

В. И. Чарыков, Ф. Р. Фахргалеев, В.И. Мошкин

СИММЕТРИЗАТОР ТОКА: теория, расчет, конструкция

МОНОГРАФИЯ



В.И. Чарыков, Ф.Р. Фахргалеев, В.И. Мошкин

**СИММЕТРИЗАТОР ТОКА:
ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ,
КОНСТРУКЦИЯ**



Монография

Курган
2018

УДК 621.316

ББК 31.264.8

Ч - 23

Рецензенты:

М.А. Малышев, кандидат технических наук, директор филиала ПАО СУЭНКО «Курганские электрические сети»;

А.В. Фоминых, профессор кафедры «Эксплуатация и ремонт машин» ФГБОУ ВО «Курганская государственная сельскохозяйственная академия имени Т.С. Мальцева», доктор технических наук, профессор.

Чарыков В. И., Фахргалеев Ф. Р., Мошкин В. И.

Симметризатор тока: теория, расчет, конструкция : монография. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2018. – 128 с.

Монография «Симметризатор тока: теория, расчет, конструкция» охватывает широкий круг вопросов, связанных с разработкой устройств, предназначенных для симметрирования токов и напряжений в трехфазных четырехпроводных сетях напряжением 0,38 кВ. В работе рассмотрены вопросы возникновения несимметрии в трехфазных четырехпроводных сетях, дана разработка математического аппарата и построение на его основе программного кода, который позволяет на автоматическом уровне проводить вычисление параметров работы электросети, а также разработана принципиальная электрическая схема устройства симметрирования фазных токов.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, аспирантов и магистрантов, специализирующихся в области повышения эффективности электроснабжения сельских потребителей.

УДК 621.316

ББК 31.264.8

ISBN 978-5-4217-0451-5

© «Курганский государственный университет, 2018

© Чарыков В.И., Фахргалеев Ф.Р., Мошкин В.И., 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Определения, обозначения и сокращения	5
ВВЕДЕНИЕ	6
РАЗДЕЛ 1	
МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ	8
1.1. Особенности несимметричных режимов работы электросетей.....	9
1.2. Потери и погрешности работы электросети, связанные с несимметрией токов.....	10
1.3. Методики снижения несимметрии токов и напряжений электрической сети.....	17
1.4. Выводы к разделу 1	25
РАЗДЕЛ 2	
МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ	27
2.1. Расчет показателей несимметрии для токов и напряжений электрической сети.....	27
2.2. Алгоритм расчета показателей работы электрической сети.....	29
2.3. Выводы к разделу 2	39
РАЗДЕЛ 3	
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ	40
3.1. Анализ функциональных параметров распределительных электросетей.....	40
3.2. Расчет параметров распределительных электросетей	43
3.3. Выводы к разделу 3	84
РАЗДЕЛ 4	
ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ	85
4.1. Изменение схемы обмоток распределительного трансформатора	85

4.2. Метод перераспределения нагрузок по фазам	90
4.3. Методики компенсации токов обратной последовательности	92
4.4. Методики автоматического управления симметрирующими устройствами	95
4.5. Разработка автоматизированной системы симметрирования фазных токов	100
4.6. Методы расчета параметров симметрирующих устройств	105
4.7. Выводы к разделу 4	114
РАЗДЕЛ 5	
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ	115
5.1. Определение суммарной мощности реактивных элементов электросети	115
5.2. Вычисление срока окупаемости симметрирующих устройств	117
5.3. Выводы к разделу 5	120
ЛИТЕРАТУРА	121

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АД	асинхронный двигатель
ИУ	индуктивное устройство
КБ	конденсаторная батарея
КЗ	короткое замыкание
КПД	коэффициент полезного действия
КЭ	качество электрической энергии
ЛЭП	линия электропередачи
МДС	магнитодвижущая сила
РТ	распределительный трансформатор
СУ	симметрирующее устройство
ТП	трансформаторная подстанция
ТС	техническое средство
ФСУ	фильтро-симметрирующее устройство
ШСУ	шунто-симметрирующее устройство
ЭА	электромагнитный аппарат

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие сёл и поселков городского типа характеризуется ростом коммунально-бытовых нагрузок, увеличением мощности нагрузок оборудования ферм и градообразующих предприятий. Это приводит к ухудшению качества электроэнергии в системах электроснабжения и снижению эффективности работы, а также сокращению срока службы систем электроснабжения и электроприёмников [1-9, 54-59].

Основной причиной ухудшения качества электроэнергии является фактор несимметрии токов и напряжений в электросети, возникающий вследствие неэффективного распределения большого количества потребителей. Увеличение несимметрии токов и напряжений в электросети ведет к увеличению потерь при передаче электроэнергии и сокращению срока службы электрооборудования.

Большая часть потерь энергии в сельских электросетях приходится на линии и трансформаторы, что обычно и учитывается в практических расчетах, включая расчеты, проведенные в рамках данного исследования. По материалам статистических исследований можно утверждать, что потери электроэнергии в сетях сельскохозяйственного назначения напряжением 0,38 кВ составляют 30-35%, а их суммарный объем с учетом потерь электроэнергии в трансформаторных подстанциях лежит в пределах 50-55% от общего количества потерь [1].

Активный рост сельскохозяйственного производства и увеличение коммунально-бытовой нагрузки связано с бурным развитием электротехнологий и автоматизации производственных процессов, включая повышение уровня использования электрооборудования, большая часть которого приходится на однофазные электроприёмники. К потребителям, ответственным за неравномерное распределение электроэнергии в сельской сети относят большей частью электротехнологические установки, которые зачастую характеризуются несимметричным исполнением, а также особенности самого технологического процесса работы данных установок приводят к несимметрии режима питающей их электросети.

Подключение к сельской электросети приемников, которые вызывают существенный перекося фаз, крайне отрицательно сказывается на работе генераторов, линий электропередачи и трансформаторов, это уменьшает мощность выпрямителей, а также снижает эффективность использования регу-

лирующих и компенсирующих устройств, нарушает режим работы и уменьшает срок службы асинхронных электродвигателей [10-13]. При работе трехфазной системы в несимметричном режиме снижается пропускная способность элементов электросети, происходит разрушительный нагрев электромашин, а также увеличиваются потери активной мощности и энергии в системах электроснабжения. Таким образом, исследование возникновения и компенсации несимметрии, а также разработка эффективных методов ее снижения является важной задачей электроэнергетики.

Значительное число работ посвящено несимметричным режимам работы электросетей, но можно утверждать, что в отношении сельских электросетей вопросы повышения качества электроэнергии и снижения потерь за счет внедрения симметрирующих устройств не были рассмотрены в достаточной мере. Целью данной работы является разработка математического алгоритма, который позволит на автоматическом уровне выработать оптимальные методики и разработать конструкции технических средств снижения несимметрии токов и напряжений в сельских электросетях. Данная цель предполагает выполнение следующих задач:

- анализ характерных для условий сельской местности закономерностей, которые вызывают эффект несимметрии токов и напряжений в электросети;
- разработка математического аппарата и построение на его основе программного кода, который позволяет на автоматическом уровне проводить вычисление параметров работы электросети;
- получение статистических данных измерения электронагрузки ЛЭП, обеспечивающих сельскохозяйственные объекты;
- предварительный анализ полученных данных с целью исключить возможную погрешность перед проведением расчетов;
- расчет параметров несимметрии фазных токов, определение значений коэффициентов обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений, а также коэффициента увеличения потерь мощности;
- разработка схемы автоматизированной системы симметрирования фазных токов, которая позволяет увеличить оперативность работы устройств для симметрирования фазных токов;
- определение экономической эффективности применения разработанного симметрирующего устройства.

РАЗДЕЛ 1

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ

Развитие промышленности и распространение бытовой электроники приводит к постоянному увеличению мощностей электропотребления, что является актуальным как для крупных городов, так и для сел, а также поселков городского типа, что за последние годы по требованиям к надёжности их электроснабжения приблизились к промышленным потребителям [1-9, 15-18]. Сельскохозяйственные потребители на сегодняшний день имеют на своем балансе значительное количество линий электропередачи, трансформаторных подстанций, электродвигателей и других производственных электроустановок (рис. 1.1).

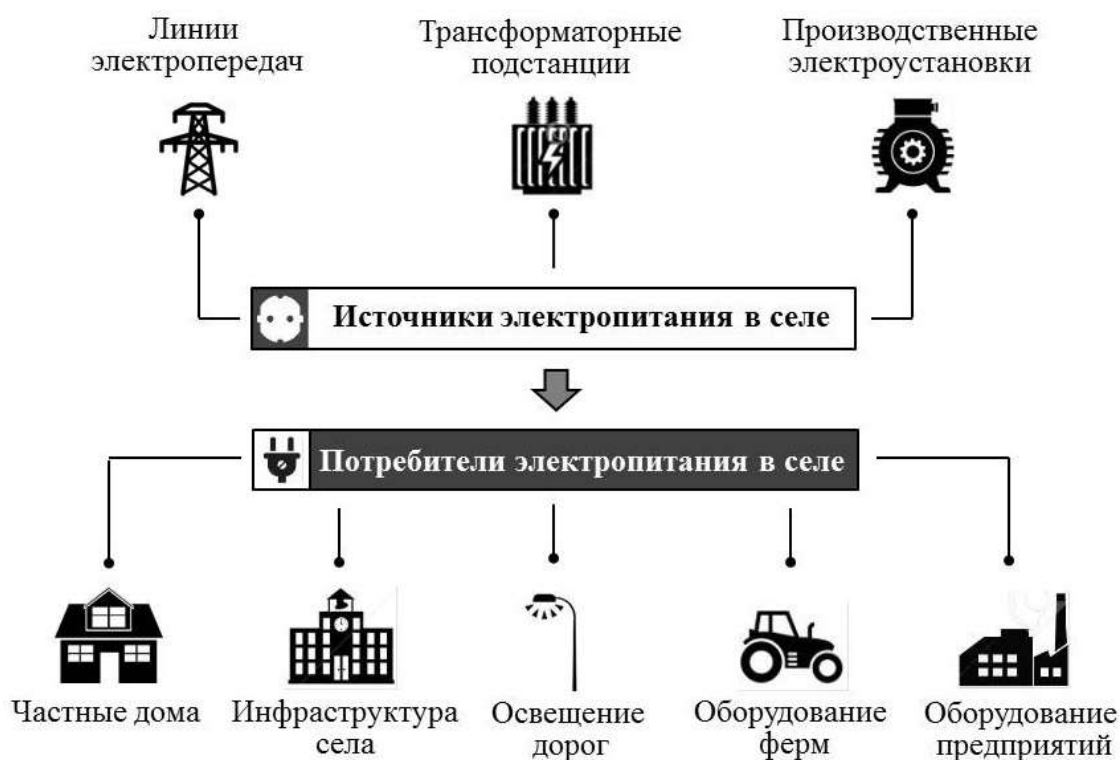


Рисунок 1.1 – Диаграмма электроснабжения в условиях села

Особенностью электроснабжения в сельской местности является возникновение несимметричных режимов работы электрической системы, которые зачастую связаны с неравномерностью распределения нагрузок по фазам, а также применение в сельскохозяйственном секторе высоко-мощных однофазных электроприемников [14-20]. Несимметричный режим обусловлен различными условиями работы фаз. Степень несимметрии системы характеризуются следующие параметры:

- коэффициент напряжения обратной последовательности;
- коэффициент напряжения нулевой последовательности;
- коэффициент тока обратной последовательности;
- коэффициент тока нулевой последовательности;
- коэффициент потери мощности.

Величина данных коэффициентов характеризует воздействие несимметрии сети на работу электроустановки.

1.1 Особенности несимметричных режимов работы электросетей

Несимметричный режим работы электросети относится к эксплуатационному режиму, который следует отличать от режима аварийного, связанного с короткими замыканиями, обрывами проводов и т.д. В зависимости от причины несимметрии напряжений и токов электросети, несимметрию можно подразделить на продольную и поперечную (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Виды несимметричных режимов работы электросетей

Вид несимметрии	Причины	Дополнительные примеры
Продольная	несимметрия элементов электросети	неполнофазные режимы воздушных линий
		несимметрия параметров фаз элементов электросети
Поперечная	подключением однофазных несимметричных нагрузок	разница в номиналах активных и реактивных сопротивлений фаз приемников электроэнергии
	подключением многофазных несимметричных нагрузок	

При проектировании системы электроснабжения сельскохозяйственных объектов зачастую не учитывается общая нагрузка и мощность отдельных потребителей электроэнергии для реализации равномерного распределения по фазам сети, кроме того, вследствие развития коммунально-бытового сектора, к линии дополнительно подключается большое количество новых электроприемников. Статистический анализ публикаций в

профильных изданиях показывает, что в сельскохозяйственном секторе России грубые нарушения правил симметричного подключения однофазных потребителей происходят более чем 90% случаев [4-8, 10-18]. При этом перераспределение нагрузок может значительно улучшить основные показатели качества работы электросети, уменьшить потери электрической энергии и стабилизировать напряжение.

Помимо неслучайной несимметрии токов и напряжений в электросетях нередко возникает вероятностная несимметрия [1, 19-29], которая приводит к случайным отключениям и подключениям потребителей электроэнергии, что является недопустимым для нормального режима работы. При вероятностной несимметрии нагрузки фаз изменяются независимо друг от друга. Таким образом, трехфазное регулирование напряжения, которое активно используется в сельских электросетях, не может обеспечить нормированное напряжение токоприемников без применения дополнительных мер по симметрированию фазных токов, так как данная схема предполагает равное воздействие на все три фазы.

1.2 Потери и погрешности работы электросети, связанные с несимметрией токов

Поскольку для электроснабжения сельскохозяйственных объектов наиболее активно используются асинхронные электродвигатели, дальнейшее рассмотрение эффектов, связанных с несимметрией токов будет соотнесено именно с ними. В асинхронных электродвигателях, как и в других электродвигателях, несимметрия токов и напряжений приводит к потерям мощности, что приводит к дополнительному нагреву. Но, кроме того, в данном случае возникает противодействующий вращающий момент, который уменьшает полезный момент электродвигателя [30] и может быть рассчитан следующим образом:

$$\begin{cases} m = \frac{s}{2-s} \cdot \frac{Z_1^2}{Z_2^2} \cdot k_U^2 \\ k_U = \frac{U_2}{U_1} \end{cases}, \quad (1.1)$$

где s — скольжение асинхронного двигателя, т.е. относительная разность скоростей вращения ротора и изменения переменного магнитного потока статора двигателя ($s = (n_1 - n)/n$), n — скорость вращения ротора,

n_1 — синхронная скорость двигателя), Z_1 — сопротивление прямой последовательности, Z_2 — сопротивления обратной последовательности, U_1, U_2 — напряжения, k_U — коэффициент несимметрии напряжений.

Характерно, что как для номинального режима работы индукционного электродвигателя ($Z_2 \approx 0,16 \cdot Z_1, s = 0,05$), так и для пускового режима ($Z_2 = Z_1, s = 1$) уменьшение вращающего момента равно квадрату нагрузки (рис. 1.2):

$$\begin{cases} m_{\text{н}} = \frac{0,05}{2-0,05} \cdot \left(\frac{1}{0,16}\right)^2 \cdot k_U^2 \approx k_U^2 \\ m_{\text{п}} = \frac{1}{2-1} \cdot \left(\frac{1}{1}\right)^2 \cdot k_U^2 = k_U^2 \end{cases} \quad (1.2)$$

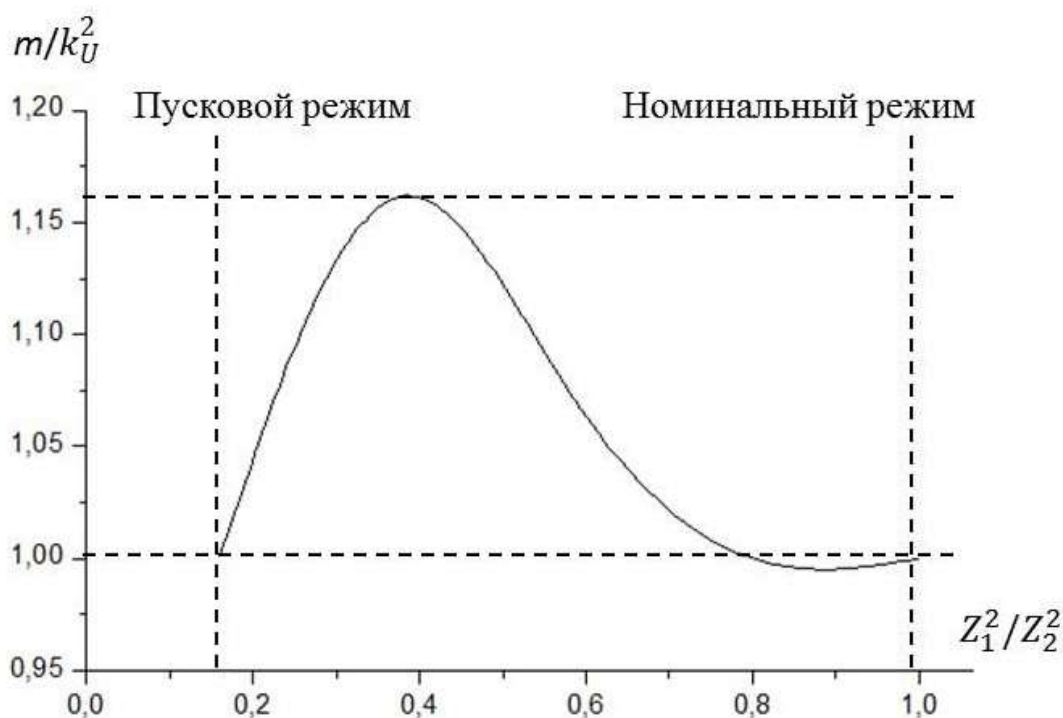
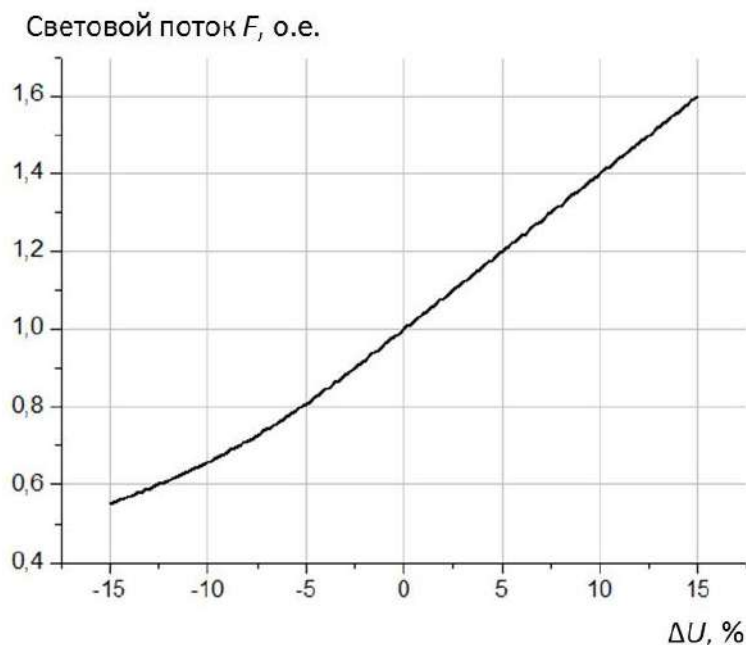


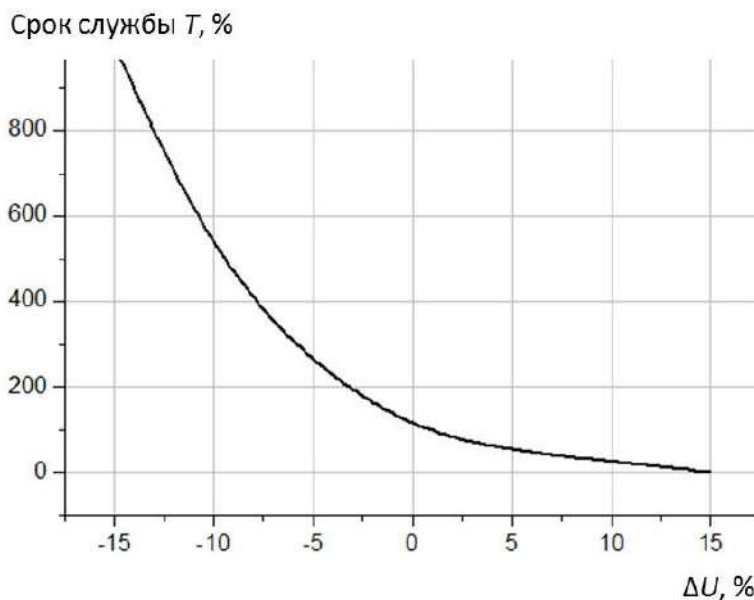
Рисунок 1.2 – Соотношение вращающего момента и квадрату нагрузки в зависимости от соотношения прямой и обратной последовательности для пускового и номинального режимов работы электродвигателя

В асинхронных электродвигателях даже при небольшом напряжении обратной последовательности, возникает ток значительной величины, что связано с тем, что сопротивление обратной последовательности в 5-7 раз меньше сопротивления прямой последовательности. Ток обратной последовательности приводит к дополнительному нагреву ротора и статора электродвигателя, значительно уменьшает мощность электродвигателя и срок его службы [30, 31]. Поэтому по статистике более 20% асинхронных

двигателей выходят из строя по причине несимметрии токов. Допустимым уровнем несимметрии по силе тока и напряжения считается несимметрия в 2%. Для поддержания срока службы машины при несимметрии больше 2% рекомендуется снизить мощность на валу двигателя либо увеличить его номинальную мощность.



(а)



(б)

Рисунок 1.3 – Зависимость светового потока (а) и срока службы (б) лампы накаливания от отклонения напряжения от номинального значения

Влияние несимметрии напряжений на потребителей электроэнергии можно показать на примере использования ламп накаливания (рис. 1.3).

Относительно небольшие отклонения напряжения от номинального значения U_H могут быть описаны при помощи следующей системы уравнений [14]:

$$\begin{cases} \frac{F}{F_H} \approx \left(\frac{U}{U_H}\right)^{3,6} \\ \frac{P}{P_H} \approx \left(\frac{U}{U_H}\right)^{1,6} \\ \frac{\eta}{\eta_H} \approx \left(\frac{U}{U_H}\right)^2 \\ \frac{T}{T_H} \approx \left(\frac{U}{U_H}\right)^{-14} \end{cases}, \quad (1.3)$$

где F и F_H — реальное и номинальное значения светового потока, P и P_H — реальное и номинальное значения мощности, η и η_H — реальное и номинальное значения светоотдачи, T и T_H — реальное и номинальное значения срока службы лампы. Как видно даже в таких пределах, характеристики режима работы электроприбора изменяются в значительной мере, а срок его службы может быть существенно сокращен. Следует отметить, что помимо ламп накаливания на сельскохозяйственных объектах нередко используются люминесцентные лампы, срок службы которых сокращается на 20-30% при повышении напряжения на 10% и газоразрядные лампы, работа которых при снижении напряжения на 20% и более вообще невозможна. Несимметрия в системе электросети также отрицательно влияет на работу релейной защиты, снижает устойчивость систем автоматики, выводит из строя электроприборы и ведет к существенным ошибкам при учете электроэнергии.

Кроме того следует отметить, что несимметрия токов в линиях электропередачи, распределительных сетях и трансформаторах существенно уменьшает пропускную способность системы. При несимметричном расположении нагрузки одна из фаз работает с перегрузкой в ΔI , а другие недогружены. Увеличение потерь энергии можно описать формулой:

$$\Delta W = I^2 r + (I + \Delta I)^2 r + (I - \Delta I)^2 r = 3I^2 r + 2\Delta I^2 r, \quad (1.4)$$

где r — активное сопротивление фазы линии. На рис. 1.4 показан рост потерь, которые связаны с несимметрией токов $\Delta W_H = 2\Delta I^2 r / (3I^2 r + 2\Delta I^2 r) \cdot 100\%$.

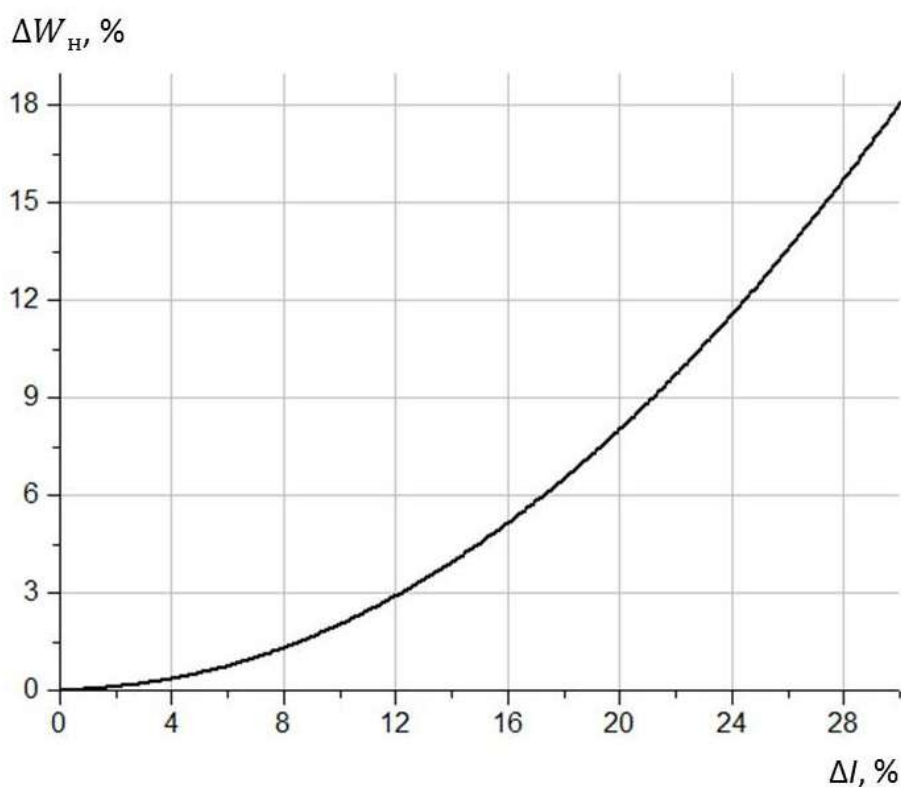


Рисунок 1.4 – Рост потерь энергии в линии электропередачи, которые связаны с несимметрией токов

Характерным признаком несимметрии нагрузки является повышенный шум у трансформаторов. Магнитные потоки, которые создаются токами нулевой последовательности, замыкаются через ферромагнитные части трансформатора, разогревают их, вследствие чего ухудшается режим охлаждения активной части и трансформатор при загрузке ниже номинальной может оказаться перегруженным, вплоть до выхода его из строя. Для снижения потерь напряжения и энергии в электросети приходится повышать номинальную мощность трансформатора.

Потери мощности в сети, связанные с несимметрией токов, выражаются через коэффициент увеличения потерь мощности:

$$K_P = \frac{\Delta P_n}{\Delta P_c}, \quad (1.5)$$

где ΔP_n — потери мощности в электросети при несимметричном режиме, а ΔP_c — потери мощности в электросети, обусловленные протеканием токов прямой последовательности. Коэффициент увеличения потерь

мощности также можно выразить через коэффициент несимметрии токов нулевой и обратной последовательности (K_{0I} и K_{2I} , соответственно), сопротивление нулевой последовательности R_0 и сопротивление обратной последовательности R_1 :

$$\begin{cases} K_P = 1 + \frac{R_0}{R_1} K_{0I}^2 + K_{2I}^2 \\ K_{0I} = \frac{I_{01}}{I_{11}} \cdot 100\% \\ K_{2I} = \frac{I_{21}}{I_{11}} \cdot 100\% \end{cases}, \quad (1.6)$$

где I_{01} — ток нулевой последовательности, I_{11} — ток прямой последовательности, I_{21} — ток обратной последовательности. В случае трехфазной четырехпроводной линии, который будет рассмотрен далее, систему уравнений (1.6) можно упростить до следующего вида:

$$K_P = 1 + K_{01}^2 \left(1 + \frac{3R_N}{R_\Phi}\right) + K_{21}^2, \quad (1.7)$$

где R_N — активное сопротивление нулевого провода линии, а R_Φ — активное сопротивление фазного провода линии.

Таким образом, уменьшить потери энергии и мощности, вызванные несимметрией токов можно уменьшая величину тока, протекающего по электролинии, либо уменьшая сопротивление линии.

Важно указать, что еще большую несимметрию может вызвать подключение к электрической сети с нарушенной симметрией трехфазной конденсаторной батареи. Кроме этого, при этом изменяется общая реактивная мощность конденсаторных батарей и потери распределяется неравномерно. Нормальная эксплуатация возможна лишь при том условии, что мощность потерь в каждой фазе не превышает номинальной величины. Располагаемая мощность установки уменьшается прямо пропорционально номинальной мощности [29, 30] и определяется соотношением:

$$Q_{\text{расп}} = Q_n (1 + k_U^2) \cdot \left(\frac{U'}{U_{\text{max}}}\right)^2, \quad (1.8)$$

где U_{max} — напряжение самой загруженной фазы установки, а U' — рабочее напряжение конденсаторной батареи.

