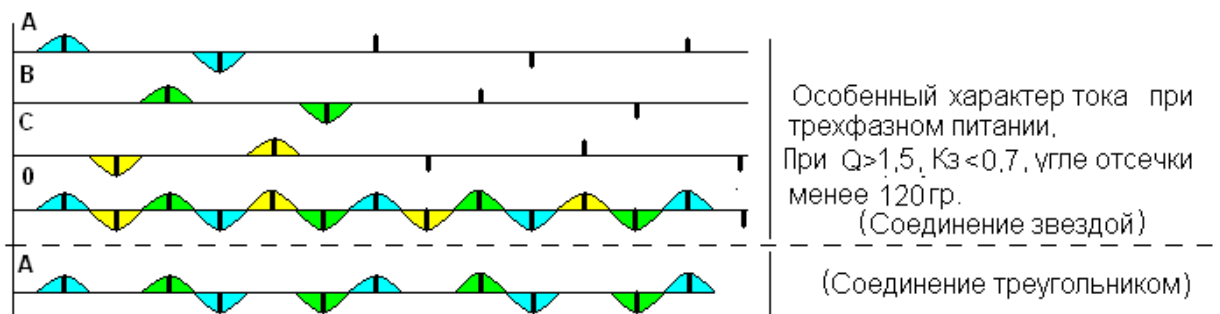


Рис. 3.5. Характер тока в фазах и нулевом проводе

Таблица 3.3. Экспериментальные данные

№ п/п	Опытные данные							Расчет			
	R ₀₀	C	I _C	I ₀₀	I _{MC}	U _R	K ₃	I _{IC}	P _H	КПН	КПД
1	0/10	-									
2	10	+									
3	0	+									

$$P_H = \frac{U_R^2}{R_1} \quad (3.14)$$

$$3P = 3 \cdot I_C \cdot U_C \quad (3.15)$$

$$I = 0,9 \cdot I_{TK} \quad (3.16)$$

Примечание: Для измерения №1:

$$\text{КПН} = 2 \cdot K_3 \cdot \left(A^2 + \frac{4}{\pi} \cdot A \cdot B + \frac{B^2}{2} \right) \quad (3.17)$$

Где:

$$A = \cos(90^\circ \cdot K_3) \quad (3.18)$$

$$B = 1 - A \quad (3.19)$$

Для измерения №2 и №3:

$$\text{КПН} = K_3 \cdot (1 + 0,27 \cdot \cos(90^\circ \cdot K_3))^2 \quad (3.20)$$

Список литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Учебник] – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2001. – 638 с.
2. Гесс М. Энергопотребление приборов [Статья]/ группа компаний «ТИОН» - Электронные текстовые данные. – Москва [2017]. – Режим доступа: <https://tion.ru/blog/klass-energopotrebleniya/> (Дата обращения 23.04.2021).
3. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов: Монография / В.И. Гнатюк. – 3-е изд., перераб. и доп. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во КИЦ «Техноценоз»], [2019]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ind.html>, свободный.
4. Частное предприятие «СПВР-БАЙ». Корректор коэффициента мощности [Статья] – Электронные текстовые данные. – Гомель. Режим доступа: <http://www.spwr.by/stati/korrektor-koeffitsienta-moschnosti.html> (Дата обращения 12.04.2021).