Располагаемая мощность такой системы может быть определена как верхний предел реактивной мощности трехфазной конденсаторной установки, которая может быть использована при несимметричном напряжении без снижения срока службы конденсаторов.

Характерно, что коэффициенты несимметрии напряжения рассчитываются аналогично коэффициентам несимметрии токов. Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности характеризует трехфазную систему напряжений основной частоты по отклонению от симметрии междуфазных напряжений. При этом учитывается неравенство действующих значений напряжений в фазах сети и относительный угловой сдвиг фазы между ними. Значения коэффициентов несимметрии напряжения могут быть определены следующим образом:

$$\begin{cases} K_{0U} = \frac{U_{01}}{U_{11}} \cdot 100\% \\ K_{2U} = \frac{U_{21}}{U_{11}} \cdot 100\% \end{cases} \quad (1.9)$$

где U_{01} — напряжение нулевой последовательности, U_{11} — напряжение прямой последовательности, а U_{21} — напряжение обратной последовательности.

Кроме того несимметрия напряжений нарушает режим работы многофазных выпрямителей. При симметричном напряжении токи одинаковы во всех выпрямителях, а при несимметричном напряжении они могут значительно отличаться. Таким образом, часть выпрямителей оказывается недогруженной и допустимая мощность выпрямителя снижается. С другой стороны, при несимметрии напряжений появляются пульсации двойной частоты выпрямленного тока с амплитудой, значение которой пропорционально коэффициенту несимметрии напряжений. Такие пульсации входят в резонанс, перегружают конденсаторы и, случается, что выводят их из строя, а также они отрицательно влияют на работу связи даже в случае применения сглаживающих фильтров.

1.3 Методики снижения несимметрии токов и напряжений электрической сети

Методики снижения несимметрии токов и напряжений в электросети своей целью ставят уменьшение коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям до допустимых пределов [1-9, 19-29, 34] и могут быть разделены на четыре группы (рис. 1.5):

- уменьшение сопротивления нулевой последовательности;
- уменьшение коэффициента нулевой последовательности токов;
- уменьшение коэффициент обратной последовательности токов;
- комбинированная методика по уменьшению токов прямой и обратной последовательностей.

Уменьшение несимметрии токов за счет выравнивания нагрузок фаз может быть достигнуто при переводе электросети в режим полузакнутой или замкнутой сети [32]. Таким образом, в рамках данной методики замыкается сеть, которая питается от одного (что более эффективно для снижения несимметрии), либо нескольких распределительных трансформаторов. При таком подходе, чем больше замыкаемых линий сети низшего напряжения, тем больший эффект выравнивания. Поскольку амплитуды и фазы составляющих токов и напряжений являются случайными величинами, то можно рассчитать, что математическое ожидание напряжения обратной последовательности составляет 33% от максимального в замкнутых линиях. При замыкании электросети уменьшаются потери путем разгрузки нулевого и фазных проводов, а также повышается качество напряжения. Тем не менее, с увеличением числа замыкаемых магистралей экономическая эффективность этого метода существенно уменьшается, поскольку в замкнутой сети с несколькими распределительными трансформаторами будут протекать уравнительные токи, создающие дополнительные потери мощности и электрической энергии.

Для уменьшения перекаса фазных напряжений имеет смысл использовать технологию, которая не выравнивает напряжение на каждой из фаз по отдельности, а симметрирует фазы между собой в рамках всей трехфазной системы [34, 35]. Такое устройство не только само потребляет меньше электроэнергии, но и существенно снижает электропотребление из сети для электроприемников.



МЕТОДИКИ СНИЖЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ ТОКОВ ЭЛЕКТРОСЕТИ

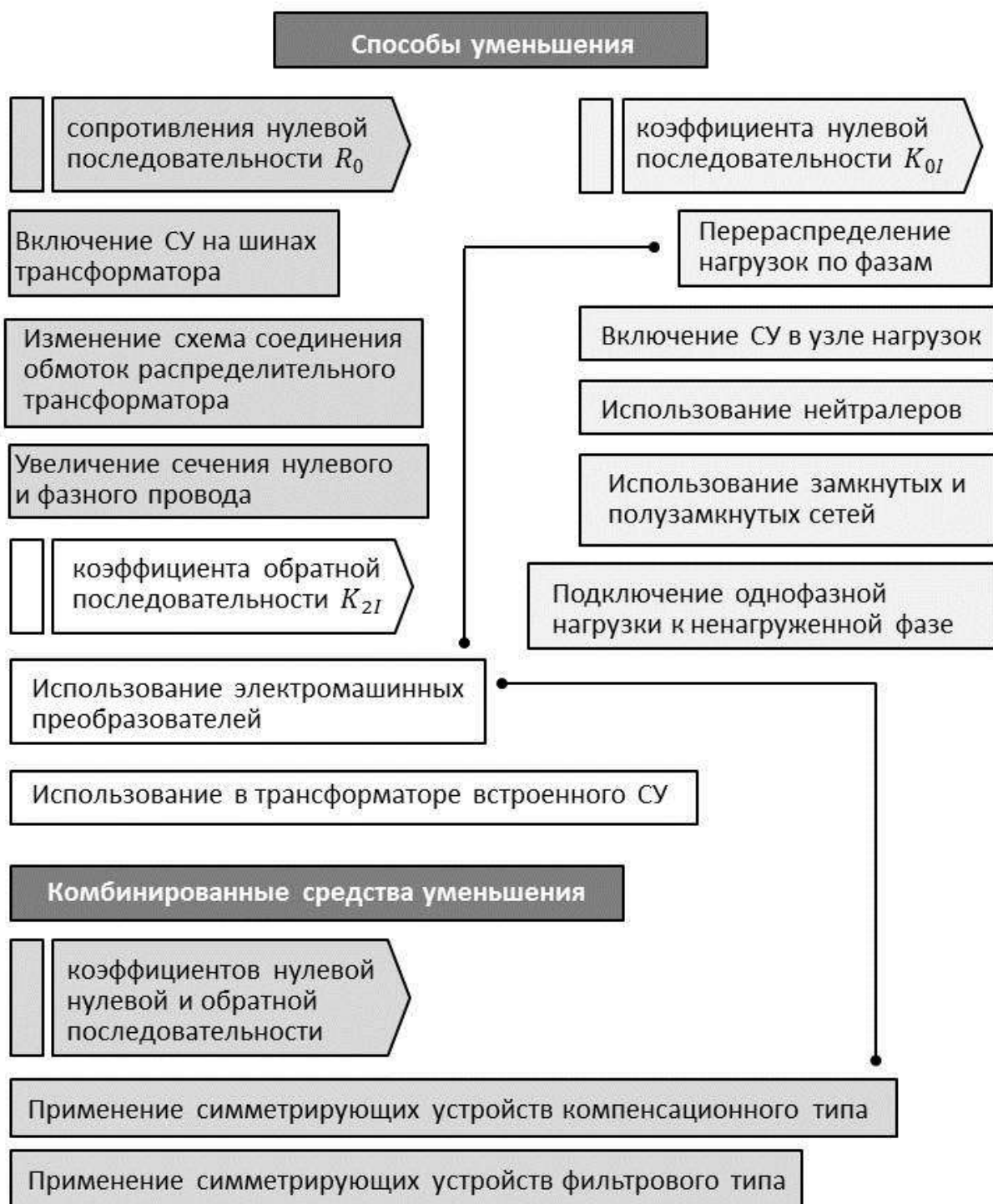


Рисунок 1.5 – Методики снижения несимметрии токов в электросети

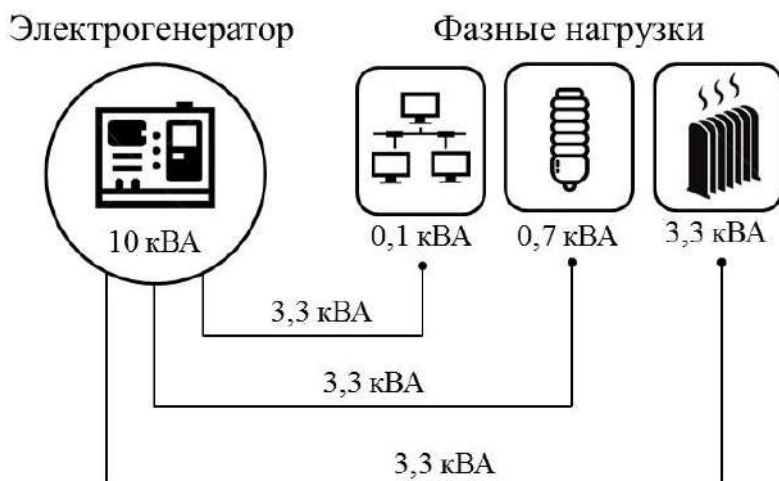


Рисунок 1.6 – Схема подключение электроприемников напрямую к электросети: максимальная нагрузка на одну фазу составляет треть суммарной мощности электрогенератора

Таким образом, если прямое подключение мощного однофазного электроприемника вызывает перекося фаз (рис. 1.6) и повышает риск его повреждения, а в случае, когда мощность такого фазного потребителя превышает треть трехфазной мощности — сбой в работе и отключение оборудования, то использование рассмотренной технологии позволяет выравнивать нагрузку (рис. 1.7-1.8).

К ключевым преимуществам данной технологии относятся экономичность, надежность и безопасность, а также:

- снижение уровня энергопотребления из сети;
- снижение расходов на электроэнергию для питания приемников и обеспечения необходимой величины фазных напряжений;
- использование генераторов меньшей мощности для той же группы электроприемников;
- снижение расходов на ремонт и сервисное обслуживание электроприемников, поврежденных вследствие перекося фаз;
- обеспечение возможности подключать фазных потребителей мощностью до 50% трехфазной мощности;
- обеспечение устойчивой работы электроприемников;
- надежность устройства для симметрирования фазных нагрузок и устранения перекося фазных напряжений в связи с отсутствием подвижных частей;

- защита генератора от механических повреждений и приводного двигателя вследствие перекаса фаз;
- защита от электротравматизма и возгорания, вызванных износом изоляции вследствие перекаса фаз.

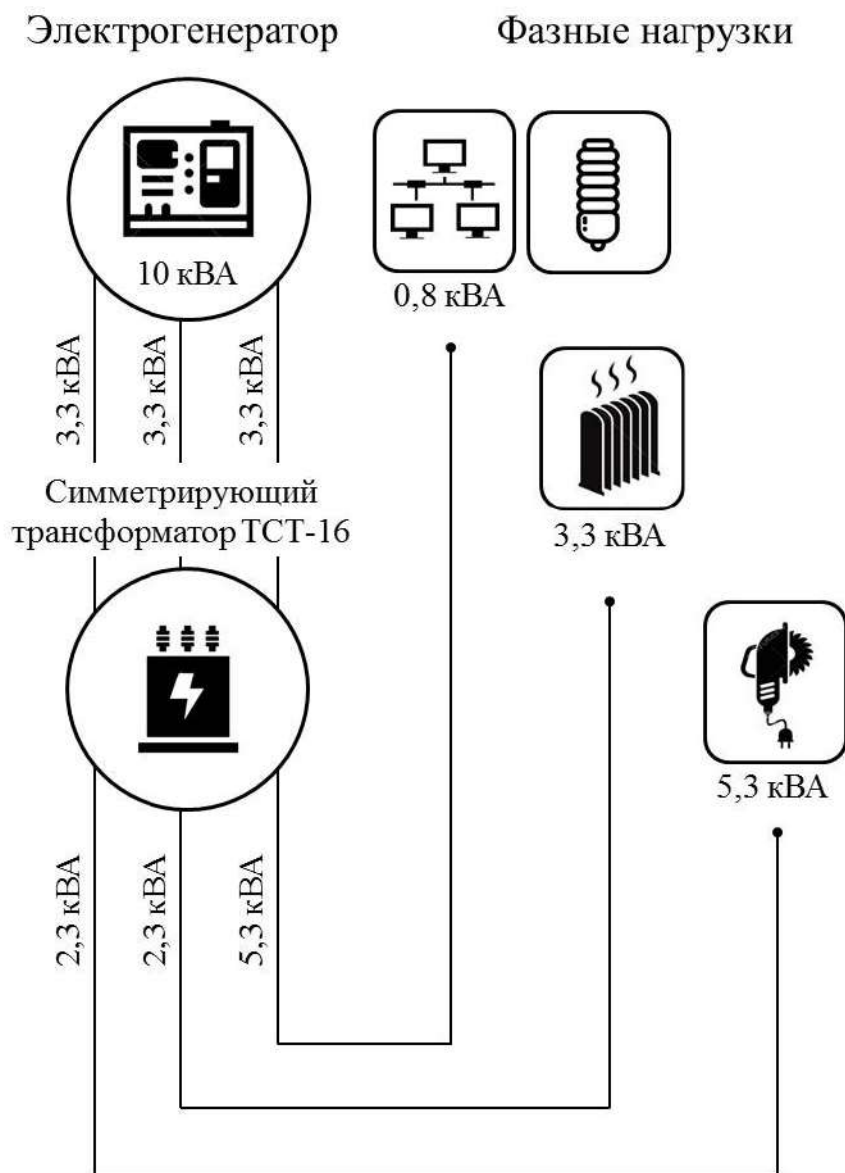


Рисунок 1.7 – Схема подключение электроприемников большой нагрузки к электрогенератору через симметрирующий трансформатор с использованием технологии симметрирования фаз между собой в рамках трехфазной системы

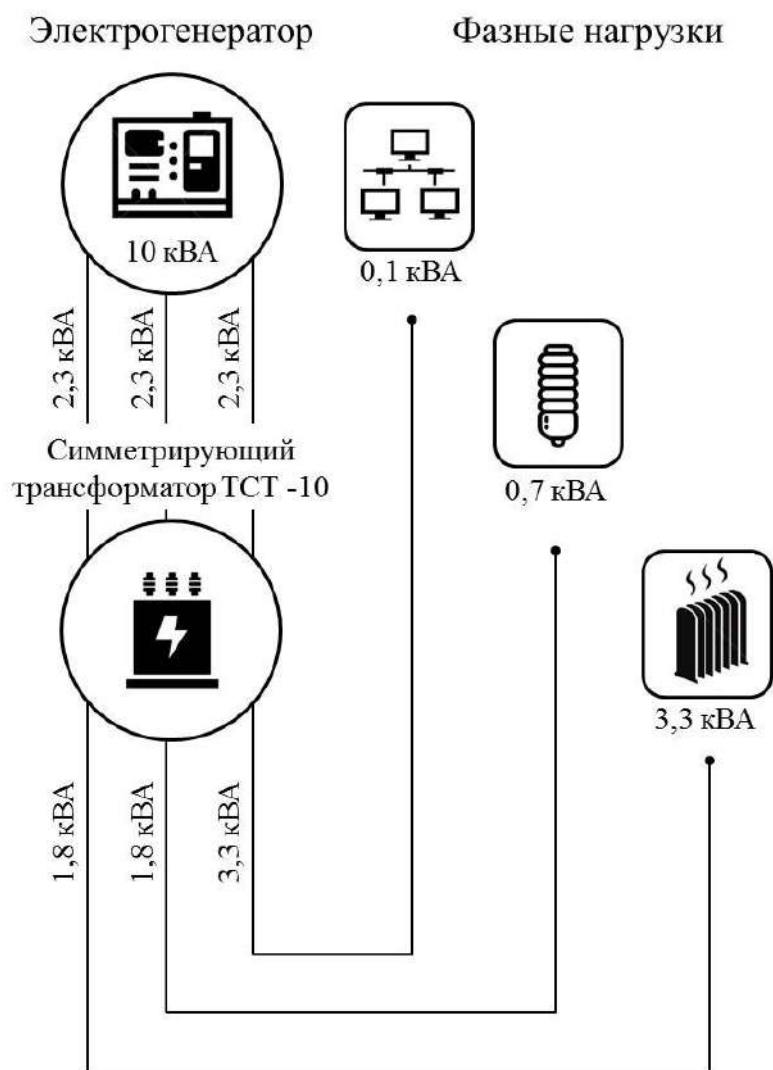


Рисунок 1.8 – Схема подключение электроприемников нагрузки к электрогенератору малой мощности через симметрирующий трансформатор с использованием технологии симметрирования фаз между собой в рамках трехфазной системы

Увеличение сечения фазного и нулевого проводов приводит к увеличению в ней токов нулевой и обратной последовательностей, что, в свою очередь, приводит к увеличению коэффициентов K_{0I} и K_{0I} , см. (1.6). Переход на следующий номинал сечения провода требует дополнительных затрат, которые составляют 5-10% от стоимости электросети. В работах [18, 19] было предложено использовать фонарный провод, как способ увеличения сечения нулевого провода. Был рассмотрен вариант, при котором фонарный провод в дневное время подключается параллельно нулевому, и после автоматически отключается. Это является ключевым недостатком

данного подхода, поскольку, как, показывают исследования, проводимые в электросетях, значительная несимметрия нагрузок проявляется именно в вечерние часы.

Метод изменения схемы соединения обмоток трансформатора [14-18] реализуется заменой в сельских сетях трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулем» на трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-зигзаг с нулем». Схема соединения обмоток трансформатора «звезда-звезда с нулем» является распространенной в связи с тем, что имеет более простое конструктивное исполнение, меньшие размеры и меньшую стоимость, однако эти трансформаторы имеют большое сопротивление токам нулевой последовательности, что обусловлено тем, что магнитное поле, создаваемое токами нулевой последовательности имеет сложную конфигурацию и замыкается как в пределах магнитопровода, так и через бак трансформатора. Статистический анализ и расчеты [14, 16] показывают, что потеря напряжения при несимметричном режиме может достигать до 25-20% в сравнении к 4-5% в симметричном режиме, а каждому значению несимметрии напряжения соответствует 1,7% дополнительного отклонения напряжения. Поэтому часто такие трансформаторы выбираются с завышенным значением мощности на 2-3 ступени.

Результаты теоретического моделирования и практических замеров показывают, что в сельских электросетях с исходным уровнем несимметрии нагрузок невозможно обеспечить снижение потерь энергии заменой трансформаторов в связи со следующими причинами:

- применение в сетях трансформаторов с малым сопротивлением нулевой последовательности приводит к увеличению в линии и трансформаторе токов нулевой и обратной последовательностей, что увеличивает коэффициент увеличения потерь мощности K_p , аналогично тому, как это происходит в компенсационном способе;
- эквивалентное сопротивление нулевой последовательности сети с трансформаторами, имеющими малое сопротивление Z_0 , определяются в большей степени сопротивлением линии, которое значительно выше сопротивления таких трансформаторов;
- в связи с увеличением токов обратной последовательности в сети с трансформаторами с малым сопротивлением Z_0 , в узлах нагрузки воз-

растает напряжение обратной последовательности, что отрицательно влияет на работу трехфазных асинхронных электродвигателей.

Тем не менее, трансформаторы с малым сопротивлением нулевой последовательности со схемой «звезда-зигзаг с нулем» позволяют существенно снизить в узлах нагрузки напряжение нулевой последовательности. Таким образом, их применение может быть целесообразно в сельских сетях с коммунально-бытовой нагрузкой.

Перераспределение нагрузок по фазам обслуживающим персоналом на всех элементах системы электроснабжения позволяет своевременно воздействовать на работу системы и существенно повысить ее технико-экономические показатели. Перераспределение нагрузок производится по результатам контрольных замеров распределения нагрузки в электросети. Исследования показывают, что такой метод позволяет снизить потери электроэнергии на 15...20%, а также улучшает показатели качества стабилизации напряжения, уменьшает коэффициент несимметрии по обратной и нулевой последовательностям напряжения.

Автоматическое подключение однофазной нагрузки к наименее загруженной фазе осуществляется путем применения симметрирующих устройств (СУ) [37-40], что позволяет добиться равномерного распределения по фазам однофазных нагрузок сети и приводит к уменьшению тока нулевой последовательности, а, соответственно, и дополнительных потерь в электросети. В сельских сетях сложность может состоять в подборе однофазной автоматически переключаемой нагрузки соответствующей мощности. Важно помнить, что при использовании СУ происходит снижение надежности электроснабжения однофазной переключаемой нагрузки.

Использование этого метода наиболее эффективно для повышения качества параметров электроснабжения, поскольку приводит к минимизации коэффициентов нулевой и обратной последовательностей напряжения. С другой стороны, для уменьшения потерь электрической энергии, обусловленных несимметрией токов, этот способ не приемлем, так как использование такого трансформатора с СУ приводит к росту коэффициента увеличения потерь мощности K_p .

Использование нейтралера представляет собой подключение к электросети трехфазного электромагнитного аппарата с обмоткой, выполненной по схеме встречного зигзага для создания искусственной нулевой точ-

ки [14-16]. Снижение несимметрии фазных напряжений может быть достигнуто уменьшением длины нулевого провода путём перемещения нейтрали к однофазным электроприёмникам. Электросеть выполняется трёхпроводной с линейным напряжением эквивалентным номинальному напряжению трёхфазных электроприёмников, а от нейтралера до электроприёмника — четырёхпроводной. В этом случае напряжение смещения нейтрали будет минимально, так как протяжённость нулевого провода мала. Точка включения нейтралера выбирается так, чтобы сопротивление нулевой последовательности было меньше заданного значения. В результате использования нейтралера существенно снижается неравномерность распределения токов по фазам, что приводит к ослаблению несимметрии напряжения и уменьшению его потерь в наиболее загруженной фазе, а значит к повышению пропускной способности линии. Кроме того, при установке нейтралера увеличиваются токи однофазного короткого замыкания, что повышает надёжность защиты низковольтной сети. Тем не менее, нейтралер на сегодняшний день считается устаревшим техническим решением, поскольку его применение ограничивается трансформаторами мощностью до 40 кВА.

С целью симметрирования электросети также применяются электромашинные преобразователи числа фаз, где передача и преобразование энергии осуществляется по схеме «трехфазная сеть - трехфазный электродвигатель - однофазный генератор - однофазная нагрузка». Однофазная нагрузка не связана с трехфазной питающей сетью и эффекты несимметричного распределения нагрузки не оказывают влияния на электросеть. Основными проблемами данной методики является высокая стоимость оборудования и большие потери энергии, что нивелирует положительный эффект [28].

Использование симметрирующих устройств включает в себя применение СУ, которые воздействуют только на токи обратной последовательности и снижают коэффициент несимметрии токов обратной последовательности K_{2I} , см. (1.6). Принцип работы основан на том, что пульсирующие индуктивно-емкостные элементы совпадают по фазе и компенсируют пульсирующую мощность однофазной нагрузки [37-40].

Применение комбинированных симметрирующих устройств позволяет компенсировать токи обратной и нулевой последовательностей [38-

40]. Симметрирующие устройства этого типа могут снижать токи обратной и нулевой последовательностей сети. Недостатком данного типа устройств является невозможность регулирования мощности, что в свою очередь снижает качество симметрирования либо вынуждает использовать дополнительные устройства, что увеличивает сложность, размер и себестоимость схемы. Анализ показывает, что для наиболее эффективного снижения дополнительных потерь мощности и повышения качества электрической энергии, обусловленных несимметрией токов в электросети наиболее целесообразно использовать шунтосимметрирующие устройства с малым сопротивлением токам нулевой последовательности.

1.4 Выводы к разделу 1

1. Показано, что развитие промышленности и распространение бытовой электроники в селах приводит к существенному увеличению мощностей электропотребления; сельскохозяйственные потребители имеют на своем балансе значительное количество линий электропередачи, трансформаторных подстанций, электродвигателей и других производственных электроустановок.

2. Предложено рассматривать возникновение несимметричных режимов работы электрической системы, связанные с неравномерностью распределения нагрузок по фазам в качестве ключевой особенности электроснабжения в сельской местности.

3. На основе анализа статистических данных отмечено, что при проектировании системы электроснабжения сельскохозяйственных объектов не учитывается общая нагрузка и мощность отдельных потребителей электроэнергии для реализации равномерного распределения по фазам сети.

4. Предложены методики снижения несимметрии токов и напряжений в электросети, в частности уменьшение сопротивления нулевой последовательности, уменьшение коэффициента нулевой последовательности токов, уменьшение коэффициента обратной последовательности токов и комбинированная методика по уменьшению токов прямой и обратной последовательности, что включает в себя применение симметрирующих устройств компенсационного типа и применение симметрирующих устройств фильтрового типа.

5. В результате анализа существующих способов симметрирования сельских электросетей сформулированы следующие выводы: существующие на сегодняшний день методики трудоемки в исполнении, неэффективны с экономической точки зрения и не позволяют в нужной мере снизить дополнительные потери и повысить качество электроснабжения сельскохозяйственных объектов. Технические средства, используемые для симметрирования режимов работы электросетей, эффективно могут быть использованы только для случая неизменяющейся токовой нагрузки. Использование методик снижения несимметрии токов изменяющейся во времени нагрузки связано с дополнительными потерями электроэнергии в самом устройстве.

6. Предложено разработать симметрирующее устройство с автоматическим управлением его параметрами и промоделировать расчёт симметричных составляющих токов и напряжений электросети.

РАЗДЕЛ 2

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Для решения проблемы несимметрии токов, обусловленной неравномерно и случайно распределённой однофазной нагрузкой, которая является одной из основных причин низкой эффективности использования электроэнергии в сельских распределительных сетях, необходимо провести математическое моделирование процессов, происходящих в электросетях и на основе результатов моделирования выбрать оптимальный метод, который позволит уменьшить негативное влияние несимметрии трехфазной сети.

В условиях эксплуатации электросетей определение показателей несимметрии токов и напряжений имеет смысл проводить по результатам измерений модулей токов и напряжений, используя в дальнейших расчетах модульный метод [41-42].

2.1 Расчет показателей несимметрии для токов и напряжений электрической сети

Для проведения расчётов необходимо амперметрами измерить пять фазных токов $I_A, I_B, I_C, I_N, I_{BC}$, включив их через измерительные трансформаторы тока, причем измерение тока I_{BC} должно быть проведено двумя амперметрами, включенными через измерительные преобразователи тока в фазах B и C . На основе этих данных в результате преобразований получены выражения для симметричных составляющих токов [41]:

$$\begin{cases} \bar{I}_0 = \frac{d-je}{3} \\ \bar{I}_1 = \frac{3 \cdot I_A^2 - I_A(d + \sqrt{3} \cdot e) + 2\sqrt{3} \cdot g + j(\sqrt{3} \cdot I_A^2 - I_A(\sqrt{3} \cdot d - e) - 2\sqrt{3} \cdot h)}{6 \cdot I_A} \\ \bar{I}_2 = \frac{(3 \cdot I_A^2 - I_A(\sqrt{3} \cdot e - d) - 2\sqrt{3} \cdot g) - j(\sqrt{3} \cdot I_A^2 - I_A(\sqrt{3} \cdot d + e) - 2\sqrt{3} \cdot h)}{6 \cdot I_A} \end{cases}, \quad (2.1)$$

где коэффициенты b_1, b_2, c_1, c_2 определяются следующим образом

$$\begin{cases} b_1 = \frac{I_A^2 + I_{BC}^2 - I_N^2}{2 \cdot I_{BC}} \\ b_2 = \frac{I_B^2 + I_{BC}^2 - I_C^2}{2 \cdot I_{BC}} \end{cases}, \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} c_1 = \sqrt{I_A^2 - b_1^2} \\ c_2 = \sqrt{I_B^2 - b_2^2} \end{cases}. \quad (2.3)$$

А уже на их основе, в свою очередь, в соответствии с модульным методом рассчитываются коэффициенты d , e , g , h :

$$d = \frac{I_A^2 - I_{BC}^2 - I_N^2}{2 \cdot I_A}, \quad (2.4)$$

$$e = \sqrt{I_N^2 - d^2}, \quad (2.5)$$

$$g = c_1(b_1 + b_2), \quad (2.6)$$

$$h = b_1 b_2 - c_1 c_2, \quad (2.7)$$

Используя формулу (2.1) можно определить коэффициенты обратной и нулевой последовательностей токов:

$$\begin{cases} \overline{K_{2I}} = \frac{\overline{I_2}}{\overline{I_1}} \\ \overline{K_{0I}} = \frac{\overline{I_0}}{\overline{I_1}} \end{cases}. \quad (2.8)$$

Подобным образом рассчитываются коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности. Первым этапом расчета является вычисление симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности напряжения:

$$\begin{cases} \overline{U_0} = \frac{U_{A+p+q-j \cdot (s-r)}}{3} \\ \overline{U_1} = \frac{(2 \cdot U_A + \sqrt{3} \cdot (s+r) - (p+q)) + j((s-r) + \sqrt{3} \cdot (p-q))}{6}, \\ \overline{U_2} = \frac{(2 \cdot U_A - \sqrt{3} \cdot (s+r) - (p+q)) + j((s-r) - \sqrt{3} \cdot (p-q))}{6} \end{cases}, \quad (2.9)$$

где коэффициенты p и q определяются как

$$p = \frac{U_A^2 + U_B^2 - U_{AB}^2}{2 \cdot U_A}, \quad (2.10)$$

$$q = \frac{U_A^2 + U_C^2 - U_{CA}^2}{2 \cdot U_A}, \quad (2.11)$$

и используются для вычисления коэффициентов s и r :

$$s = \sqrt{U_B^2 - p^2}, \quad (2.12)$$

$$r = \sqrt{U_C^2 - q^2}. \quad (2.13)$$

На основе (2.9) рассчитываются коэффициенты обратной и нулевой последовательностей напряжений:

$$\begin{cases} \overline{K_{2U}} = \frac{\overline{U_2}}{\overline{U_1}} \\ \overline{K_{0U}} = \frac{\overline{U_0}}{\overline{U_1}} \end{cases} \quad (2.14)$$

Расчет по формуле (2.8) позволяет также вычислить коэффициент потерь мощности K_p :

$$K_p = 1 + K_{2I}^2 + 4 \cdot K_{0I}^2. \quad (2.15)$$

2.2 Алгоритм расчета показателей работы электрической сети

Формулы (2.1-2.15), рассмотренные выше, позволяют вычислить показатели несимметрии токов и напряжений, а также коэффициент потерь мощности, которые обусловлены несимметрией токов в электросети с распределенной нагрузкой и симметрирующим устройством. Исходными данными для расчета показателей несимметрии токов и напряжений служат измеренные величины токов и напряжений, которые используются в модульном методе расчёта и представлены в таблицах 2.1-2.2. Алгоритм математического моделирования показан на блок-схемах рисунков 2.1-2.6-2.8.

Общее представление об алгоритме расчета показателей несимметрии электросети дает рисунок 2.1. Схема, представленная на рисунке, состоит из пяти основных блоков: (1) проведение серии измерений фазных токов и напряжений; (2) усреднение данных измерений; (3) промежуточные расчеты, (4) вычисление симметричных составляющих токов и

напряжений; (5) определение коэффициентов обратной и нулевой последовательностей.

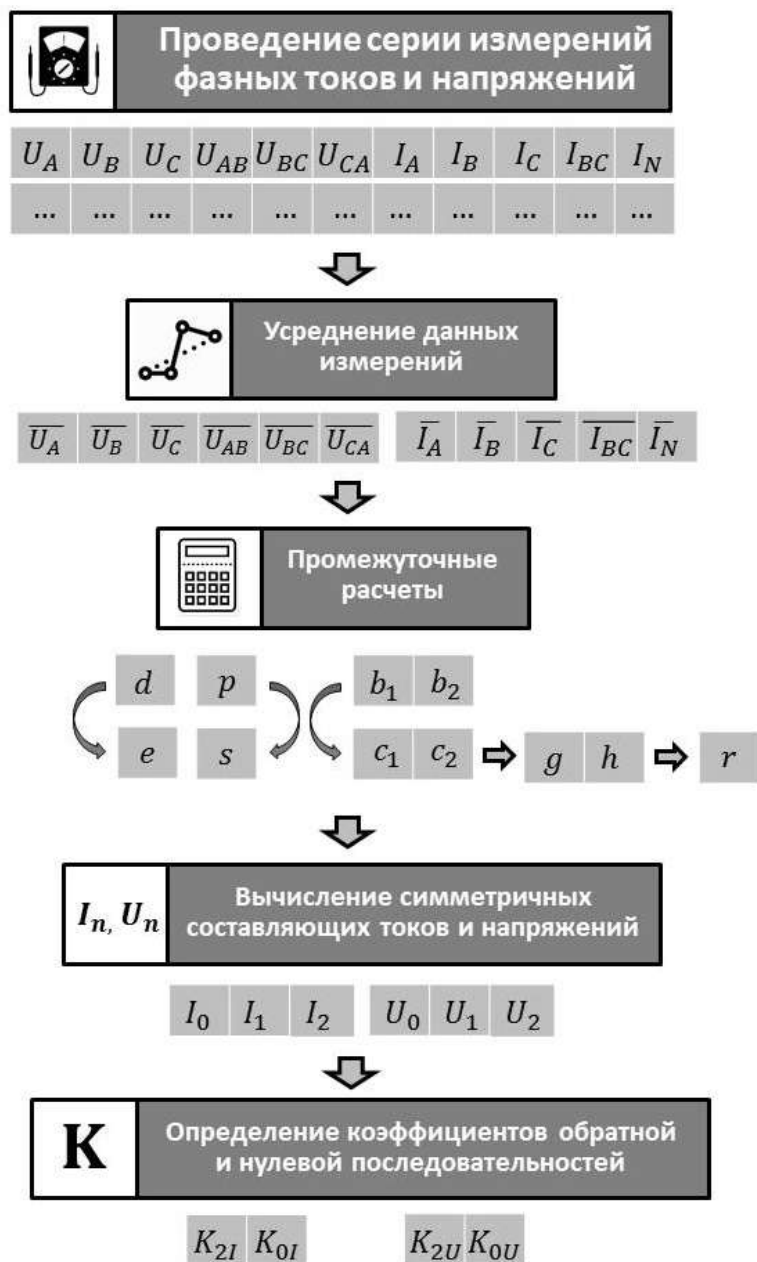


Рисунок 2.1 – Блок-схема расчета показателей несимметрии электросети

Исходными данными расчета являются результаты измерений, при этом в ходе эксперимента фиксируется время измерений, включая интервал между измерениями (подразумевается, что данный показатель является фиксированным). Первый блок данных составляют напряжения: U_A , U_B , U_C и U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} [29], представленные в таблице 2.1 а также на графиках (рис. 2.2 и 2.3).

Таблица 2.1 – Фазные напряжения электросети

U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
236	236	231	413	404	408
234	238	229	414	402	403
230	240	231	413	409	403
234	237	231	411	399	403
238	235	232	408	400	406
233	236	232	411	405	408
232	235	231	409	401	403
238	233	227	411	396	403
237	233	228	413	398	405
247	235	229	417	403	402
239	235	228	415	398	401
236	238	234	413	411	402
235	241	233	418	409	405
233	239	232	414	408	404
236	236	232	412	408	403
233	234	227	409	398	401
238	242	233	420	407	410
236	239	231	417	403	409
238	237	236	415	410	412
238	239	235	417	412	413
239	235	238	411	410	414
240	241	237	419	412	413
235	243	239	420	415	411
233	242	234	414	412	405
234	244	235	418	410	402
231	232	233	418	406	408
231	239	229	416	404	407
236	243	224	421	414	409
239	241	238	417	415	413

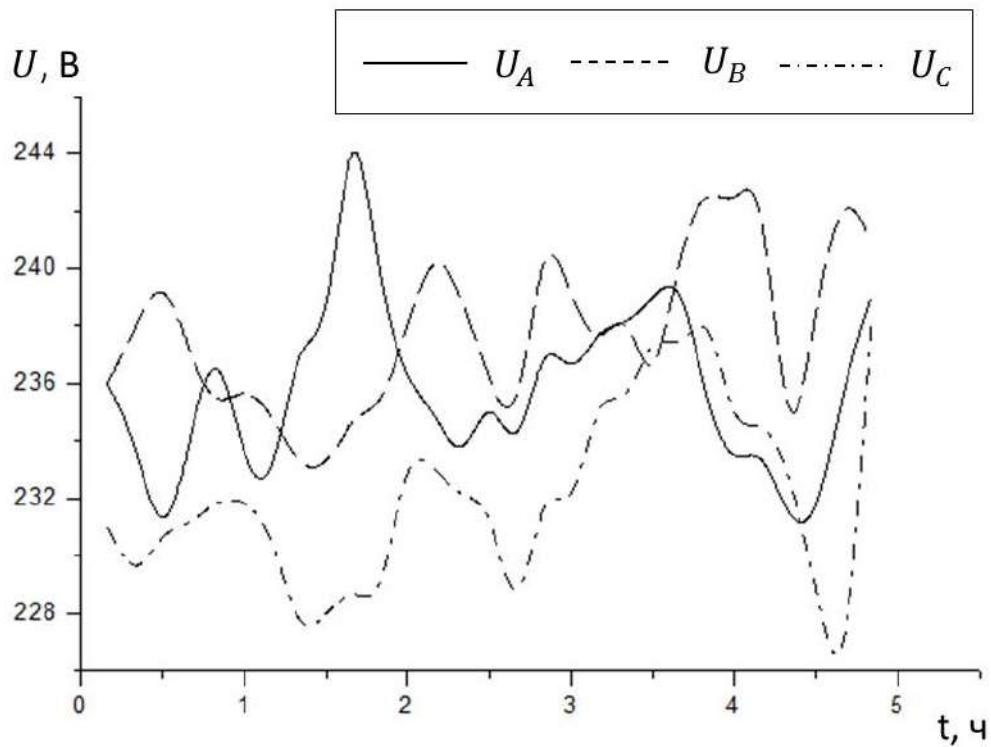


Рисунок 2.2 – Колебания напряжений U_A , U_B и U_C в зависимости от времени

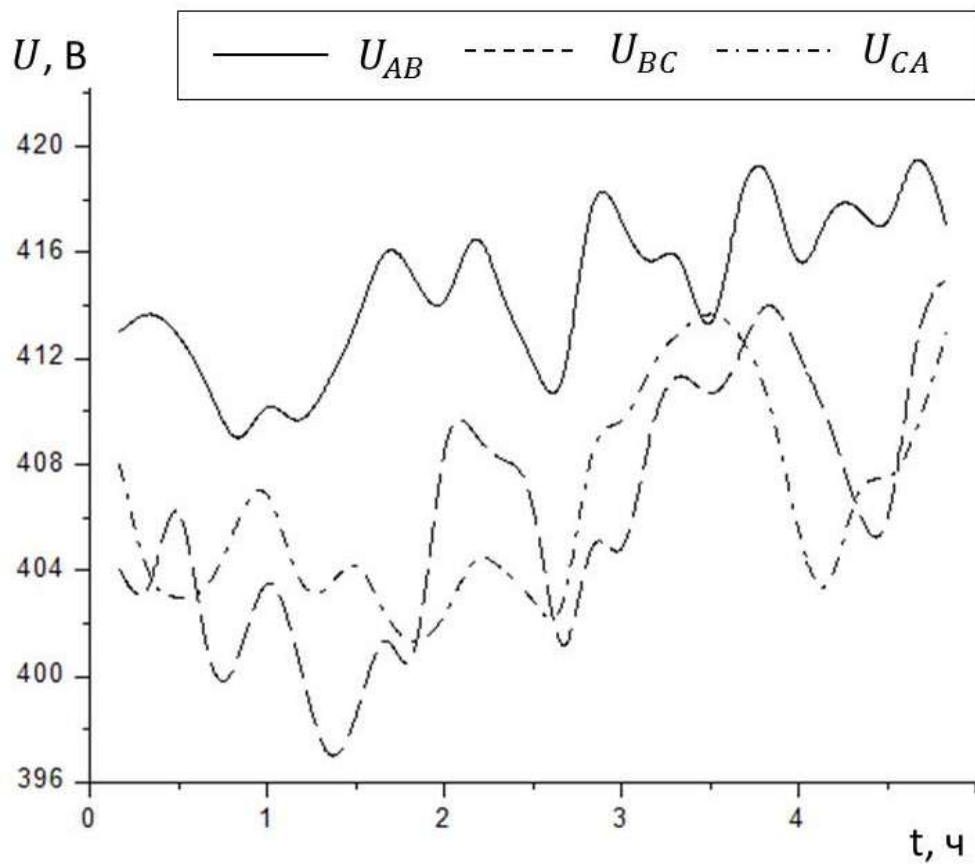


Рисунок 2.3 – Колебания напряжений U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} в зависимости от времени

Следующий блок данных составляют токи: I_A , I_B , I_C , I_N , I_{BC} , представленные в таблице 2.2 а также на графиках (рис. 2.4 и 2.5):

Таблица 2.2 – Фазные токи электросети

I_A	I_B	I_C	I_N	I_{BC}
96	20	98	68	90
75	20	91	54	87
72	20	88	51	82
75	21	89	49	81
81	25	87	50	83
81	30	93	50	88
78	25	102	60	92
72	21	100	60	95
76	21	94	58	92
80	21	97	56	91
74	30	95	47	89
78	22	100	61	96
79	22	97	57	93
74	22	94	55	89
81	21	100	59	96
81	22	102	60	99
72	24	110	69	102
78	24	103	67	98
81	23	103	66	96
81	22	98	64	93
91	27	95	58	91
92	37	98	52	89
92	26	103	62	98
76	34	100	62	101
96	20	98	68	90
75	20	91	54	87
72	20	88	51	82
75	21	89	49	81
81	25	87	50	83

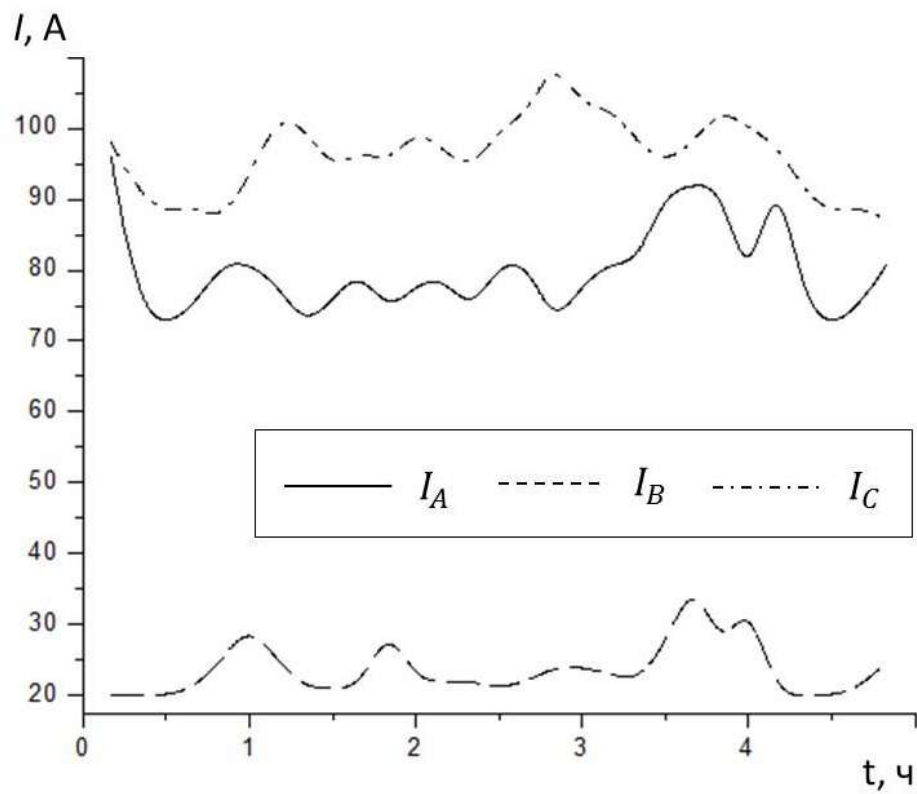


Рисунок 2.4 – Колебания токов I_A , I_B , I_C в зависимости от времени

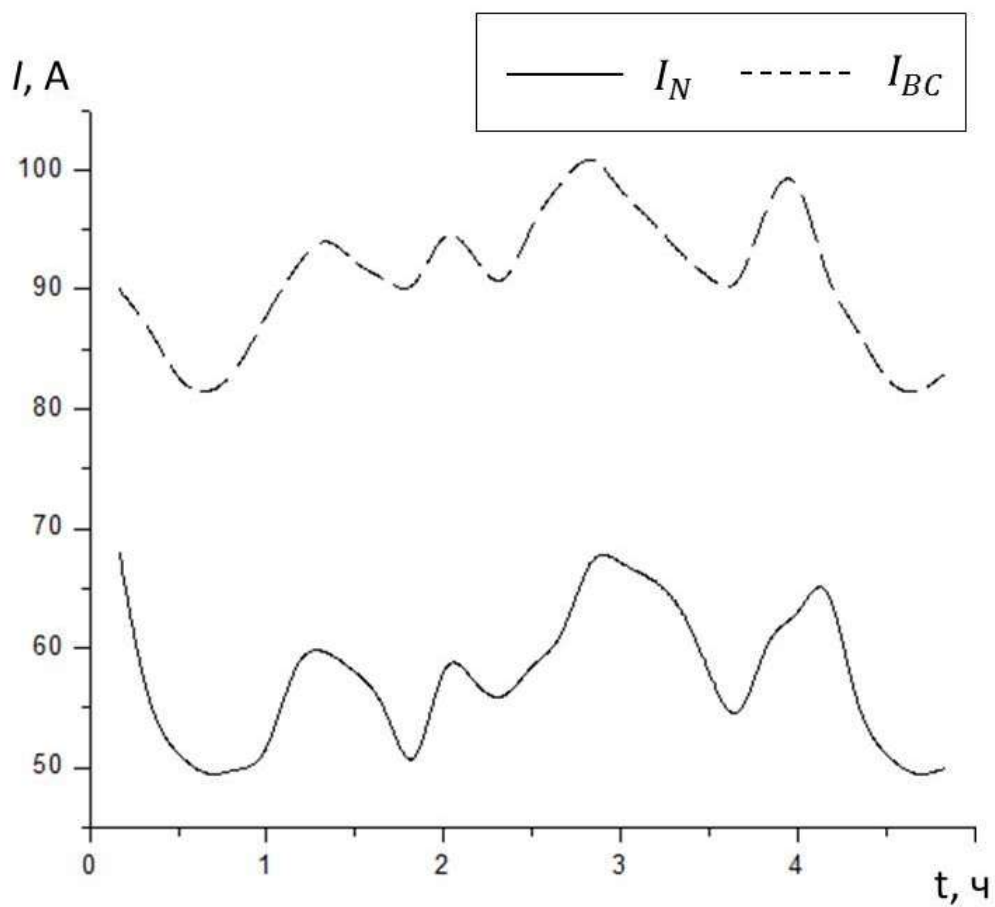


Рисунок 2.5 – Колебания токов I_N , I_{BC} в зависимости от времени

Следующий этап включает в себя усреднение полученных экспериментальных данных и их использование при расчете коэффициентов $b_1, b_2, c_1, c_2, d, e, g, h, p, q, s$ и r (рис. 2.6), которые в дальнейшем могут быть использованы для вычисления коэффициентов обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений, а также коэффициента потерь мощности.

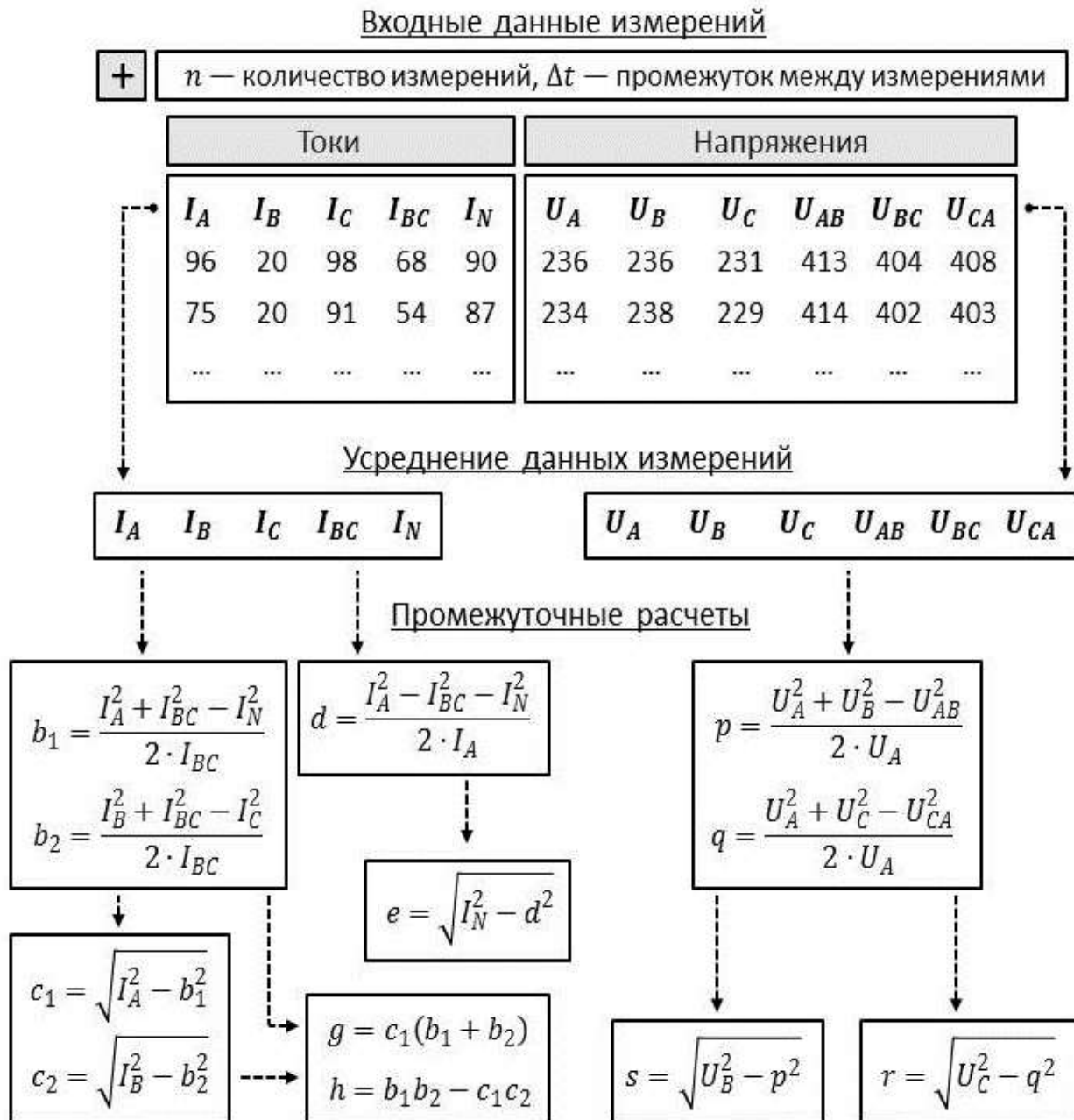


Рисунок 2.6 – Блок-схема проведения усреднения данных измерений и промежуточных расчетов

Как показано на рисунке 2.6, на основе усредненных значений токов $I_A, I_B, I_C, I_N, I_{BC}$, программный комплекс рассчитывает коэффициенты b_1, b_2, c_1, c_2 , на основе которых, в свою очередь вычисляются значения коэффициентов d, e, g, h . Аналогично проводится операция для усредненных значений фазных напряжений U_A, U_B, U_C и U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} . На их основе рассчитываются значения p и q , с помощью которых вычисляются коэффициенты s и r .

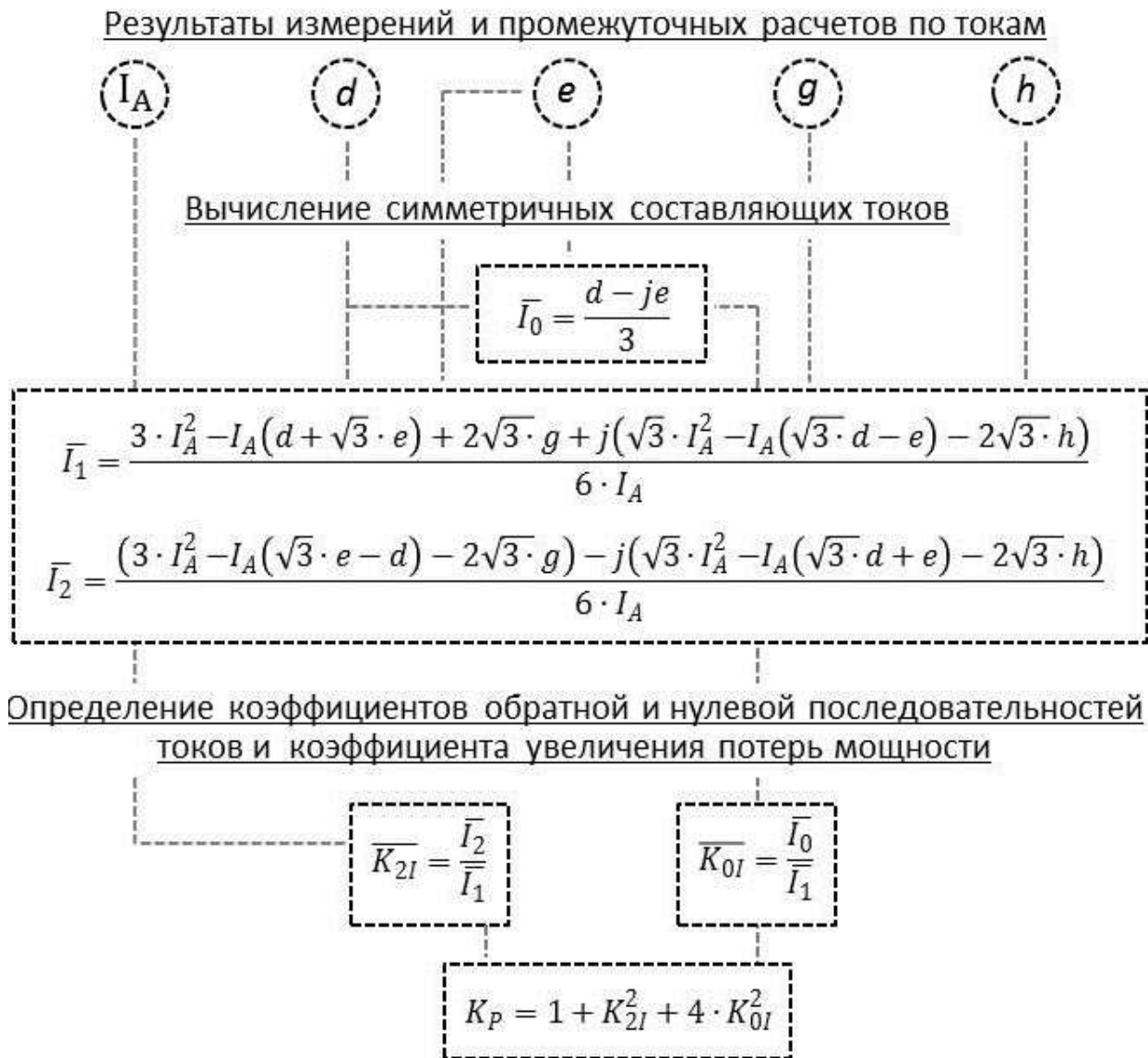


Рисунок 2.7 – Блок-схема определение коэффициентов обратной и нулевой последовательностей токов и коэффициента увеличения потерь мощности

Последние этапы алгоритма отвечают за определение коэффициентов обратной и нулевой последовательностей токов, коэффициента увеличения потерь мощности (рис. 2.6) и коэффициентов обратной и нулевой последовательностей напряжений (рис. 2.7).



Рисунок 2.8 – Блок-схема определения коэффициентов обратной и нулевой последовательностей напряжений

Вычисление коэффициентов обратной и нулевой последовательностей токов (рис. 2.9) производится на основе значений симметричных составляющих токов, которые, в свою очередь, рассчитываются на основе усредненного значения I_A и коэффициентов d, e, g, h . Коэффициенты обратной и нулевой последовательностей напряжений (рис. 2.10) рассчитываются на основе значений симметричных составляющих напряжений, которые вычисляются с использованием значения U_A и коэффициентов p, q, s, r .