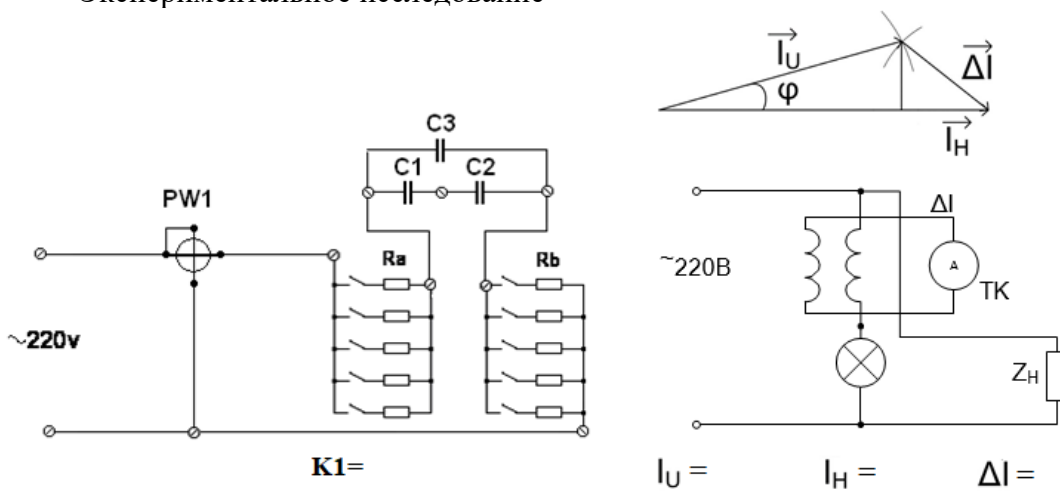


Таблица 1.1 – Данные экспериментального исследования

Опытные данные							Расчетные данные			
	Время местн t	W, кВт·ч	U _a , В	U _c , В	I _a , А	T _{сч} , с	P, кВт	S ₁ , ВА	Q, кВАр	W, кВт·ч
0										0
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

$$\Delta W_i = P_{i-1} \cdot \frac{t_i - t_{i-1}}{60}$$

Таблица 1.1.1

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t _i - t _{i-1} , мин										
ΔW _i , кВт·ч										

Таблица 1.2 – Характеристика нагрузки

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sin(φ)										
φ										
Cos(φ)										
P ₂ , кВт										
R, Ом										
X, Ом										
Z, Ом										

Примечание: Токи и напряжения измеряются токовыми клещами. Определить Cos(φ) исходя из того, что Sin(φ) = U_c / U_a.

1. Собрать схему исследования Рис.1.

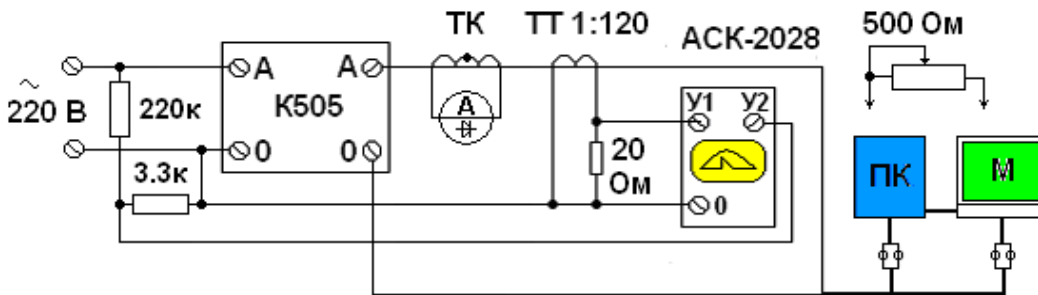


Рис.1 Схема экспериментальной установки

Опытные данные							Расчетные данные						
№	Ц352		K505		АСК-2028								
	I (A)	I ₀ (A)	U (B)	P (Bт)	I (A)	I _M (A)	K _з	I ₀ (A)	I ₁ (A)	I (A)	P (Bт)	КПН	cosφ нагр.
1													
2													

Примечание: Перед началом измерений осуществить калибровку ТК и крутизну преобразования S (A/мВ) ТТ относительно К505, при подключении вместо нелинейной нагрузки реостата 500 Ом. Выставив ток по прибору К505- 0,71А

$K = 0,71A / I_{TK}(A)$, т.к амплитуда тока К505 равна 1А, то $S = 1A / U_{max}$, где U_{max} амплитудное значение осциллограммы (мВ).

$K =$, $S =$. Учитывая что: $I_0 = 0,9 * I$ для ТК , $I_M = S * U_{max}(осц)$, $COS \phi = (КПН)^{0,5}$, Заполняем таблицу 1.

2. Произвести измерение электрических параметров и на основании измеренных данных заполнить таблицу 1.
3. По результатам работы сделать выводы.
4. Найти КПН при различных формах тока, реализуемых электронными корректорами мощности. Рис 2(см. Теорию)

Вопросы для самопроверки:

- 1) Записать закон Фурье для определения нулевой, а также N-й гармоники импульсного тока Cos и Sin составляющих.
- 2) Что такое скважность? Как ее посчитать?
- 3) Что такое КПН? Как его посчитать?
- 4) Токи каких гармоник идут на полезную работу, а какие создают потери в сети?
- 5) Как будет меняться КПН при изменении скважности Q?
- 6) Какие существуют способы повышения КПН для реальных устройств?
- 7) Рассказать принцип работы корректора мощности.