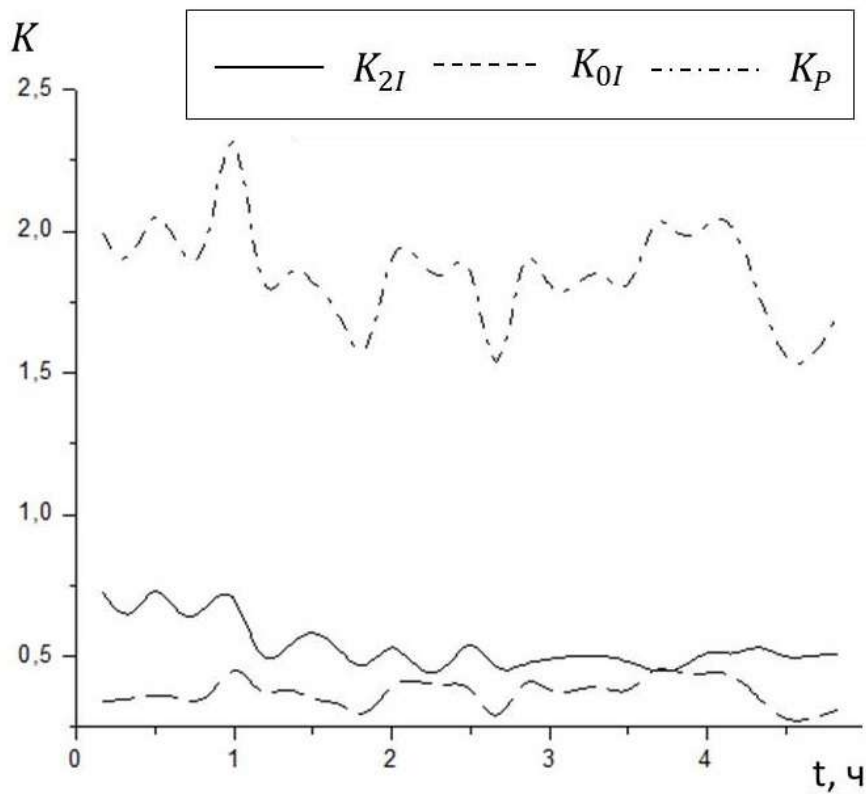


Рисунок 2.9 – Колебания коэффициентов обратной и нулевой последовательностей токов и коэффициента увеличения потерь мощности

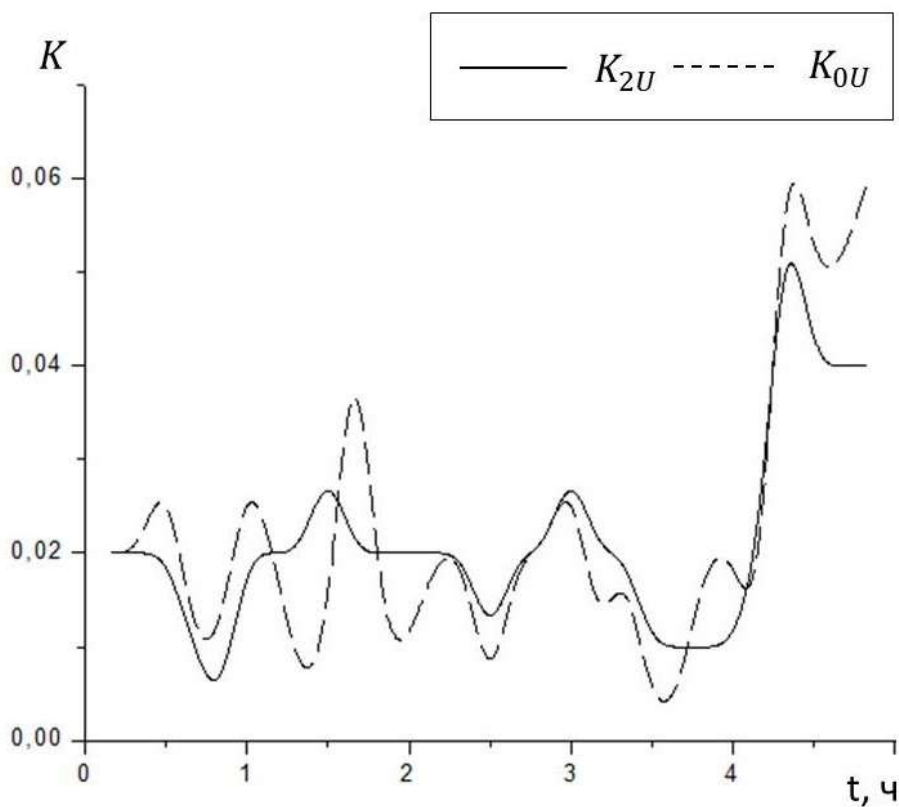


Рисунок 2.10 – Колебания коэффициентов обратной и нулевой последовательностей напряжений в зависимости от времени

При расчете коэффициента увеличения потерь мощности используются уже полученные значения коэффициентов обратной и нулевой последовательностей токов.

2.3 Выводы к разделу 2

1. Показано, что математическое моделирование процессов, происходящих в электросетях позволяет приблизиться к решению проблемы несимметрии токов, которая обусловлена неравномерной нагрузкой и приводит к низкой эффективности использования электроэнергии в сельских распределительных сетях.

2. Предложена методика математического расчета на основе модульного метода, которая позволяет определить зависимость коэффициентов обратной и нулевой последовательностей токов, коэффициента увеличения потерь мощности и коэффициентов обратной и нулевой последовательностей напряжений от времени, выявить причину несимметрии и выбрать оптимальный метод нивелирования негативного влияния несимметрии сети.





3. Разработан алгоритм расчета параметров электросети, который включает в себя проведение серии измерений фазных токов и напряжений с указанием времени каждого измерения; усреднение данных измерений, промежуточные вычисления и расчет искомым параметров.

РАЗДЕЛ 3

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Особенности работы сельских электрических сетей в первую очередь зависят от климатических условий и направления хозяйственной деятельности. В данной работе рассматриваются регионы с резко континентальным климатом, для которых основой хозяйственной деятельности является зерноводство и животноводство. Такие климатические условия характерны для Восточной и Центральной Сибири, Казахстана и Монголии. В таблице 3.1 приведен пример климатических особенностей Якутска [43], включая абсолютный максимум температур T_{max} , средний максимум температур \bar{T}_{max} , среднюю температуру \bar{T} , средний минимум температур \bar{T}_{min} , абсолютный минимум температур T_{min} и норму осадков N в расчете на время года.

Таблица 3.1 – Климатические особенности Якутска

	 Зима	 Весна	 Лето	 Осень
$T_{max}, ^\circ\text{C}$	-4	20,2	36,3	16,2
$\bar{T}_{max}, ^\circ\text{C}$	-32,7	0,9	23,1	-5,1
$\bar{T}, ^\circ\text{C}$	-10,9	-5,8	17	-9,6
$\bar{T}_{min}, ^\circ\text{C}$	-40	-12,7	10,3	-14
$T_{min}, ^\circ\text{C}$	-62,4	-38	-4,9	-36,5
$N, \text{мм}$	27	35	93	65

3.1 Анализ функциональных параметров распределительных электросетей

В качестве объекта исследования были выбраны данные экспериментального наблюдения сельских распределительных сетей 0,38 кВ районных центров Монголии, проведенные Гантулга Дамдинсурэнгийном

[43], которые были представлены трансформаторными подстанциями 10 кВ общим числом 144 шт., воздушными ЛЭП 10 кВ общей длиной 432 км; кабельными ЛЭП 10 кВ общей длиной 7,8 км; воздушными ЛЭП 0,38 кВ общей длиной 204,9 км и кабельными ЛЭП 0,38 кВ общей длиной 62,6 км. Измерения производились на трансформаторных подстанциях (ТП): ТП-5 (4 отходящих линии), ТП-9 (3 отходящих линии) и ТП-17 (2 отходящих линии), особенности нагрузки которых представлены на рисунке 3.1-3.2.



Рисунок 3.1 – Общая характеристика ТП-17 и ее электроприемников

Подстанции ТП-5 и ТП-9 имеют близкие параметры электронагрузок (рис. 3.1.) — это обеспечение электроэнергией многоквартирных домов, мастерских и магазинов. Значительная часть энергии уходит на обогрев помещений калориферами и ТЭНами, освещение и электроинструмент.

Подстанция ТП-17 осуществляет питание котельных, многоэтажных жилых домов, пищевых комбинатов, строительного оборудования. Требования и соответственно затраты электроэнергии в данном случае выше, что вызывает большой перекося фаз.



Рисунок 3.2 – Общая характеристика ТП-17 и ее электроприемников

3.2 Расчет параметров распределительных электросетей

Результаты произведенных измерений фазных и междуфазных токов и напряжений на отходящих от подстанций ТП-5 ЛЭП представлены в таблице 3.2 и 3.3. на также на рисунках 3.3 — 3.18.

Таблица 3.2 – Результаты произведенных измерений фазных и межфазных напряжений линий ТП-5

	Линия	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
Зима	Л1	238	244	232	390	390	390
	Л2	237	243	235	390	389	390
	Л3	239	242	233	390	390	390
	Л4	239	244	233	390	390	389
Весна	Л1	228	230	225	402	402	400
	Л2	228	230	225	402	402	400
	Л3	234	237	230	401	401	400
	Л4	233	236	230	401	401	400
Лето	Л1	225	217	228	380	389	392
	Л2	234	237	230	401	401	400
	Л3	225	217	227	380	388	391
	Л4	225	217	228	380	389	392
Осень	Л1	231	224	230	396	398	398
	Л2	230	222	230	394	397	398
	Л3	231	224	229	396	397	398
	Л4	231	223	229	395	396	396

Графики напряжений (рис. 3.3 – 3.8) показывают несимметрию фазных напряжений и дают представление о типе нагрузки. Можно видеть, зависимость фазы «В» от времени года. Для линий Л1, Л2 и Л4 эта фаза используется для подключения обогрева помещений и освещения и поэтому наиболее нагружена зимой, а наименее — летом.

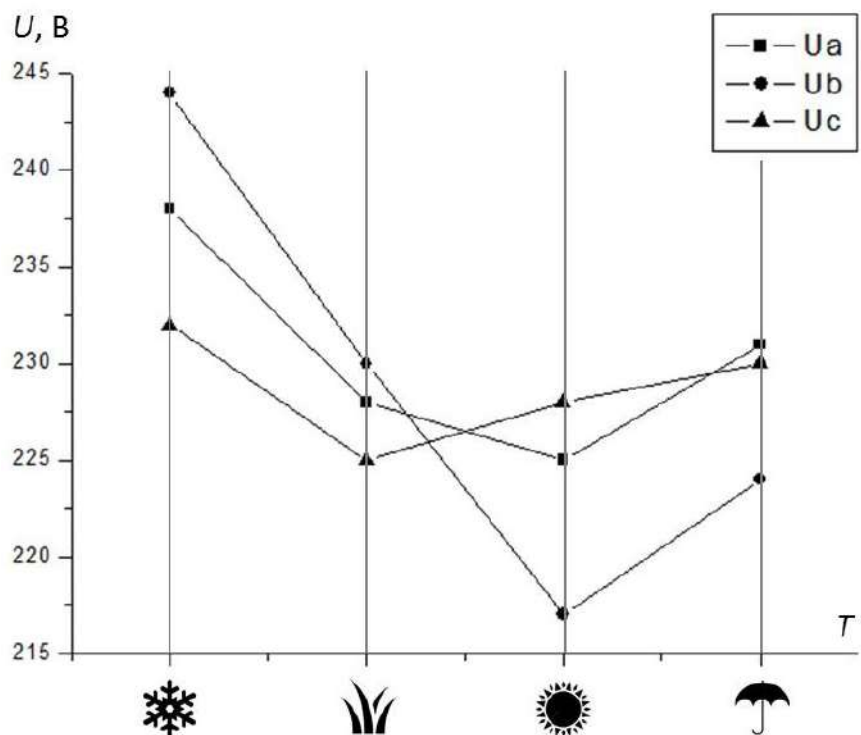


Рисунок 3.3 – Зависимость фазных напряжений на Л1 ТП-5 от времени года

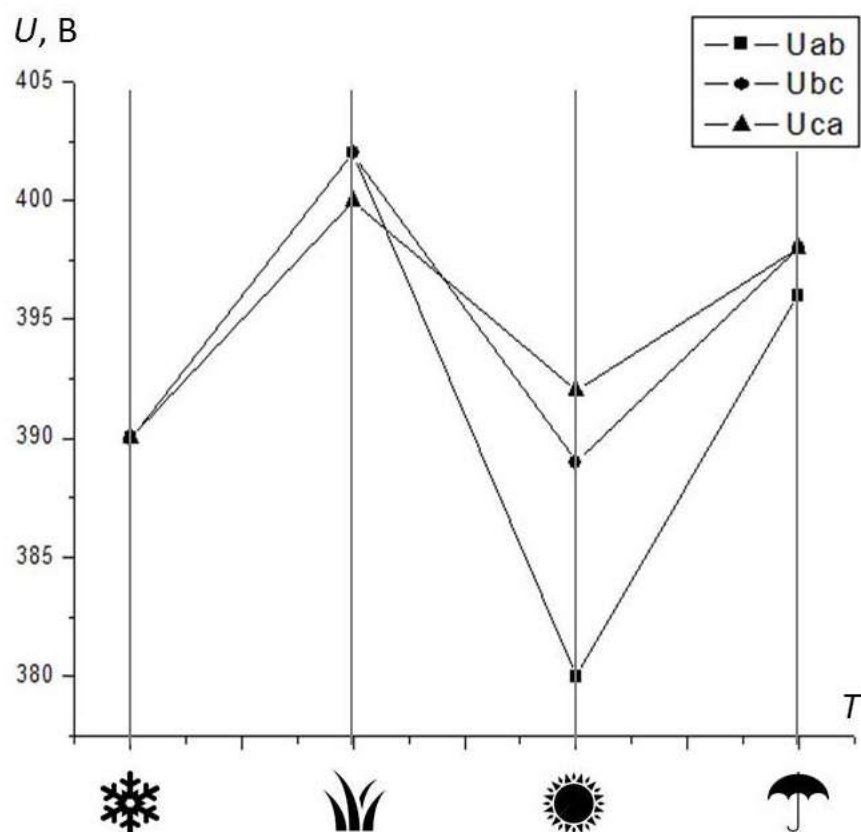


Рисунок 3.4 – Зависимость межфазных напряжений на Л1 ТП-5 от времени года

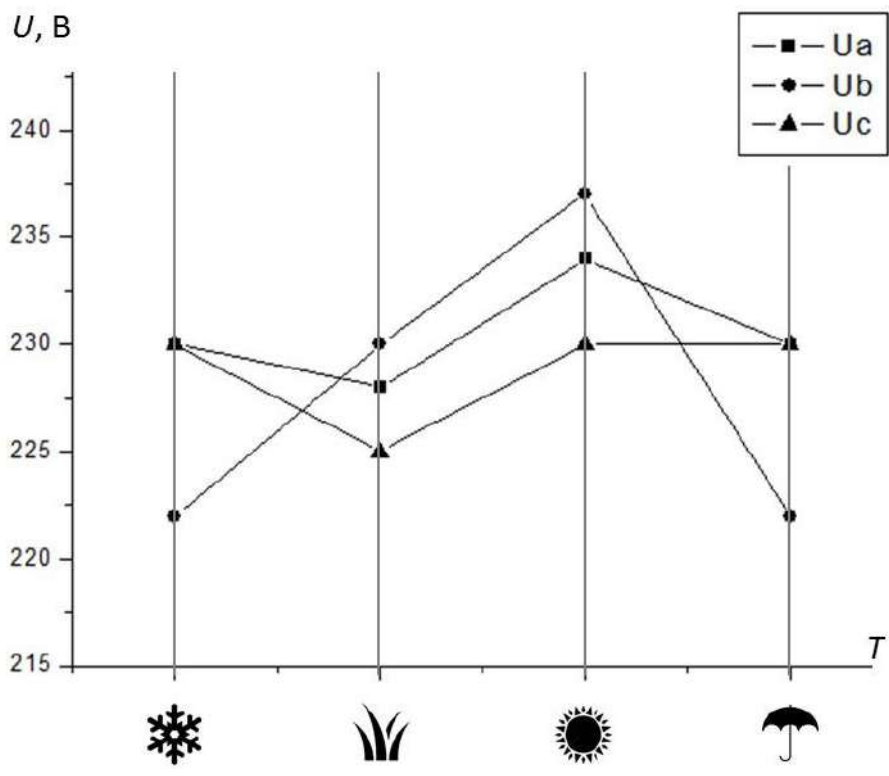


Рисунок 3.5 – Зависимость фазных напряжений на Л2 ТП-5 от времени года

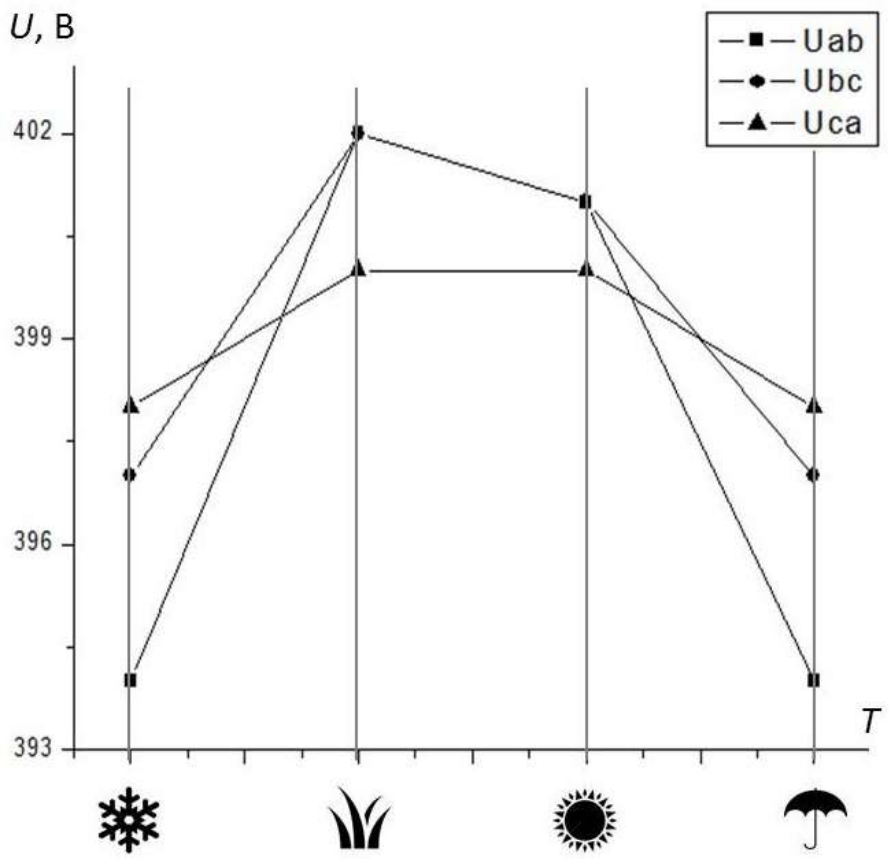


Рисунок 3.6 – Зависимость межфазных напряжений на Л2 ТП-5 от времени года

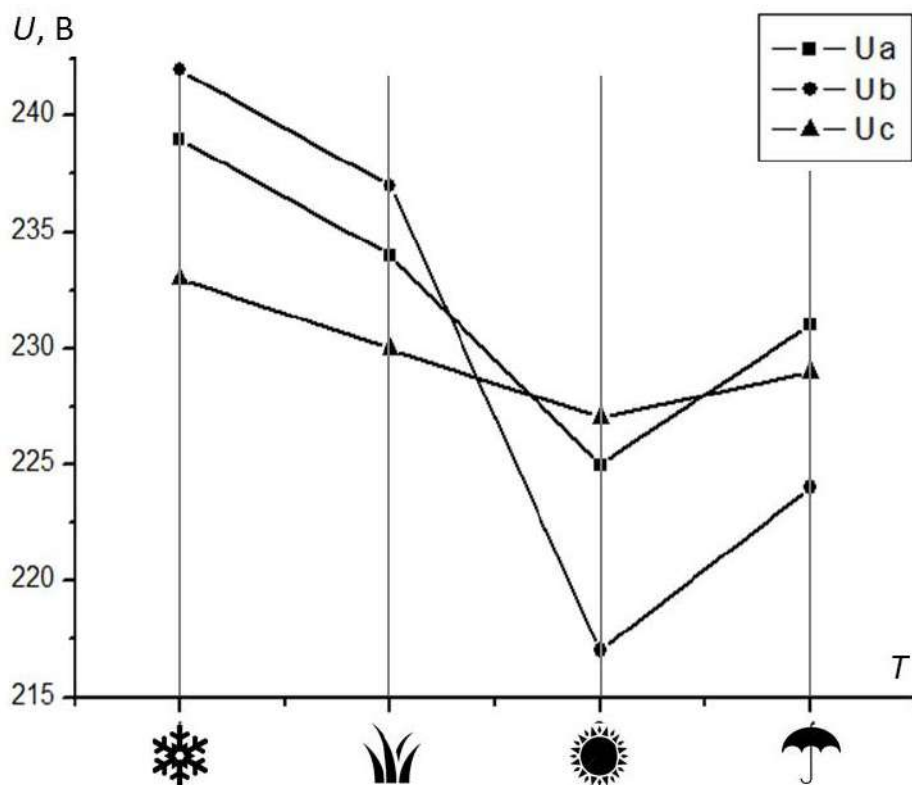


Рисунок 3.7 – Зависимость фазных напряжений на ЛЗ ТП-5 от времени года

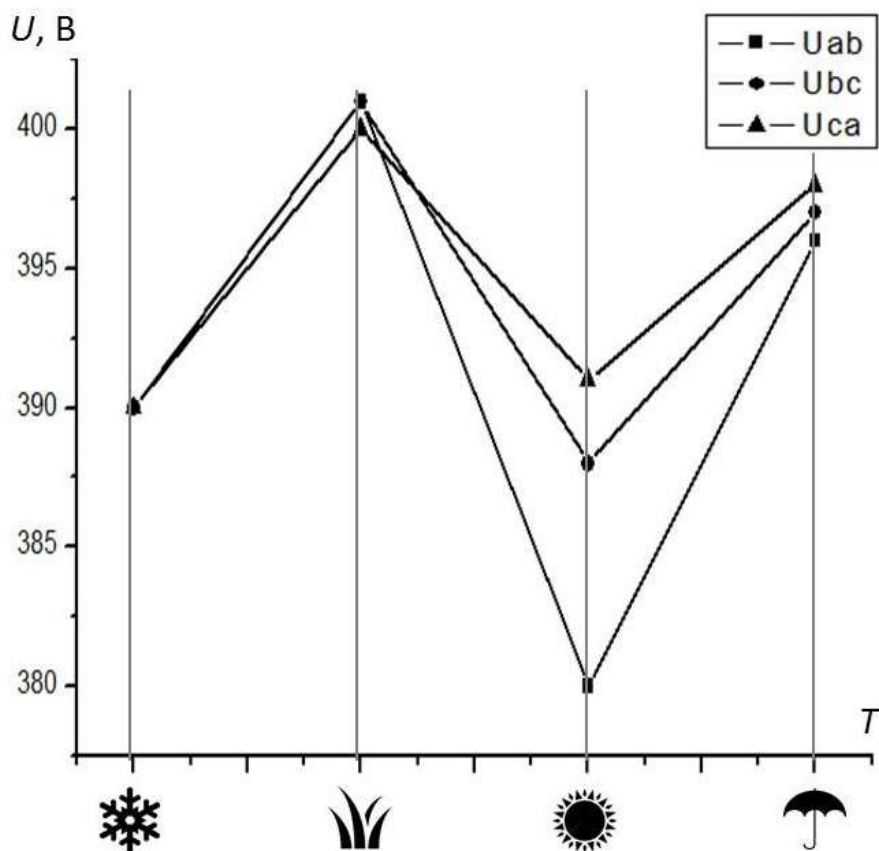


Рисунок 3.8 – Зависимость межфазных напряжений на ЛЗ ТП-5 от времени года

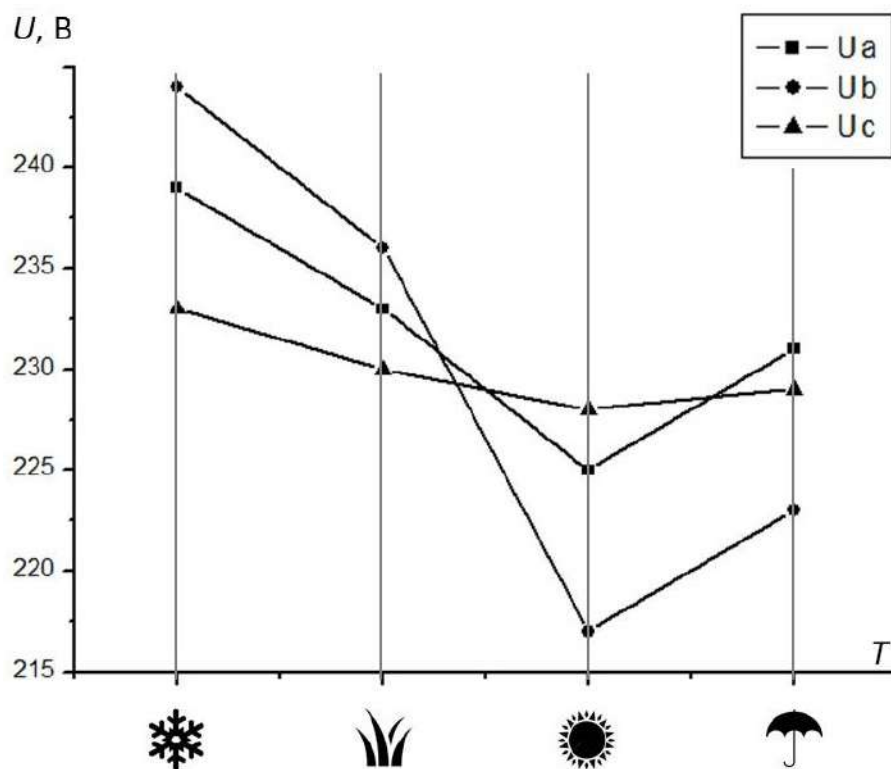


Рисунок 3.9 – Зависимость фазных напряжений на Л4 ТП-5 от времени года

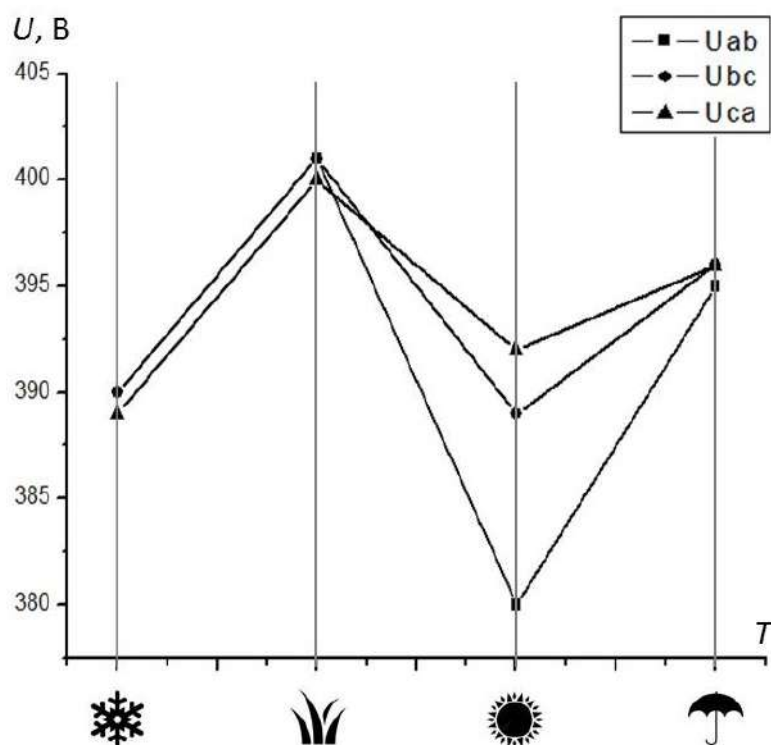


Рисунок 3.10 – Зависимость межфазных напряжений на Л4 ТП-5 от времени года

Для линии ЛЗ, как можно видеть на графиках, зависимость обратная, в этой линии ваза «В» питает электроинструмент, а строительные работы большей частью проводятся летом.

Таблица 3.3 – Результаты произведенных измерений фазных и межфазных токов линий ТП-5

	Линия	I_A	I_B	I_C	I_N	I_{BC}
Зима	Л1	12,76	9,30	35,41	24,24	30,46
	Л2	27,49	35,18	23,21	19,14	32,75
	Л3	36,19	34,37	60,43	26,28	49,82
	Л4	11,59	22,63	21,28	15,93	22,75
Весна	Л1	14,23	7,45	27,88	20,82	27,99
	Л2	19,45	29,12	20,71	14,74	26,83
	Л3	47,65	29,81	38,07	21,27	43,03
	Л4	17,96	17,65	9,53	13,25	15,41
Лето	Л1	8,17	10,91	10,23	6,29	11,12
	Л2	47,65	29,81	38,07	21,27	43,03
	Л3	14,58	18,44	9,28	17,96	16,58
	Л4	34,19	33,83	30,74	10,65	35,83
Осень	Л1	10,88	15,90	18,40	10,63	15,61
	Л2	26,74	33,60	24,73	16,12	35,00
	Л3	41,14	45,25	28,37	24,11	48,76
	Л4	19,03	18,70	16,53	10,65	21,82

Как можно было предположить, перекос фаз токов и напряжений на линиях подстанции ТП-5 привел к возникновению коэффициентов несимметрии токов по обратной и нулевой последовательности, что в свою очередь, привело к увеличению потерь мощности, которые характеризует коэффициент дополнительных потерь.