Таблица 3.1 – Опытные и расчетные данные

Опытные данные							Расчетные данные			
	Время местн t	W, кВт·ч	U _a , В	U _c , В	I _a , А	T _{сч} , с	ЗР, кВт	S ₁ , ВА	Q, кВАр	ΔW, кВт·ч
0										
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Прим.

$$\Delta W_i = P_{i-1} \cdot \frac{t_i - t_{i-1}}{60}$$

Таблица 3.1.1

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t _i – t _{i-1} , мин										
ΔW _i , кВт·ч										

Таблица 3.2 – Расчетные данные

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sin(φ)										
φ										
Cos(φ)										
P ₂ , кВт										
Z, Ом										
R, Ом										
X, Ом										

Примечание: Токи и напряжения измеряются токовыми клещами. Нейтраль – X₁.
 Определить Cos(φ) исходя из того, что Sin(φ) = U_c / U_a.

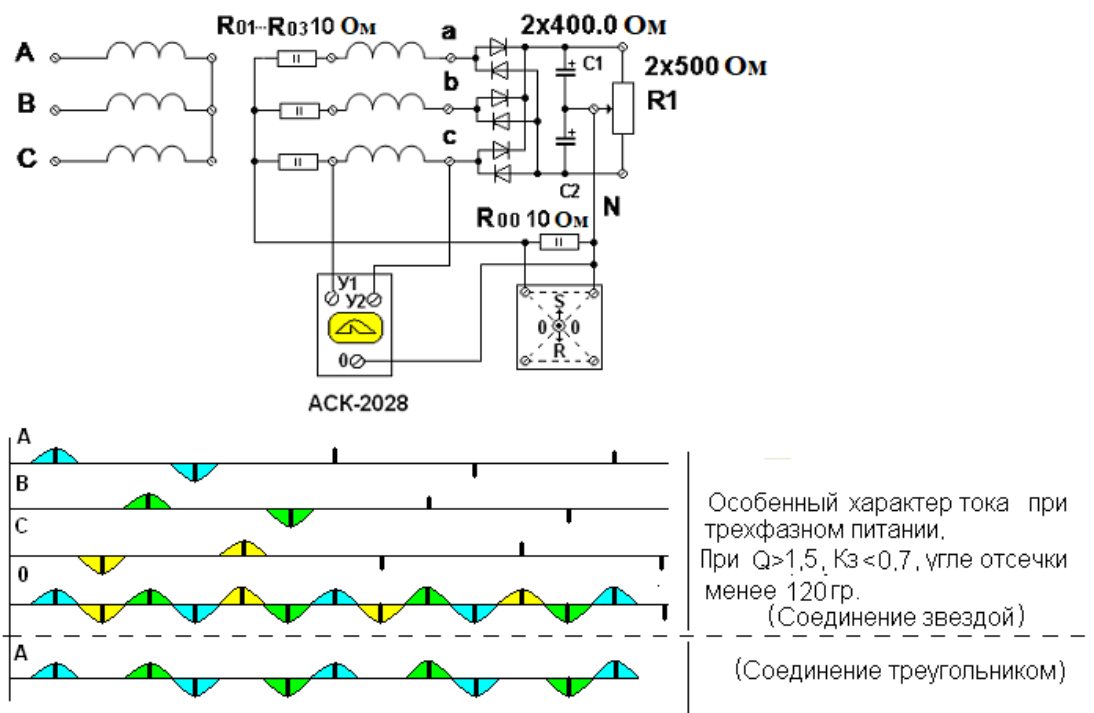


Рисунок – Нелинейная работа 3-хфазной сети

Перед началом работы производится выравнивание сопротивлений частей реостата R1, затем, при большом угле отсечки (S1 выключен, конденсаторы отключены), движок потенциометра устанавливается в среднее положение таким образом, чтобы положительные и отрицательные импульсы тока были равны.

Осциллограмма тока фаз снимаются на резисторе R01...R03 (R00 – замкнут, переключатель S-O-R в положении S). В положении O-R фиксируется ток нулевого $I_0 = U_0/10$ и фазного $I_L = U_L/20$ токов.

Таблица 3.3 – Экспериментальные данные $U_c =$

№ п/п	Опытные данные							Расчет			
	R ₀₀	C	I _C	I ₀₀	I _{MC}	U _R	K ₃	I _{1C}	P _н	КПН	КПД
1	0/10	-									
2	10	+									
3	0	+									

$$P_n = \frac{U_R^2}{R_1}, \quad 3P = 3 \cdot I_C \cdot U_C, \quad I = 0,9 \cdot I_{TK}$$

Для измерения №1: $KПН = 2 \cdot K_3 \cdot \left(A^2 + \frac{4}{\pi} \cdot A \cdot B + \frac{B^2}{2} \right), \quad K_3 =$

Для измерения №2 и №3: $KПН = K_3 \cdot (1 + 0,27 \cdot \cos(90^\circ \cdot K_3))^2$

$A = \cos(90^\circ \cdot K_3) \quad A =$

$B = 1 - A \quad B =$