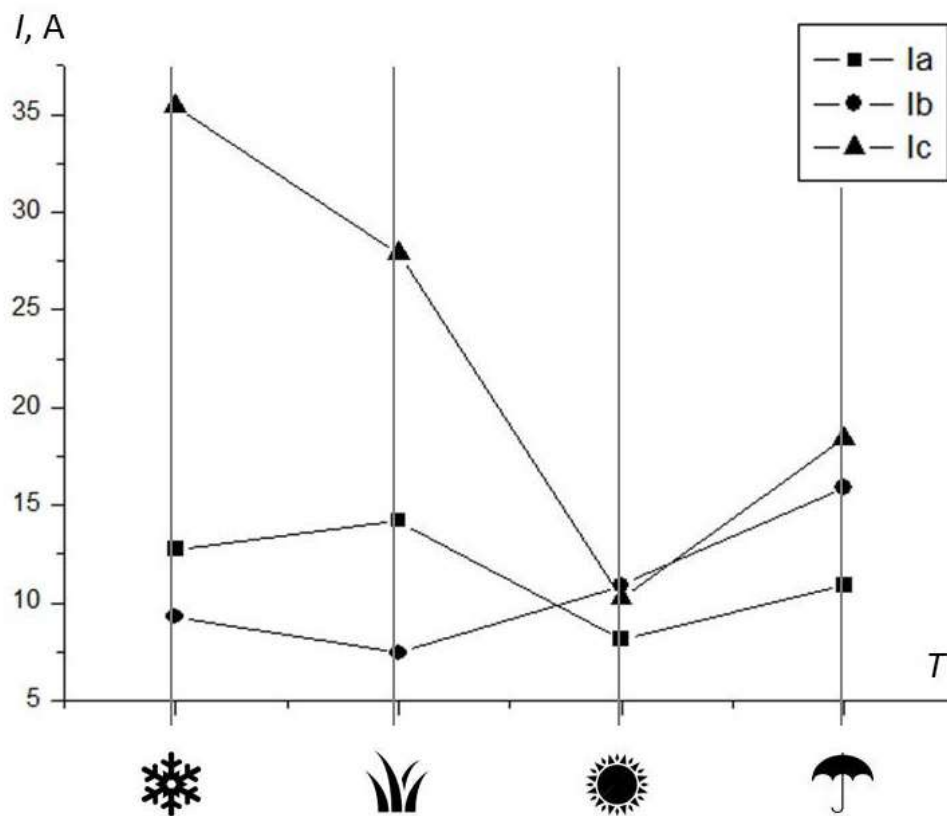


Рисунок 3.11 – Зависимость фазных токов на ЛЛ ТП-5 от времени года

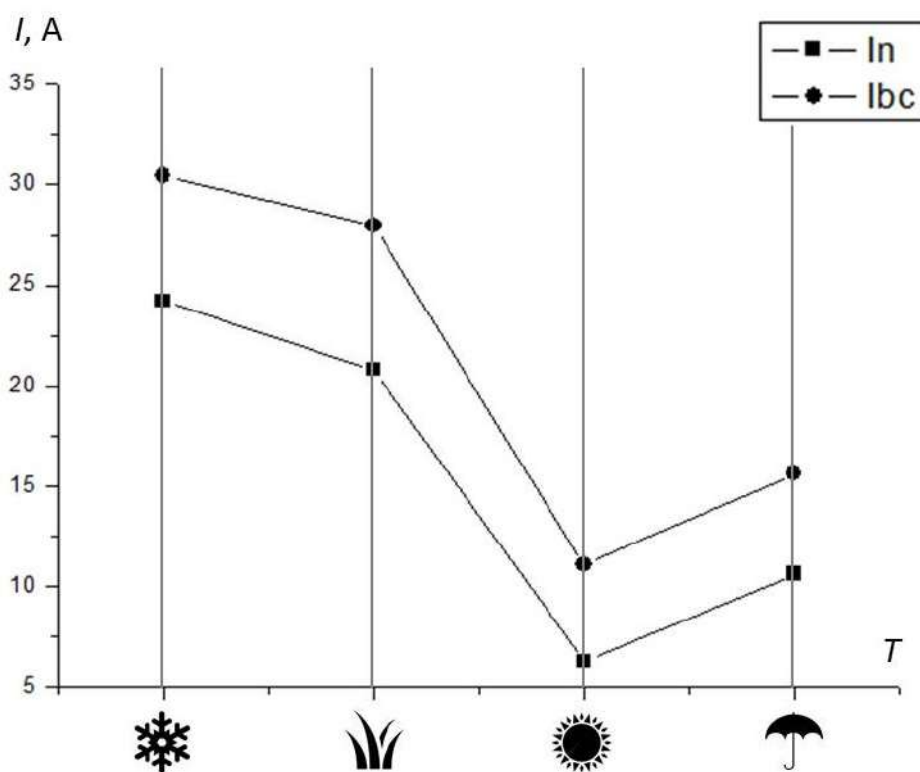


Рисунок 3.12 – Зависимость межфазных токов на ЛЛ ТП-5 от времени года

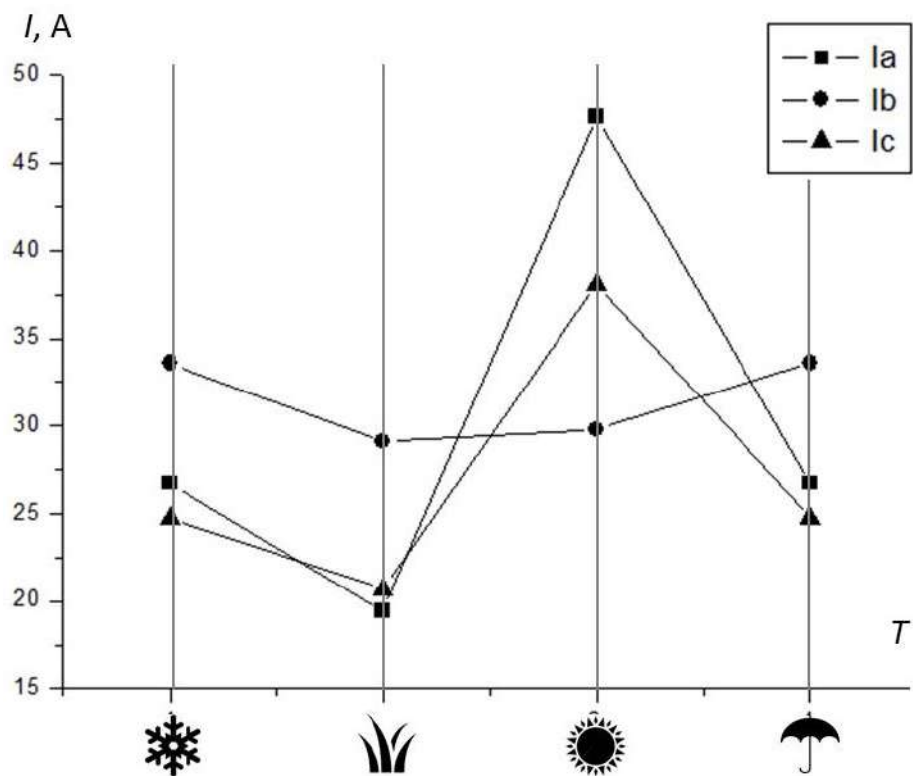


Рисунок 3.13 – Зависимость фазных токов на Л2 ТП-5 от времени года

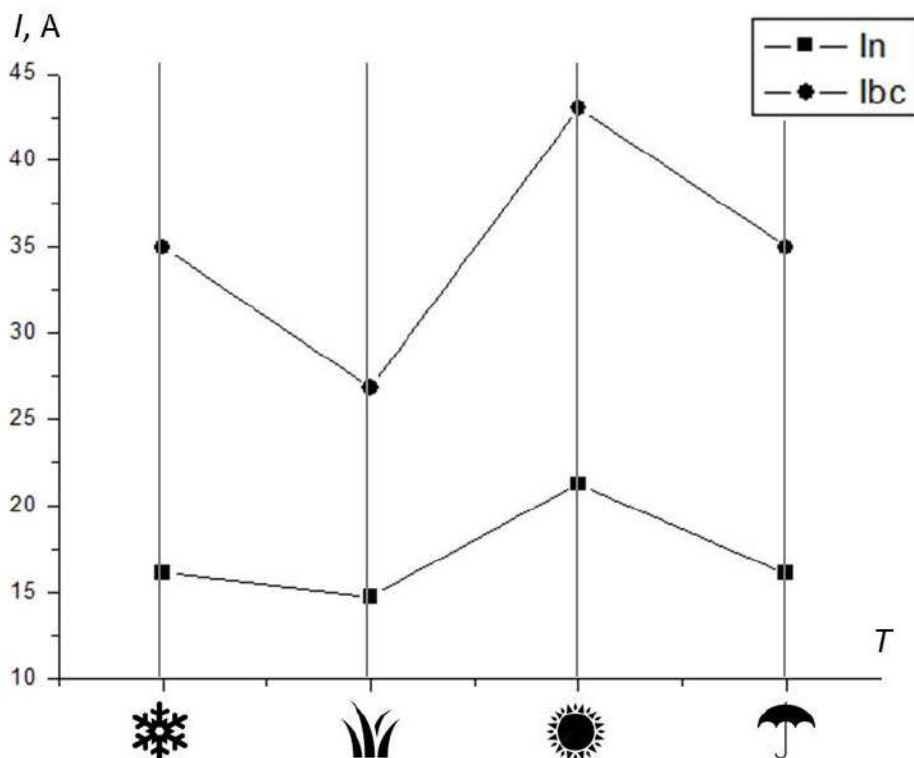


Рисунок 3.14 – Зависимость межфазных токов на Л2 ТП-5 от времени года

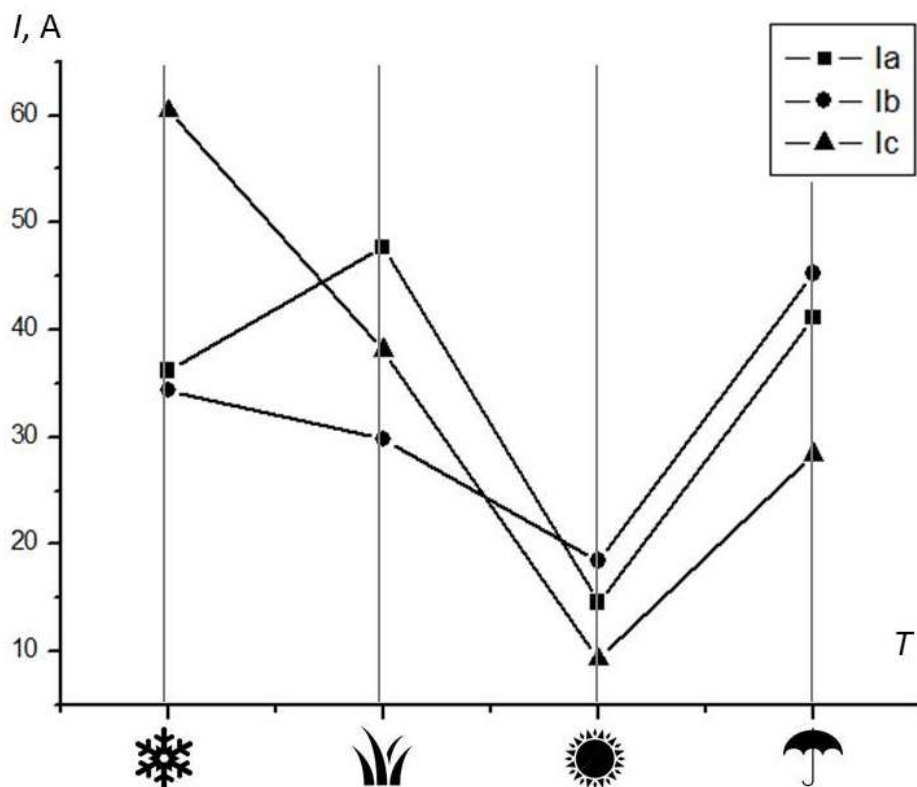


Рисунок 3.15 – Зависимость фазных токов на ЛЗ ТП-5 от времени года

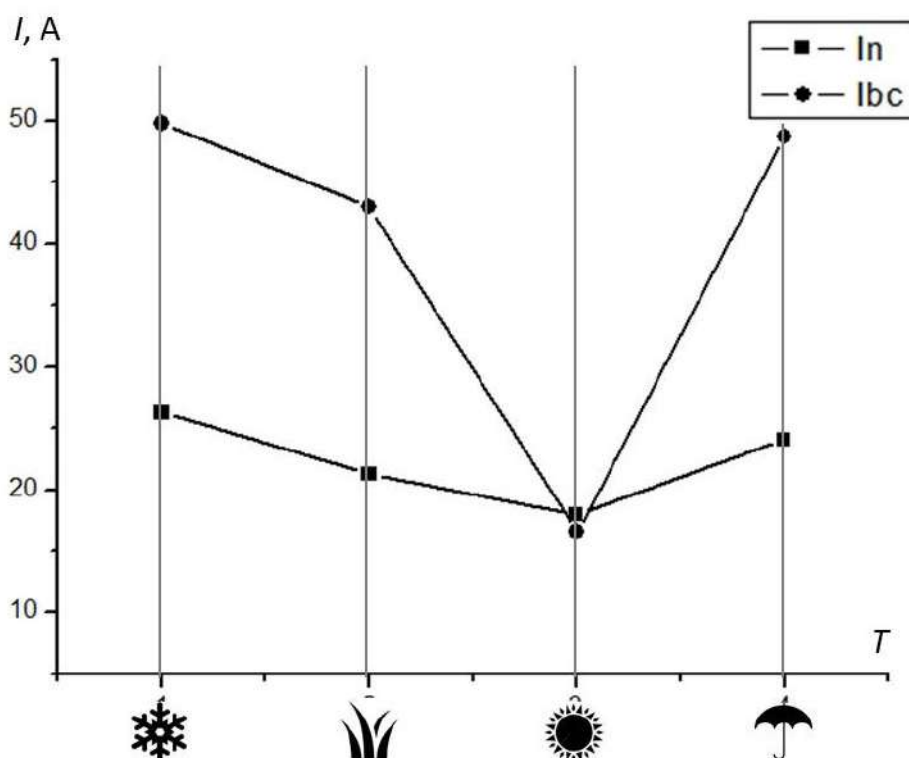


Рисунок 3.16 – Зависимость межфазных токов на ЛЗ ТП-5 от времени года

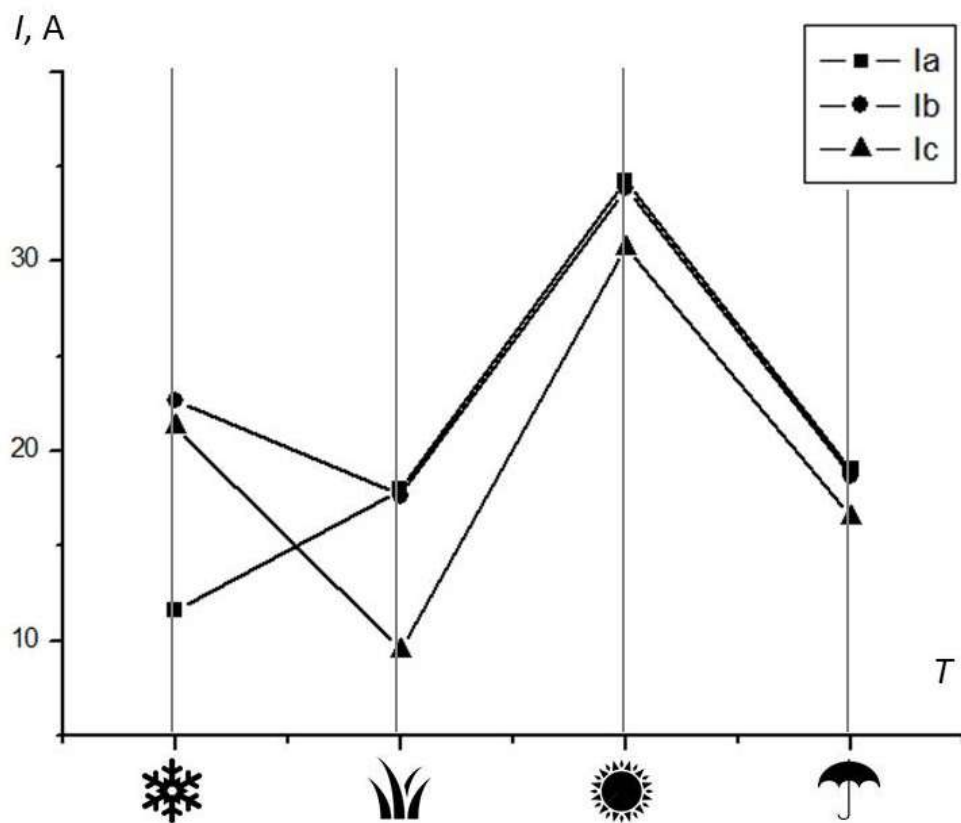


Рисунок 3.17 – Зависимость фазных токов на Л4 ТП-5 от времени года

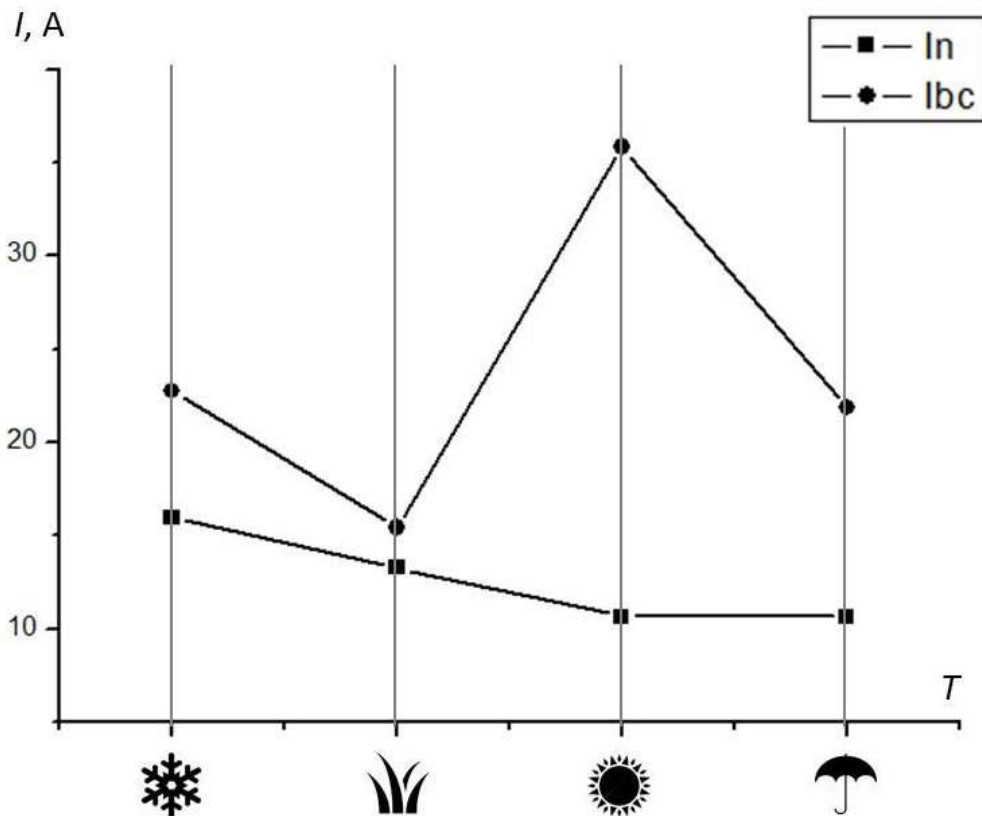


Рисунок 3.18 – Зависимость межфазных токов на Л4 ТП-5 от времени года

Коэффициенты обратной и нулевой последовательностей токов, коэффициентов обратной и нулевой последовательностей напряжений, а также коэффициент увеличения потерь мощности (табл. 3.4, рис. 3.19-3.30) рассчитывались в соответствии с алгоритмом рассмотренным в разделе 2. Вычисление коэффициентов обратной и нулевой последовательностей токов было произведено на основе значений симметричных составляющих токов. Коэффициенты обратной и нулевой последовательностей напряжений рассчитывались на основе значений симметричных составляющих напряжений (результаты промежуточных вычислений в таблице 3.4 не приведены).

Таблица 3.4 – Результаты вычислений коэффициенты обратной и нулевой последовательностей токов, а также напряжений и коэффициента увеличения потерь мощности линий ТП-5

	Линия	K_{2I}	K_{0I}	K_P	K_{2U}	K_{0U}
Зима	<i>Л1</i>	0,475	0,453	2,426	0,093	0,108
	<i>Л2</i>	0,386	0,234	1,423	0,098	0,108
	<i>Л3</i>	0,475	0,245	1,542	0,092	0,109
	<i>Л4</i>	0,638	0,297	1,878	0,096	0,115
Весна	<i>Л1</i>	0,467	0,495	2,42	0,034	0,035
	<i>Л2</i>	0,498	0,208	1,618	0,034	0,035
	<i>Л3</i>	0,301	0,294	1,314	0,02	0,029
	<i>Л4</i>	0,344	0,437	1,529	0,018	0,026
Лето	<i>Л1</i>	0,416	0,23	1,427	0,019	0,024
	<i>Л2</i>	0,404	0,53	1,44	0,018	0,023
	<i>Л3</i>	0,718	0,13	3,255	0,02	0,026
	<i>Л4</i>	0,266	0,24	1,124	0,019	0,025
Осень	<i>Л1</i>	0,598	0,344	1,946	0,012	0,016
	<i>Л2</i>	0,32	0,232	1,355	0,013	0,018
	<i>Л3</i>	0,305	0,218	1,355	0,013	0,02
	<i>Л4</i>	0,34	0,292	1,377	0,019	0,026

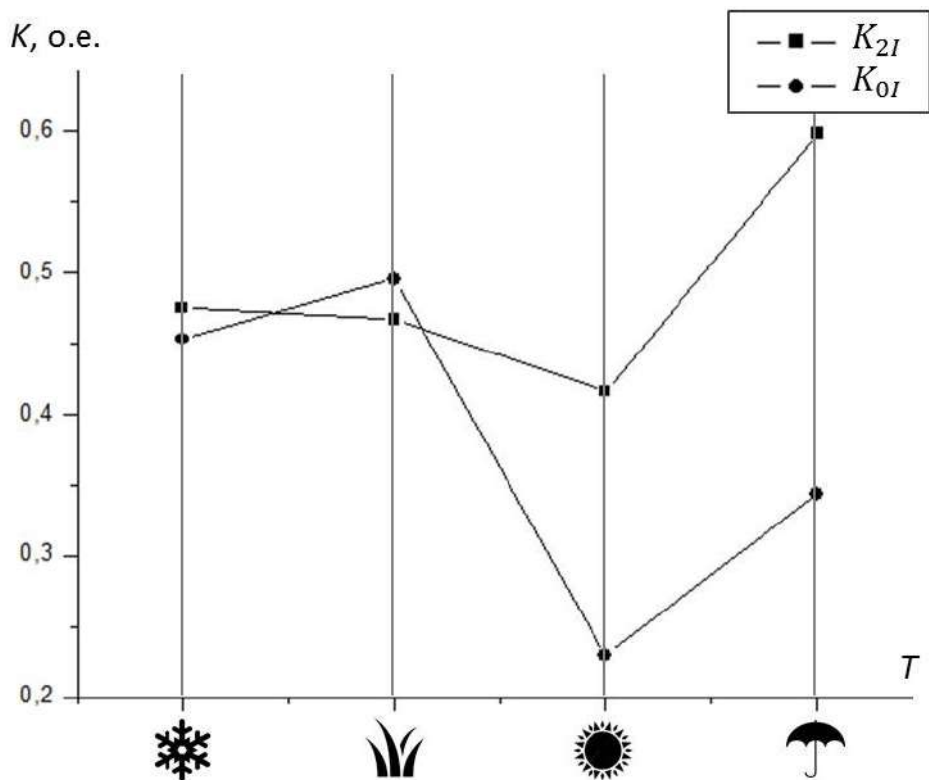


Рисунок 3.19 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей токов на Л1 ТП-5 от времени года

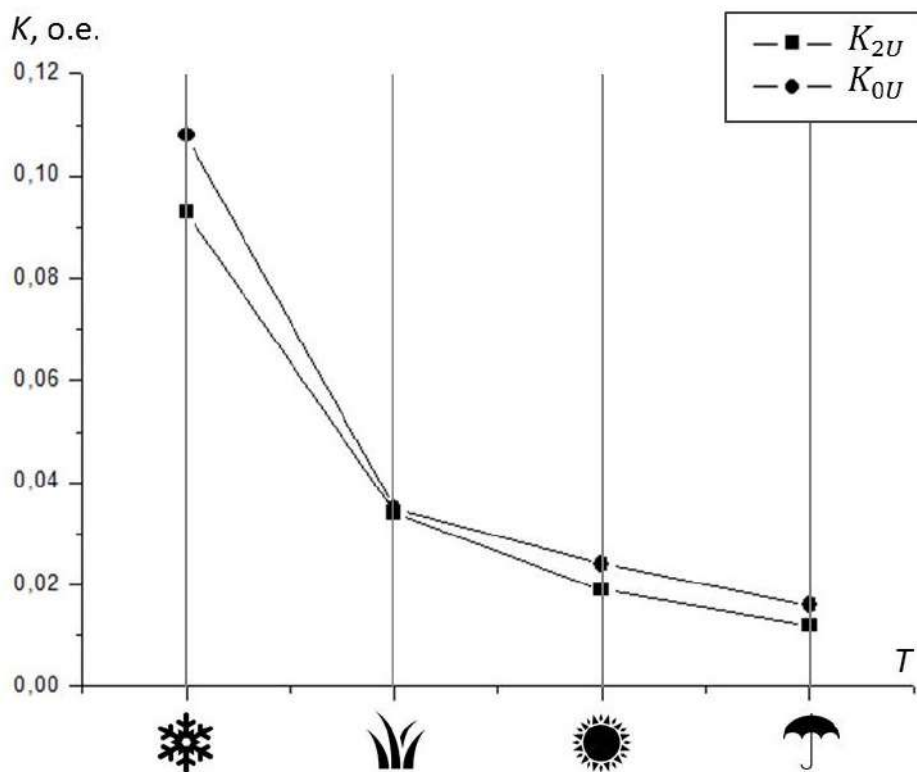


Рисунок 3.20 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей напряжений на Л1 ТП-5 от времени года

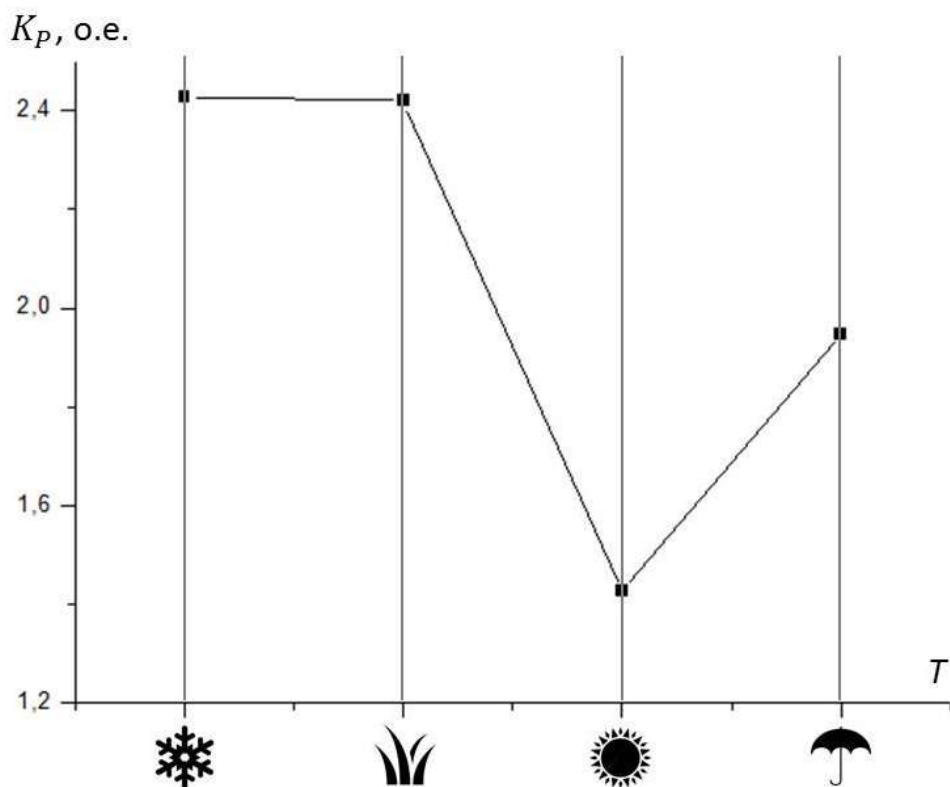


Рисунок 3.21 – Зависимость коэффициент дополнительных потерь на Л1 ТП-5 от времени года

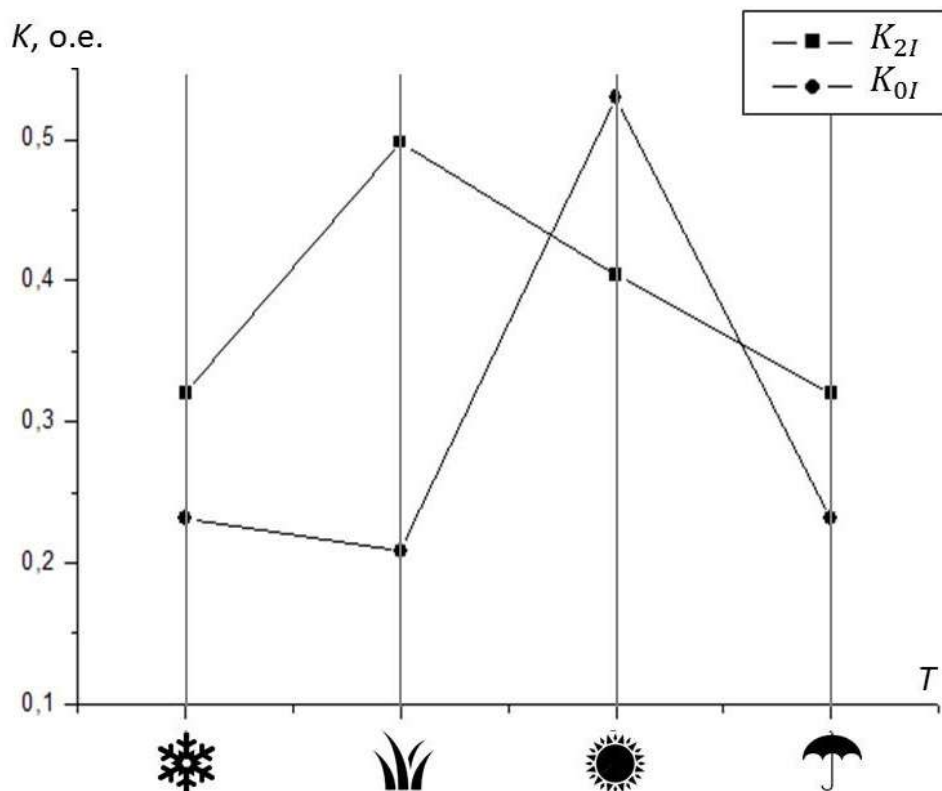


Рисунок 3.22 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей токов на Л2 ТП-5 от времени года

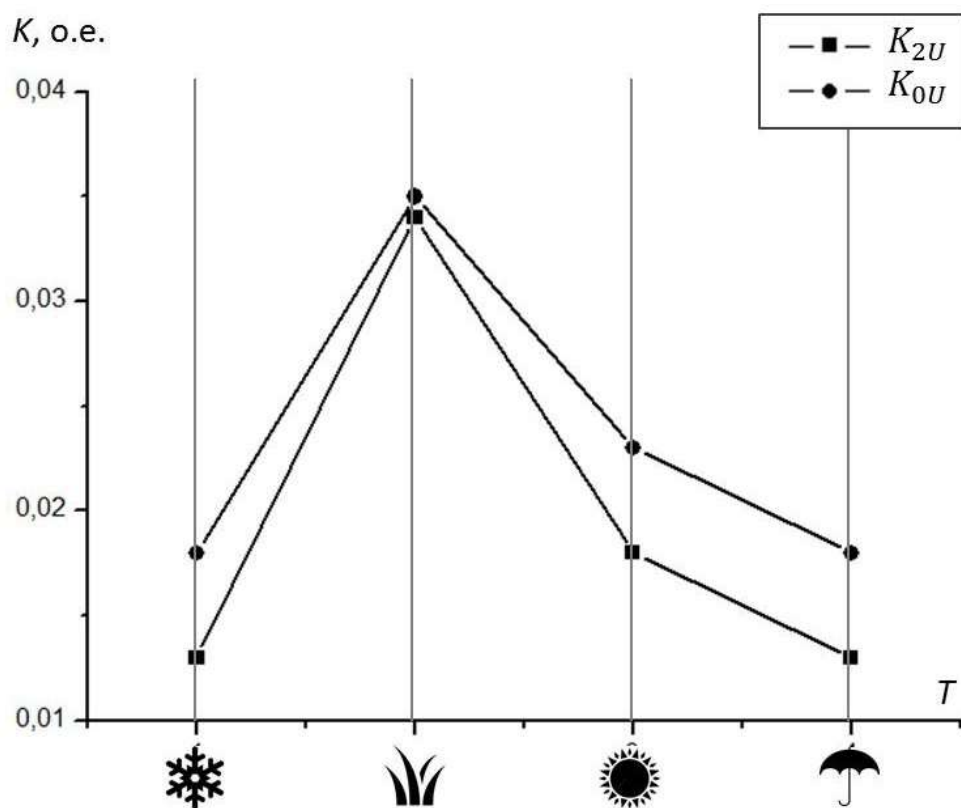


Рис. 3.23 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей напряжений на Л2 ТП-5 от времени года

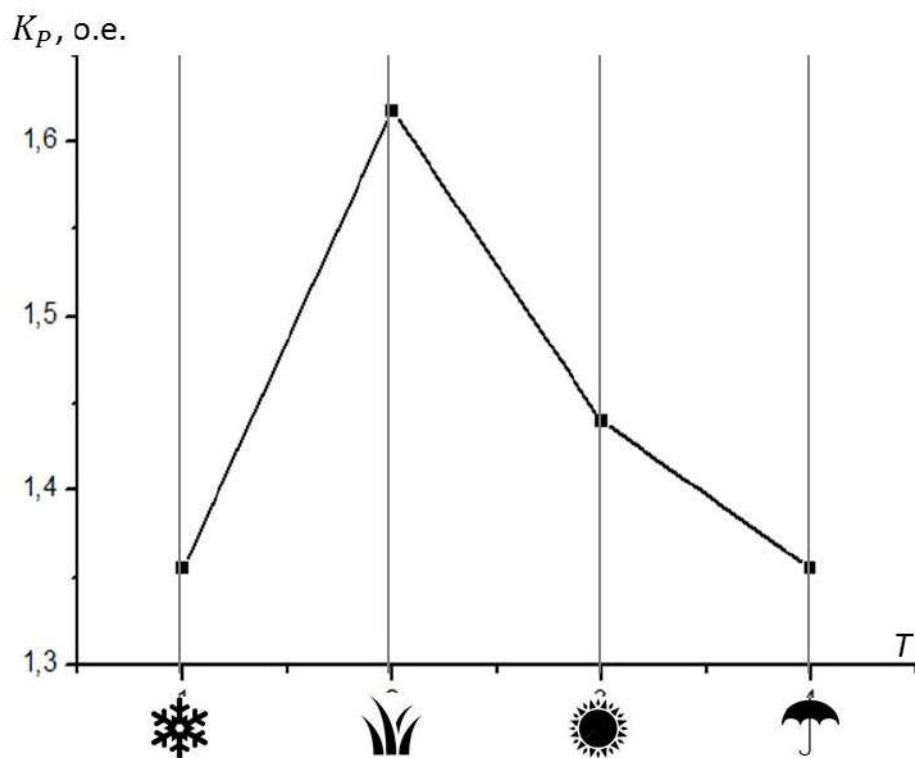


Рисунок 3.24 – Зависимость коэффициент дополнительных потерь на Л2 ТП-5 от времени года

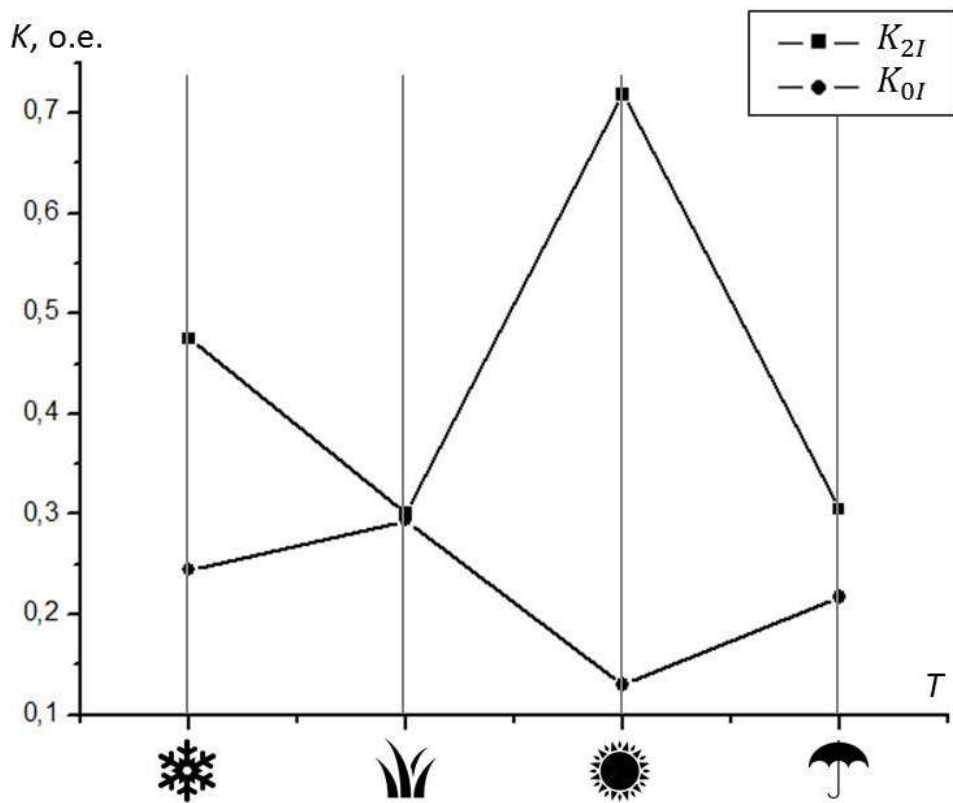


Рисунок 3.25 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей токов на ЛЗ ТП-5 от времени года

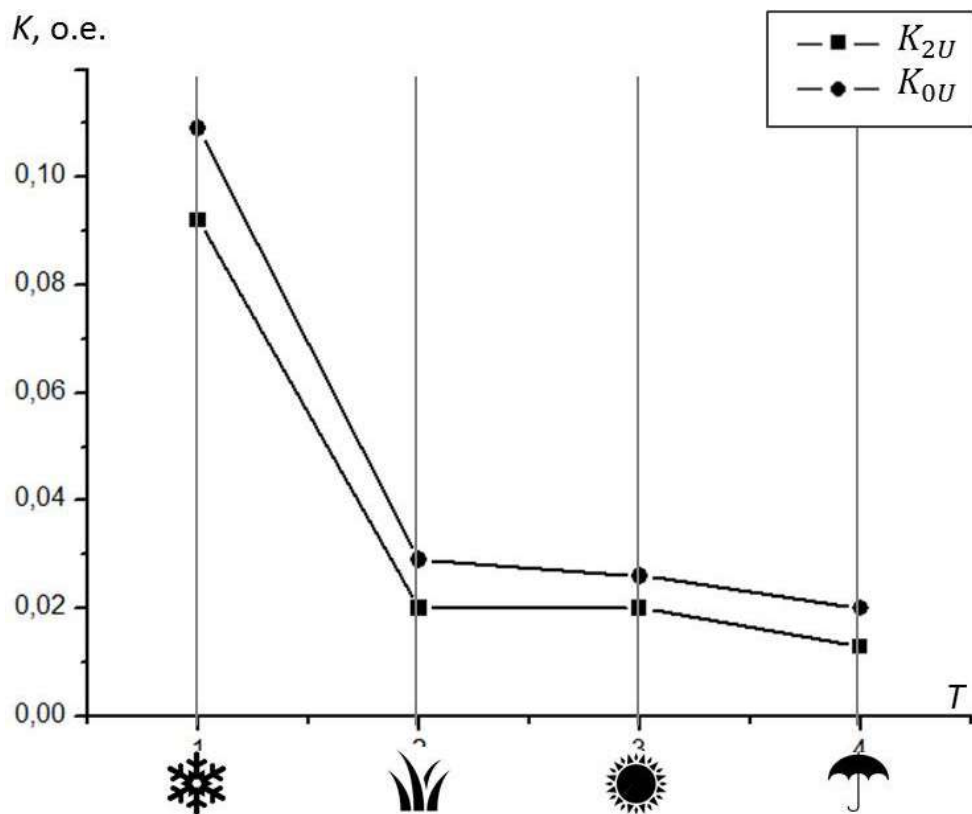


Рисунок 3.26 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей напряжений на ЛЗ ТП-5 от времени года

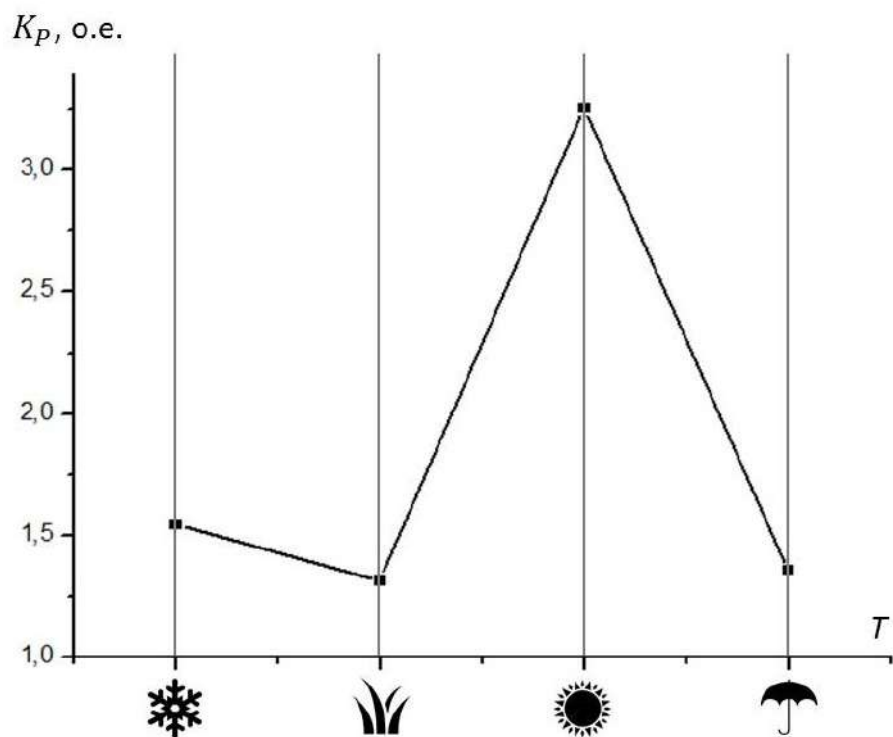


Рисунок 3.27 – Зависимость коэффициент дополнительных потерь на ЛЗ ТП-5 от времени года

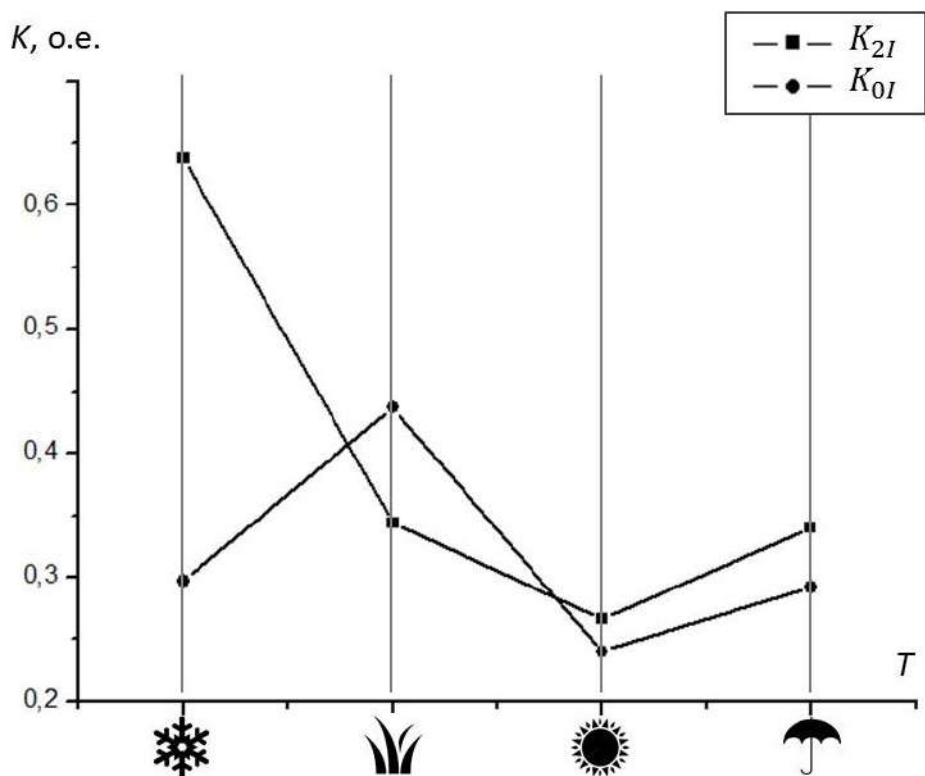


Рисунок 3.28 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей токов на Л4 ТП-5 от времени года

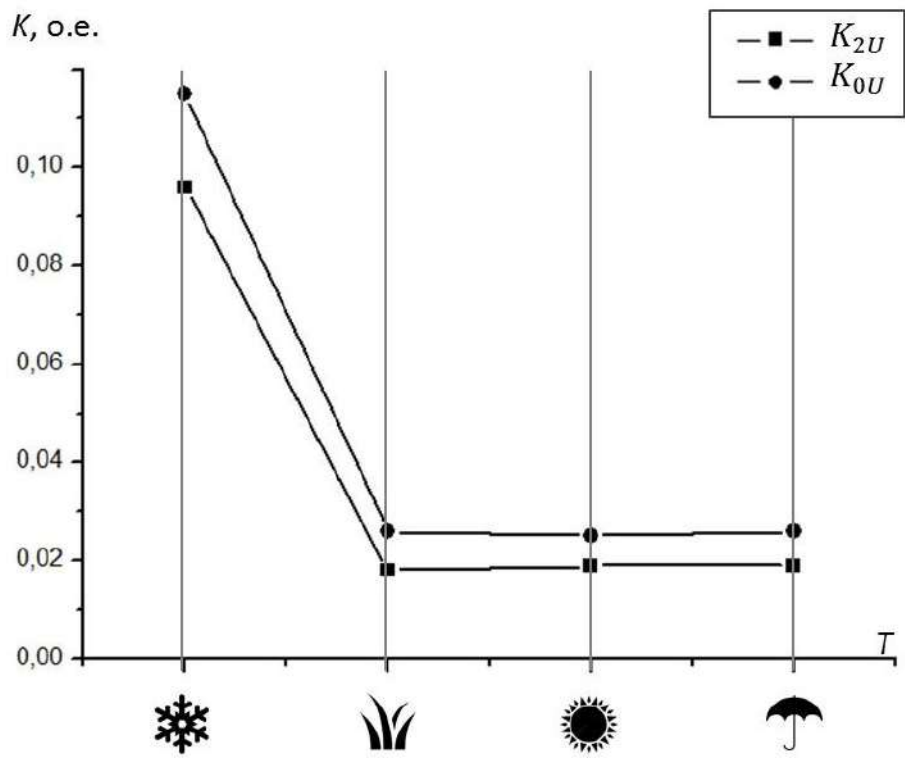


Рисунок 3.29 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей напряжений на Л4 ТП-5 от времени года

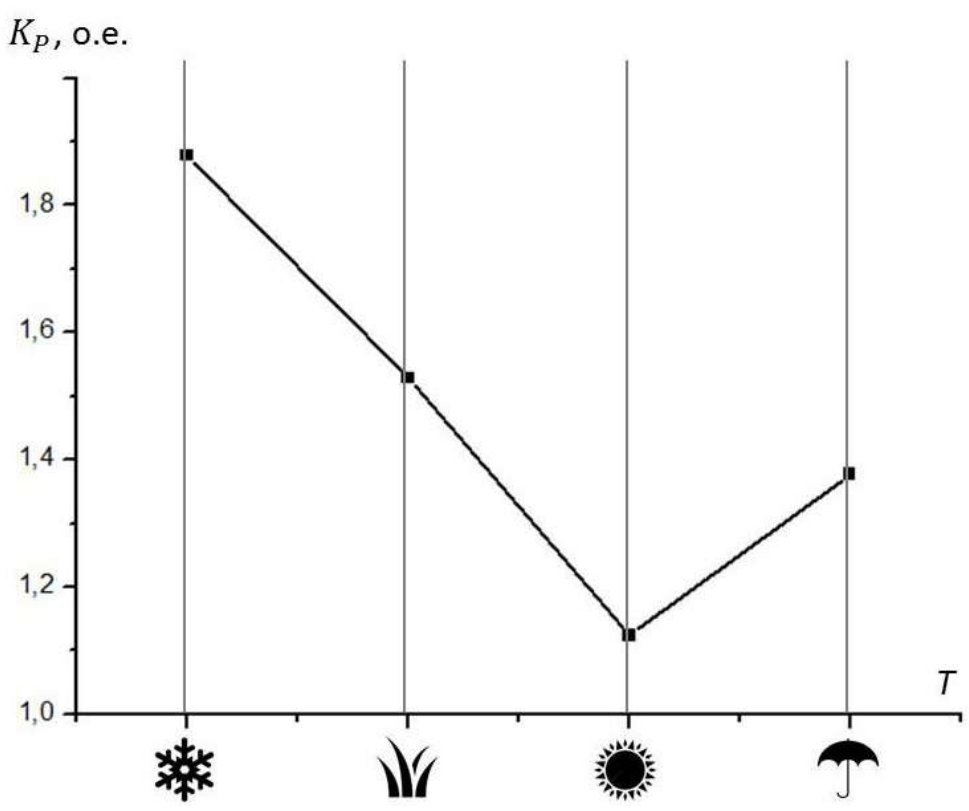


Рисунок 3.30 – Зависимость коэффициент дополнительных потерь на Л4 ТП-5 от времени года

Графики показывают, что уровень несимметрии напряжений достигает значительной величины, что приводит к возникновению коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям, которые для линии Л1 превышают требования ГОСТ 32144 -2013 [43]. Для Л2 ТП-5 общие потери электроэнергии составили 7,4 МВт·ч в зимний период; а с учетом среднего за период измерения значения коэффициента потерь (1,42) потери в несимметричном режиме составили дополнительные 5,2 МВт·ч. Таким образом, потеря электрической энергии, обусловленная только несимметрией фазных токов, составляет 2,2 МВт·ч. Для линии Л3 это значение составляет 6,3 МВт·ч, а для линии Л4 — 0,98 МВт·ч.

Результаты произведенных измерений фазных и междуфазных токов и напряжений на отходящих от подстанций ТП-9 ЛЭП представлены в таблицах 3.5 и 3.6, а также на рисунках 3.31 — 3.42.

Таблица 3.5 – Результаты произведенных измерений фазных и межфазных напряжений линии ТП-9

	Линия	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
Зима	<i>Л1</i>	227	227	217	394	393	383
	<i>Л2</i>	217	227	227	394	394	383
	<i>Л3</i>	217	227	227	393	393	383
Весна	<i>Л1</i>	233	239	219	404	390	401
	<i>Л2</i>	233	240	221	404	394	403
	<i>Л3</i>	233	240	222	404	394	402
Лето	<i>Л1</i>	225	229	219	392	389	381
	<i>Л2</i>	225	229	219	393	391	382
	<i>Л3</i>	225	229	219	392	389	381
Осень	<i>Л1</i>	227	224	219	388	376	390
	<i>Л2</i>	227	225	219	389	381	390
	<i>Л3</i>	227	224	220	389	381	390

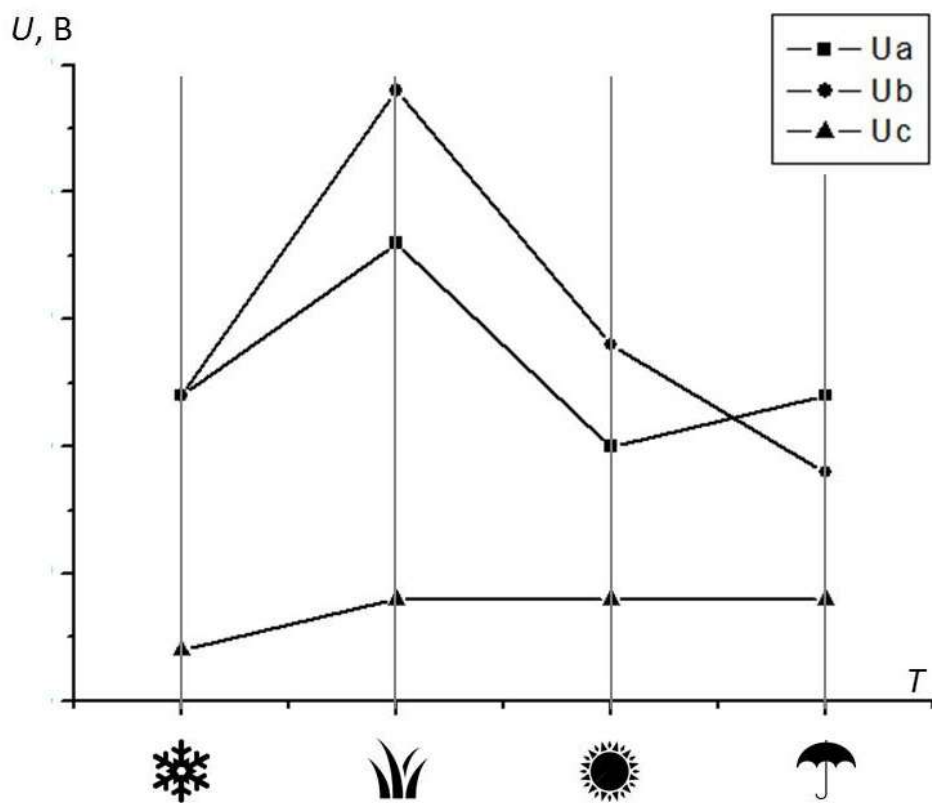


Рисунок 3.31 – Зависимость фазных напряжений на ЛЛ ТП-9 от времени года

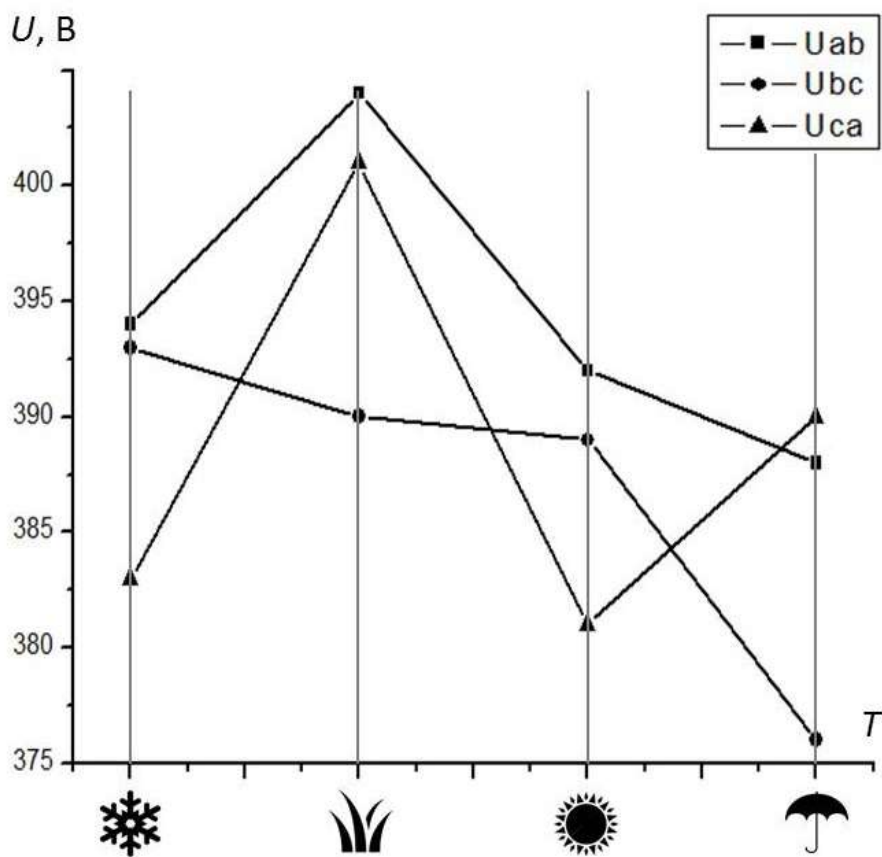


Рисунок 3.32 – Зависимость межфазных напряжений на ЛЛ ТП-9 от времени года

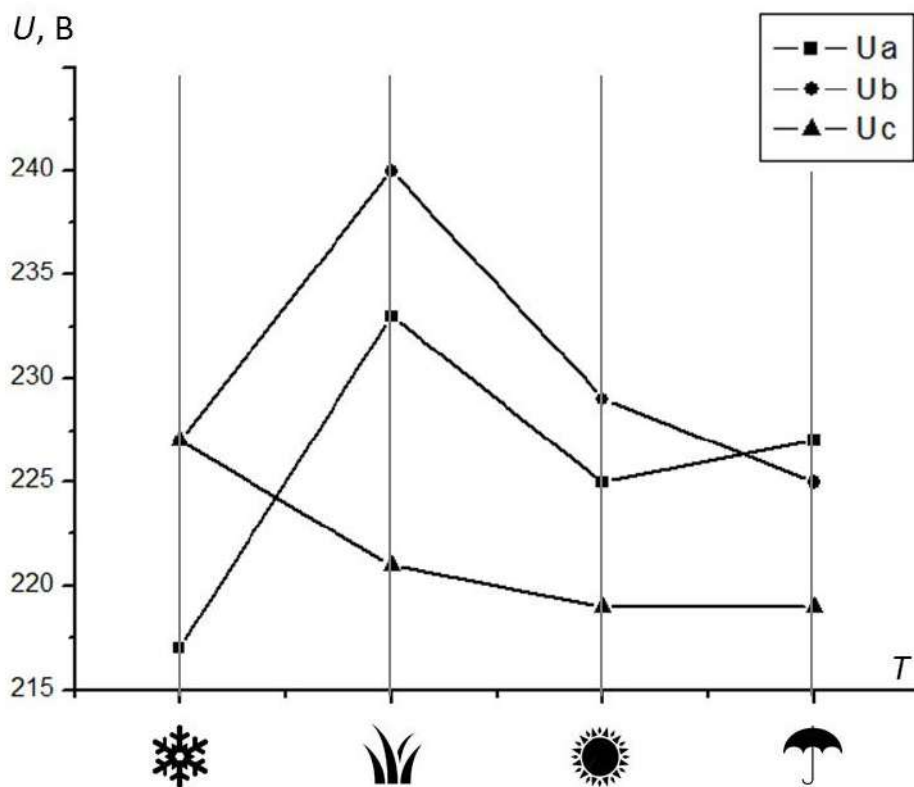


Рисунок 3.33 – Зависимость фазных напряжений на Л2 ТП-9 от времени года

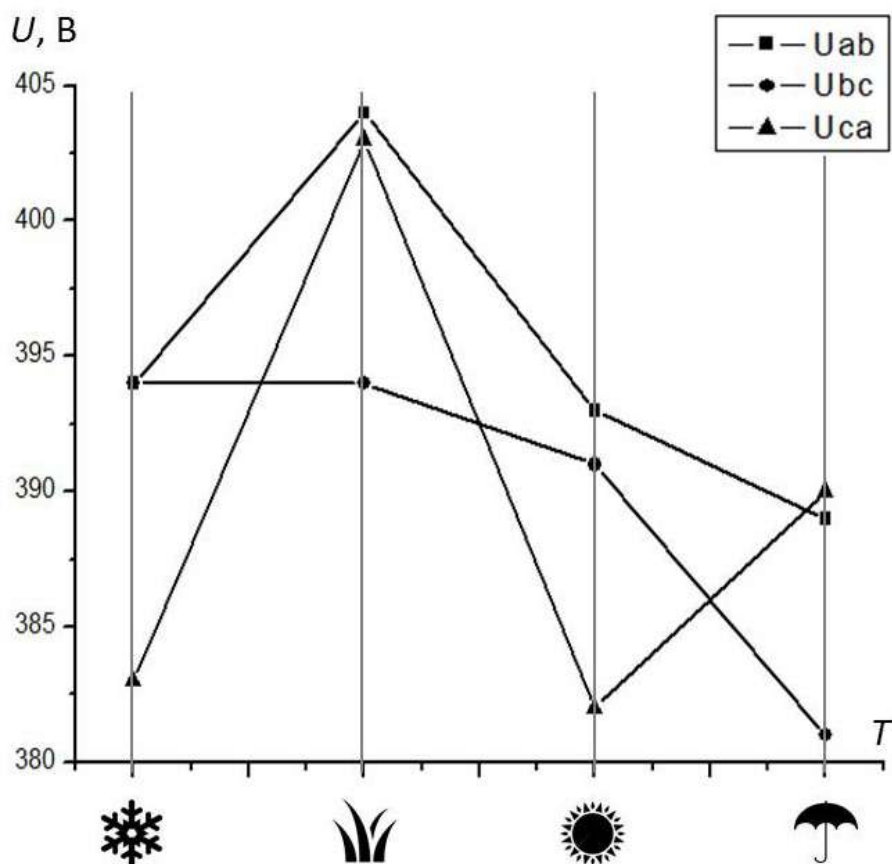


Рисунок 3.34 – Зависимость межфазных напряжений на Л2 ТП-9 от времени года

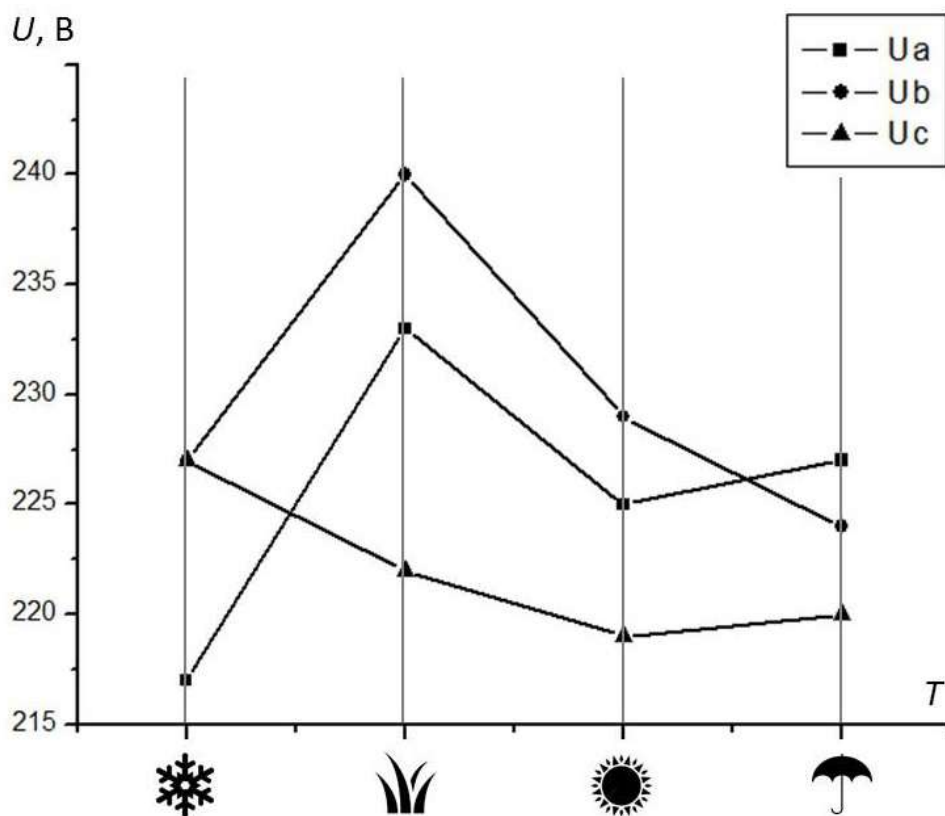


Рисунок 3.35 – Зависимость фазных напряжений на ЛЗ ТП-9 от времени года

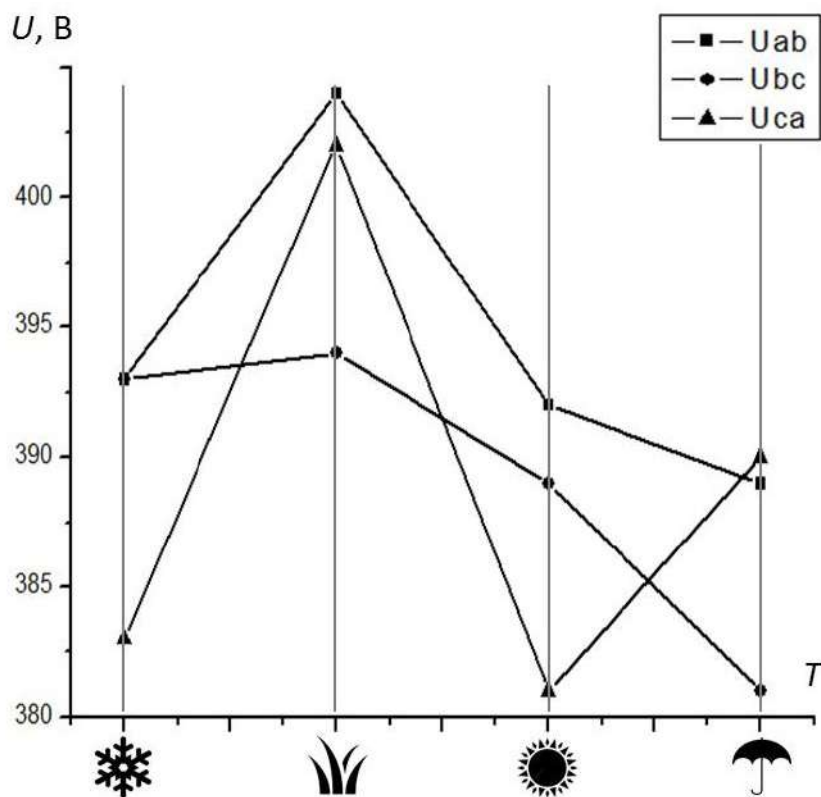


Рисунок 3.36 – Зависимость межфазных напряжений на ЛЗ ТП-9 от времени года

Таблица 3.6 – Результаты произведенных измерений фазных и межфазных токов линий ТП-9

	Линия	I_A	I_B	I_C	I_N	I_{BC}
Зима	Л1	59,06	28,56	69,85	36,99	64,78
	Л2	14,76	20,44	17,85	14,55	25,30
	Л3	44,29	13,26	9,68	32,12	14,04
Весна	Л1	95,82	27,92	67,64	66,19	64,31
	Л2	23,14	18,01	11,25	12,47	18,65
	Л3	10,78	13,29	55,63	43,56	55,12
Лето	Л1	68,15	24,51	44,45	31,87	43,14
	Л2	14,59	14,41	7,66	8,91	14,01
	Л3	67,68	24,48	44,12	31,56	42,78
Осень	Л1	101,01	33,71	59,25	54,17	60,06
	Л2	15,50	19,28	12,20	16,35	18,26
	Л3	4,58	20,69	42,89	26,33	38,34

Графики напряжений (рис. 3.31 – 3.36) показывают значительную несимметрию фазных напряжений для линии Л1 (нагрузка фазы «С» существенно меньше, чем нагрузка фаз «А» и «Б»), в то время, как линии Л2 и Л3 нагружены более равномерно и в данном случае можно ожидать меньшие коэффициенты несимметрии и соответственно меньшие энергопотери, чем случае ТП-5. Этот же вывод подтверждают графики фазных и межфазных токов линий Л1, Л2 и Л3 трансформаторной подстанции ТП-9 (рис. 3.37 – 3.42).

Симметрирование режима работы Л1 ТП-9 возможно за счет снижения систематической и вероятностной несимметрии фазных токов. Статистическая несимметрия токов, обусловлена неравномерным характером распределения однофазных нагрузок по фазам электросети, может быть уменьшена путем перераспределения однофазных нагрузок.

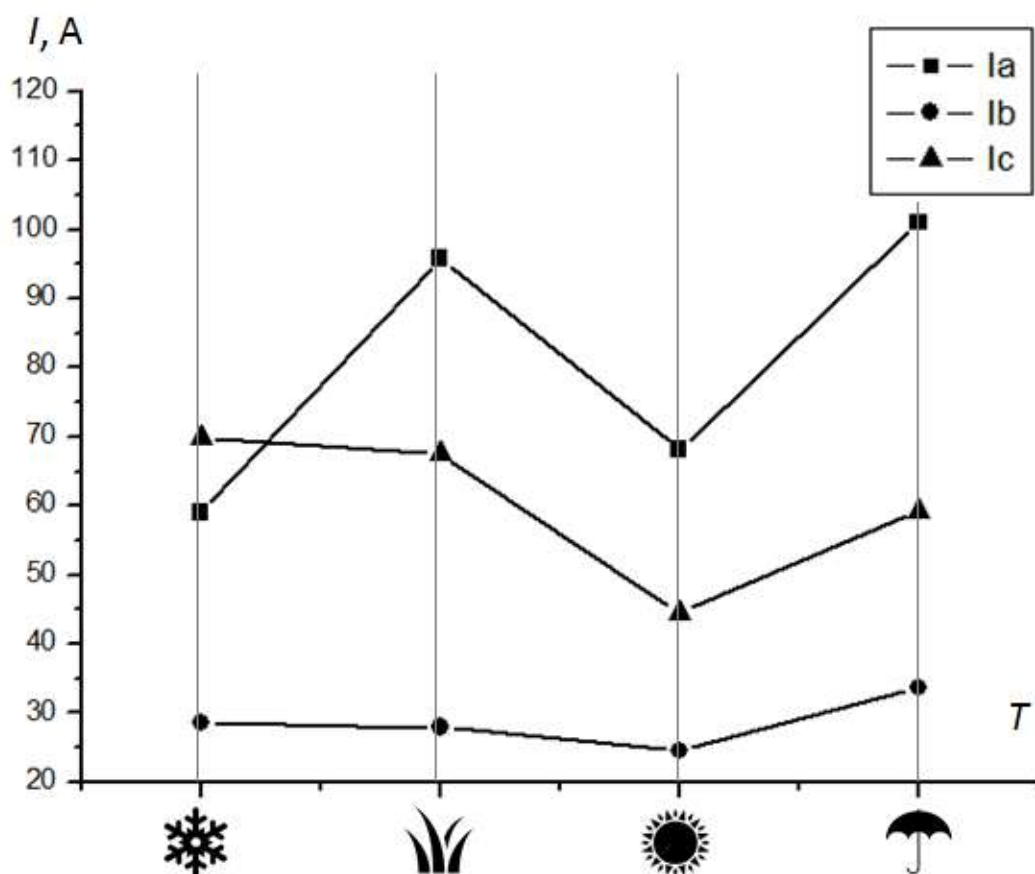


Рисунок 3.37 – Зависимость фазных токов на ЛЛ ТП-9 от времени года

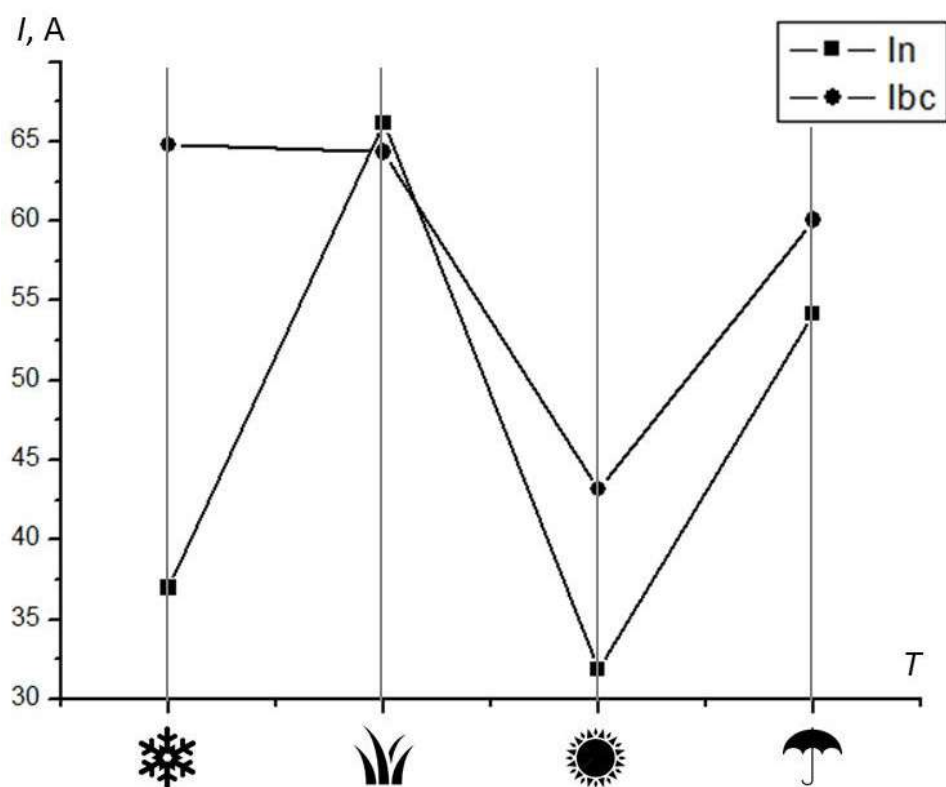


Рисунок 3.38 – Зависимость межфазных токов на ЛЛ ТП-9 от времени года

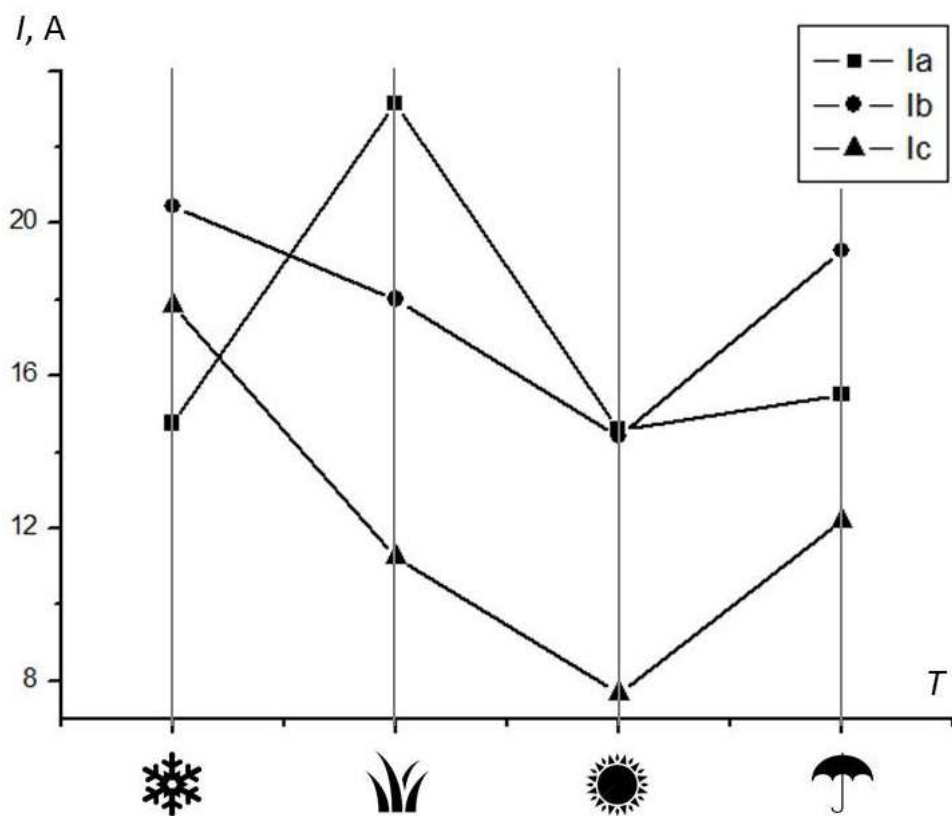


Рисунок 3.39 – Зависимость фазных токов на Л2 ТП-9 от времени года

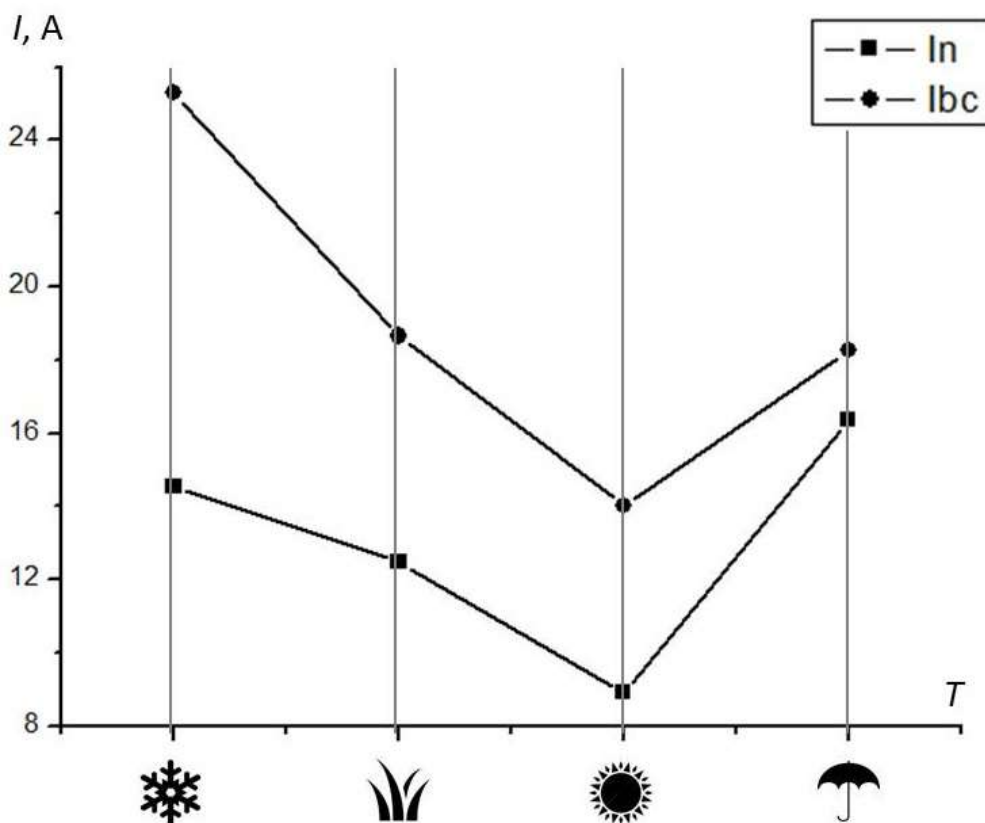


Рисунок 3.40 – Зависимость межфазных токов на Л2 ТП-9 от времени года

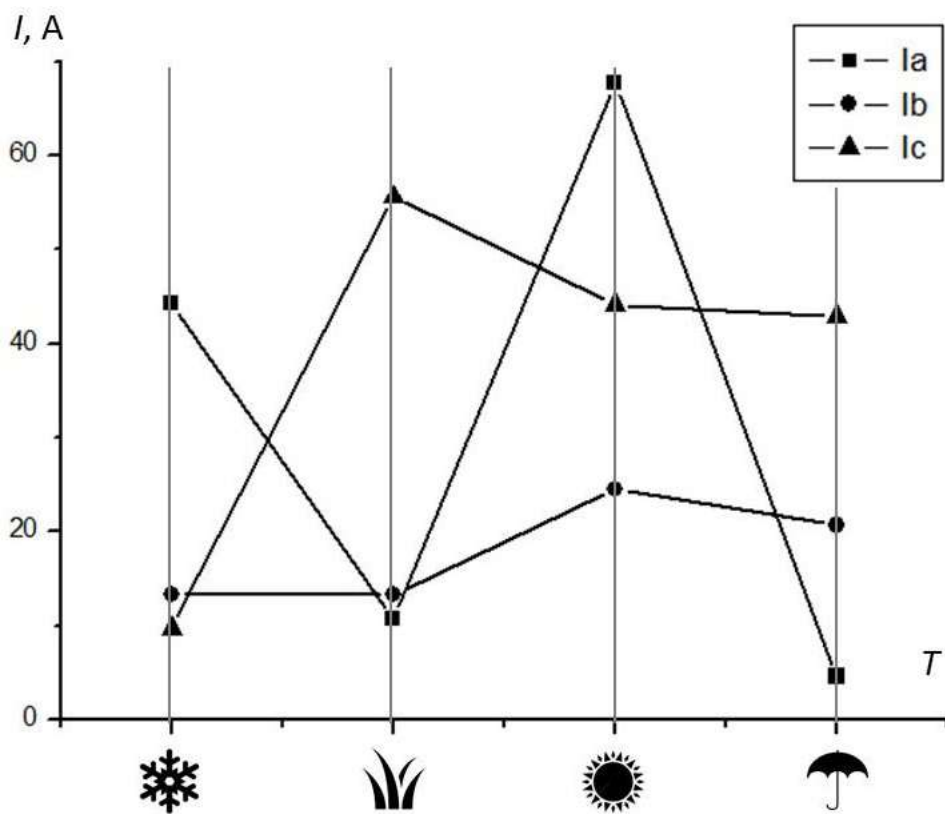


Рисунок 3.41 – Зависимость фазных токов на ЛЗ ТП-9 от времени года

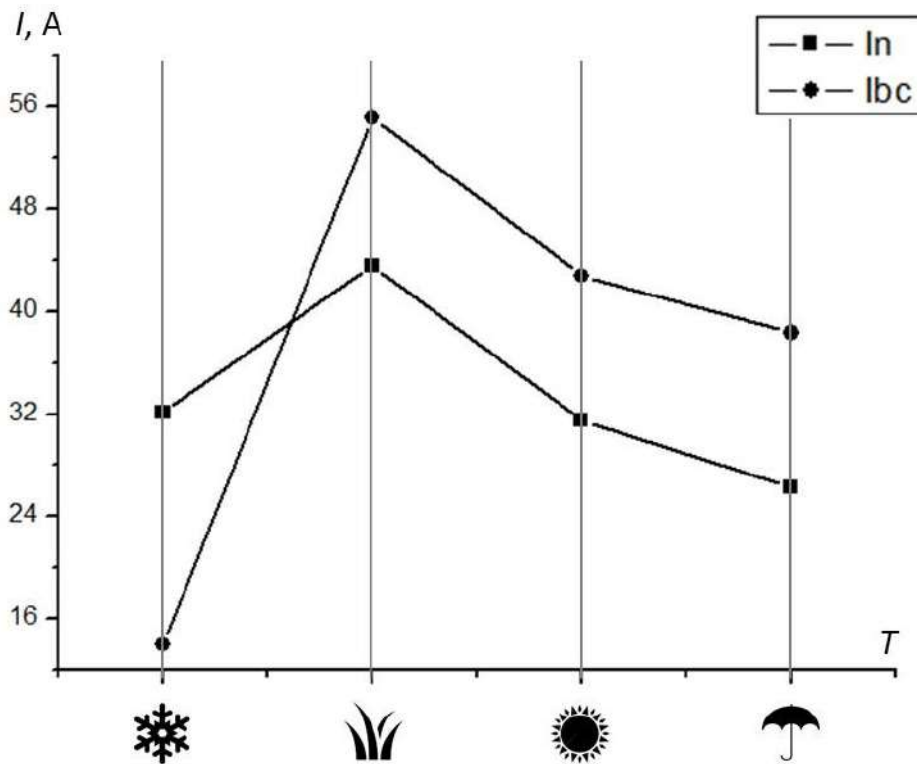


Рисунок 3.42 – Зависимость межфазных токов на ЛЗ ТП-9 от времени года

Таблица 3.7 – Результаты вычислений коэффициенты обратной и нулевой последовательностей токов, а также напряжений и коэффициента увеличения потерь мощности линий ТП-9

	Линия	K_{2I}	K_{0I}	K_P	K_{2U}	K_{0U}
Зима	Л1	0,473	0,273	1,534	0,026	0,022
	Л2	0,471	0,331	1,861	0,021	0,038
	Л3	0,747	0,445	2,695	0,019	0,037
Весна	Л1	0,702	0,437	2,317	0,029	0,056
	Л2	0,366	0,249	1,42	0,019	0,048
	Л3	0,626	0,549	3,032	0,021	0,048
Лето	Л1	0,518	0,24	1,518	0,021	0,019
	Л2	0,367	0,187	1,209	0,018	0,015
	Л3	0,518	0,24	1,518	0,021	0,019
Осень	Л1	0,595	0,292	1,724	0,012	0,02
	Л2	0,541	0,421	2,22	0,014	0,023
	Л3	0,871	0,495	2,866	0,017	0,026

Вычисление коэффициентов обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений, а также коэффициента увеличения потерь мощности показывает (табл. 3.7, рис. 3.43 — 3.51), что для линий Л1 и Л3 наиболее критичными в плане потерь был весенний сезон, а для Л2 — осенний. Также, если рассматривать суммарные потери, связанные с несимметрией токов и напряжений, то весенний сезон следует рассматривать как наиболее энергозатратный.

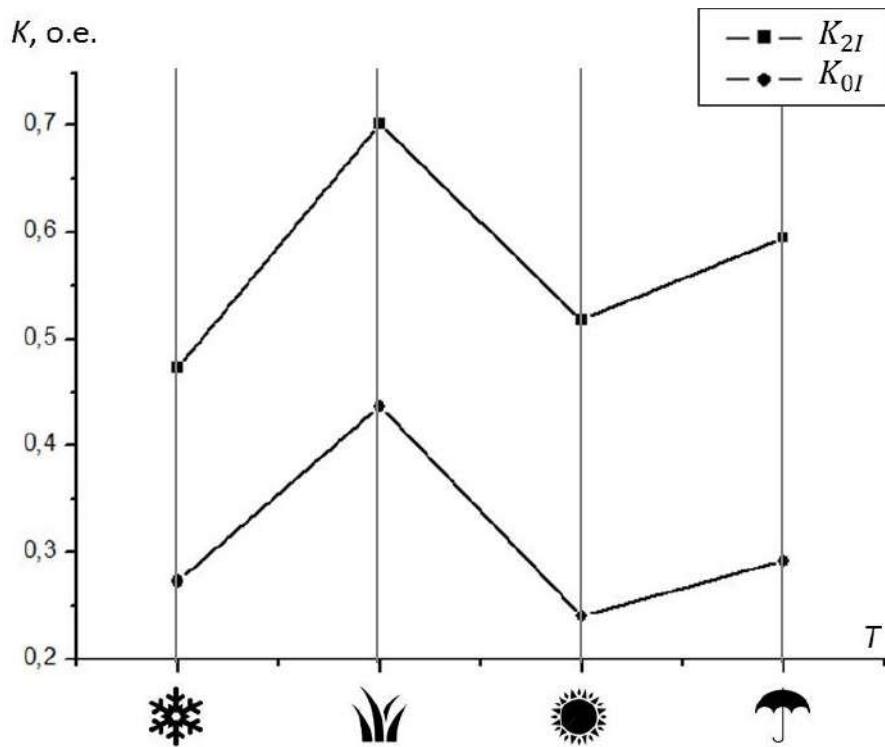


Рисунок 3.43 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей токов на ЛЛ ТП-9 от времени года

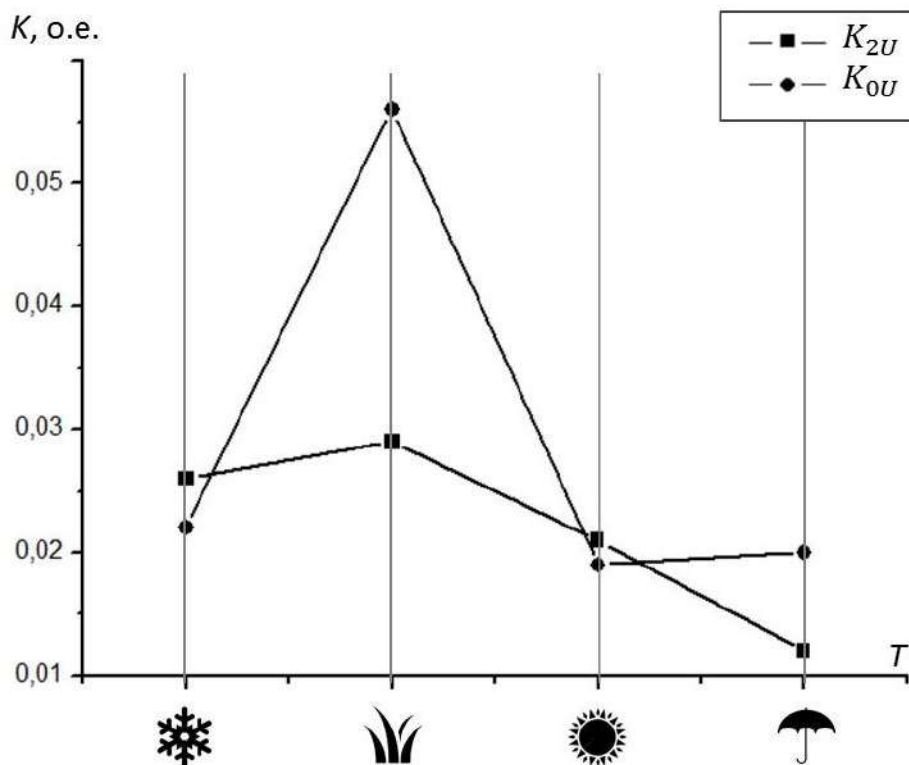


Рисунок 3.44 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей напряжений на ЛЛ ТП-9 от времени года

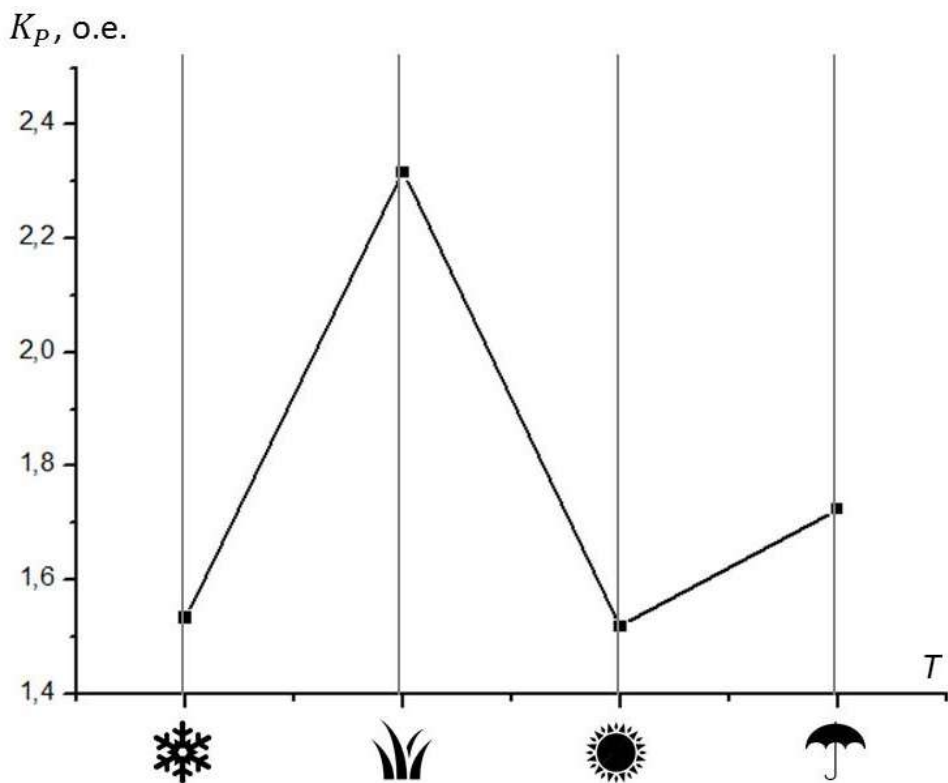


Рисунок 3.45 – Зависимость коэффициента дополнительных потерь на Л1 ТП-9 от времени года

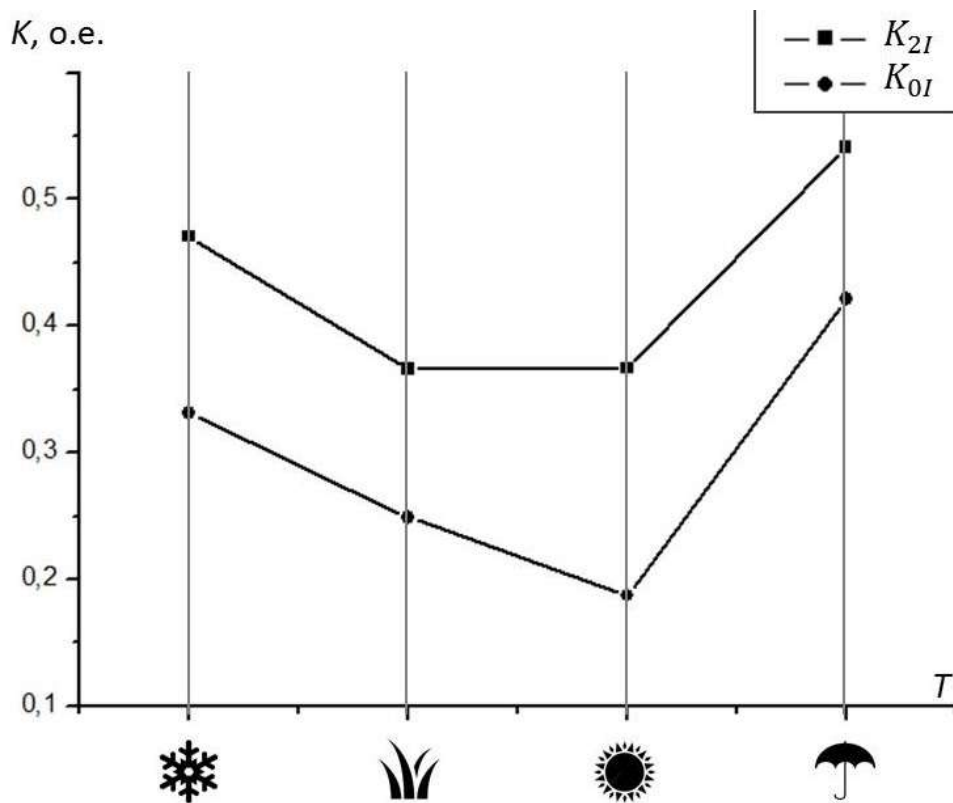


Рисунок 3.46 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей токов на Л2 ТП-9 от времени года

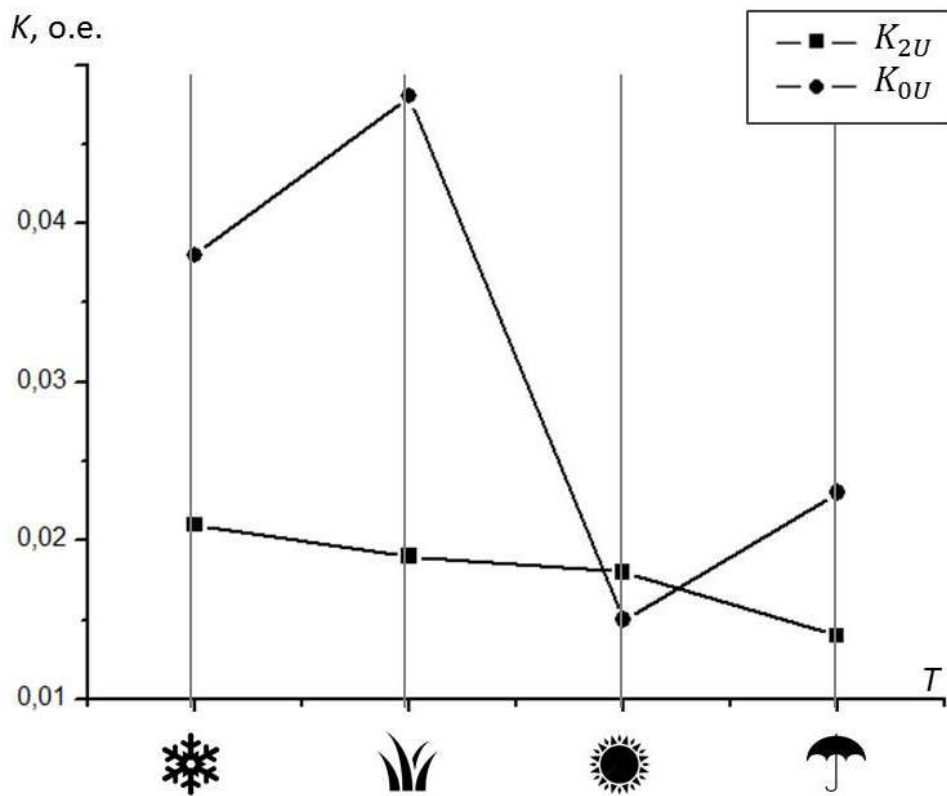


Рисунок 3.47 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей напряжений на Л2 ТП-9 от времени года

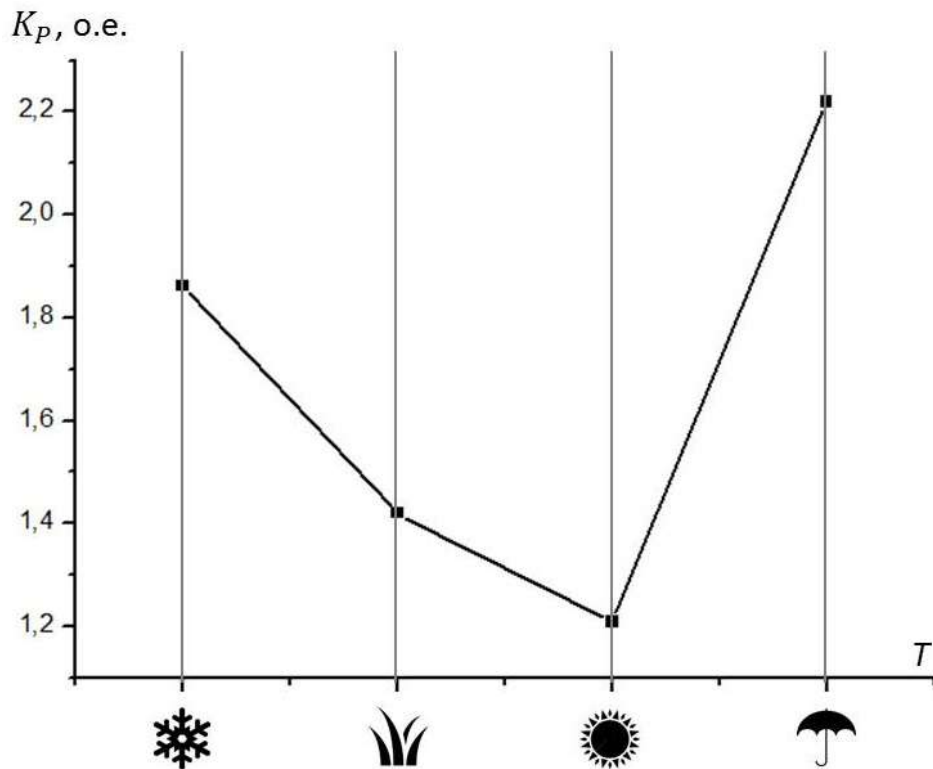


Рисунок 3.48 – Зависимость коэффициента дополнительных потерь на Л2 ТП-9 от времени года

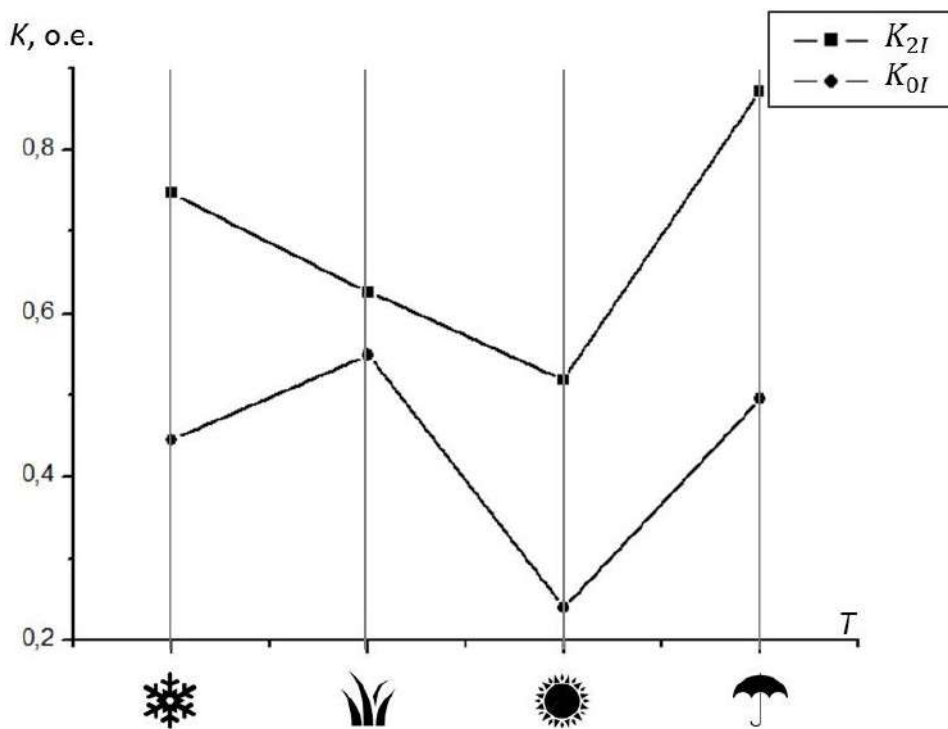


Рисунок 3.49 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей токов на ЛЗ ТП-9 от времени года

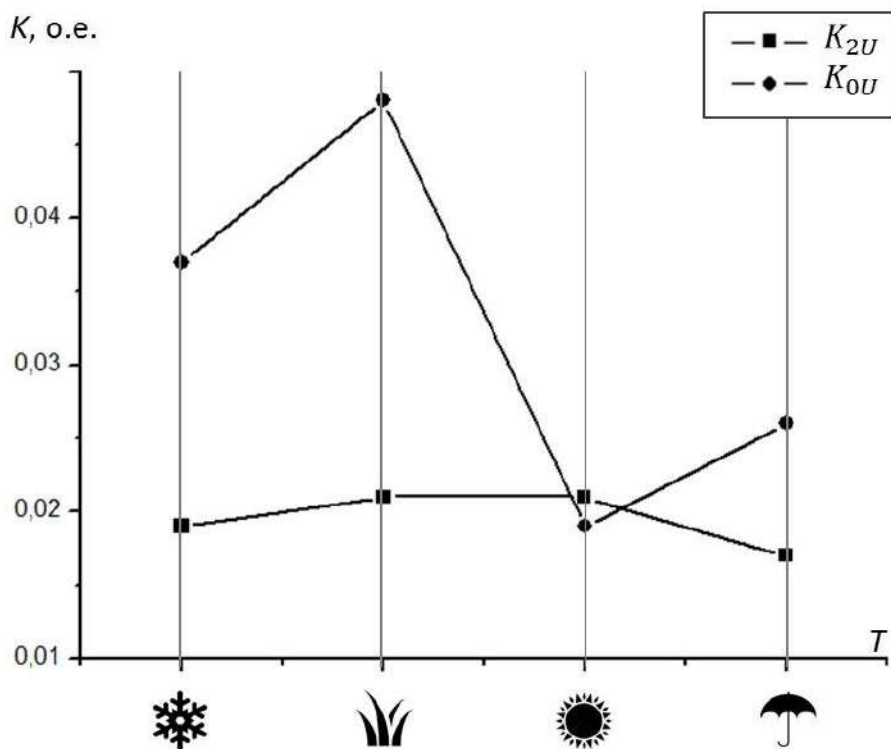


Рисунок 3.50 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей напряжений на ЛЗ ТП-9 от времени года

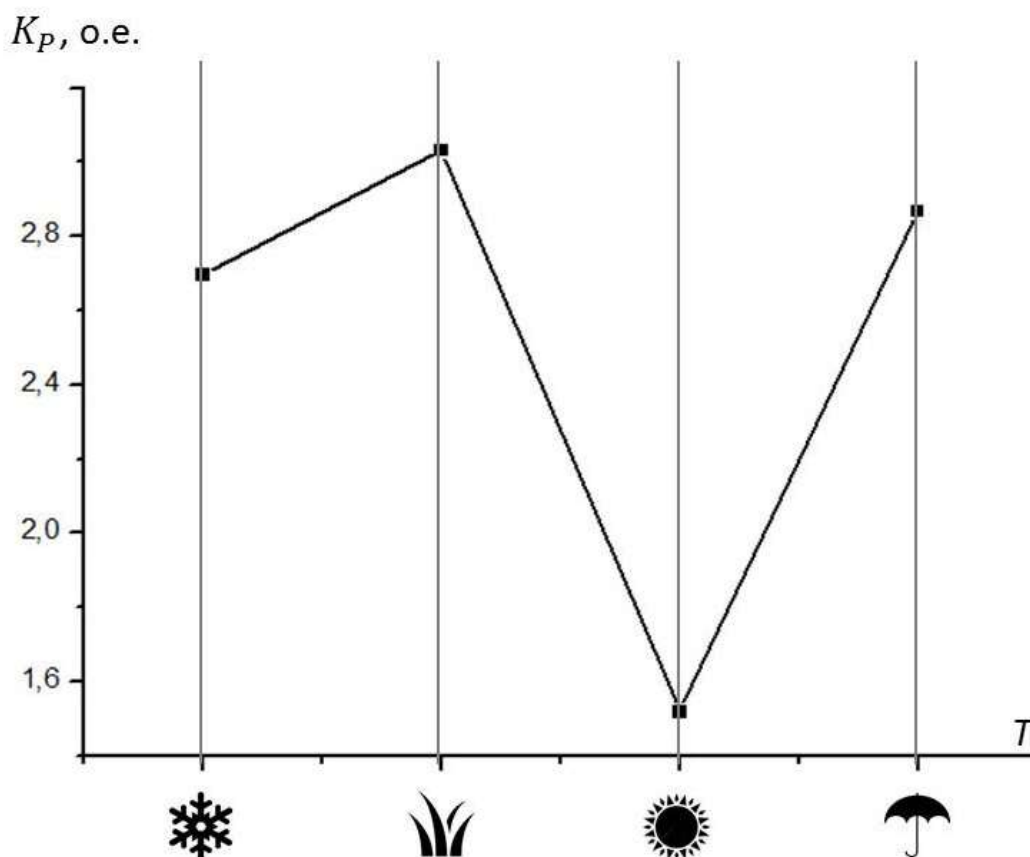


Рисунок 3.51 – Зависимость коэффициента дополнительных потерь на ЛЗ ТП-9 от времени года

Обобщая результаты вычислений можно указать на следующие потери, связанные с несимметрией токов и напряжений, в линиях Л1, Л2 и Л3 подстанции ТП-9:

- зимний сезон: Л1 — 10,1 МВт·ч, Л2 — 2,1 МВт·ч, Л3 — 1,8 МВт·ч, а суммарный объем потерь составляет 14,1 МВт·ч;
- весенний сезон: Л1 — 26,2 МВт·ч, Л2 — 1,4 МВт·ч, Л3 — 2,9 МВт·ч, а суммарный объем потерь составляет 30,5 МВт·ч;
- летний сезон: Л1 — 7,8 МВт·ч, Л2 — 0,4 МВт·ч, Л3 — 2,9 МВт·ч, а суммарный объем потерь составляет 3,1 МВт·ч;
- осенний сезон: Л1 — 19,8 МВт·ч, Л2 — 0,4 МВт·ч, Л3 — 2 МВт·ч, а суммарный объем потерь составляет 22,2 МВт·ч.

Таким образом, как и было предположено по графикам фазных и межфазных токов и напряжений наиболее энергозатратным оказался весенний сезон, а линией, которая характеризуется наибольшими потерями, обусловленных несимметрией токов в трансформаторе — Л1.

Аналогичные измерения и вычисления были проведены для трансформаторной подстанции ТП-17 (табл. 3.8 – 3.10, рис. 3.52-3.65).

Таблица 3.8 – Результаты произведенных измерений фазных и межфазных напряжений линии ТП-17

	Линия	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
Зима	Л1	235	233	234	398	403	402
	Л2	236	232	233	397	403	401
Весна	Л1	234	233	234	401	402	402
	Л2	233	233	234	401	402	401
Лето	Л1	235	235	235	406	407	406
	Л2	235	235	234	406	407	406
Осень	Л1	227	224	225	390	390	391
	Л2	226	224	224	389	389	389

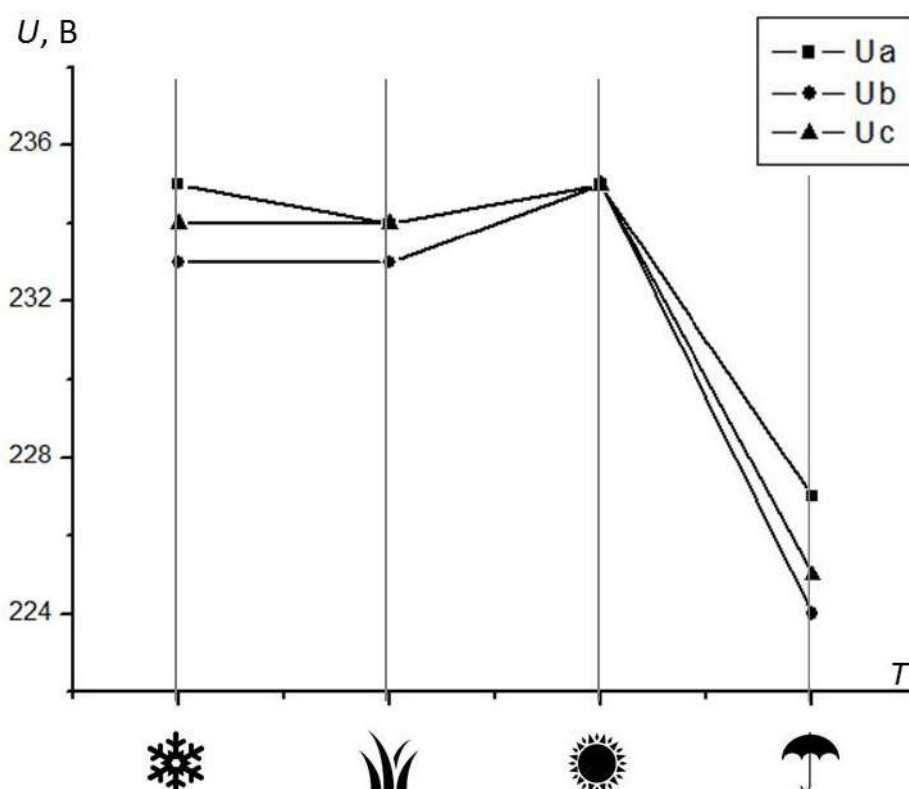


Рисунок 3.52 – Зависимость фазных напряжений на Л1 ТП-17 от времени года

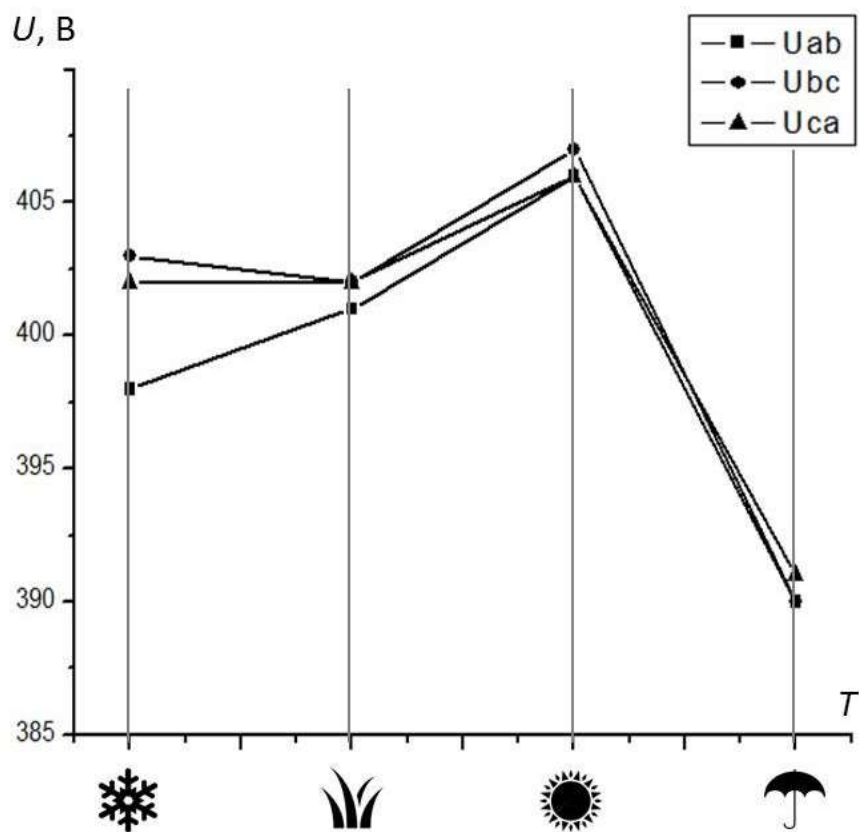


Рисунок 3.53 – Зависимость межфазных напряжений на Л1 ТП-17 от времени года

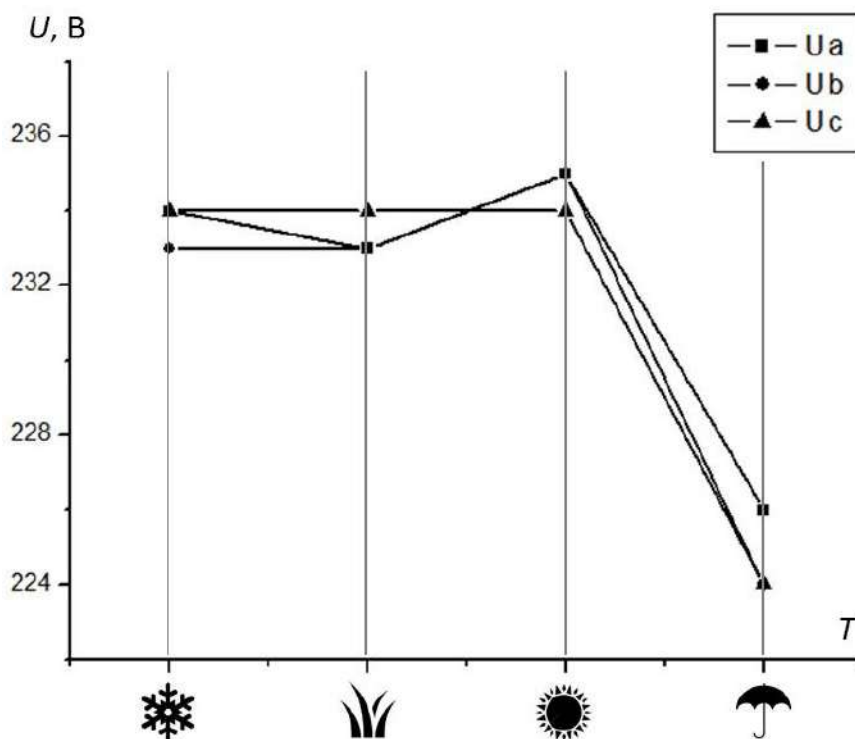


Рисунок 3.54 – Зависимость фазных напряжений на Л2 ТП-17 от времени года

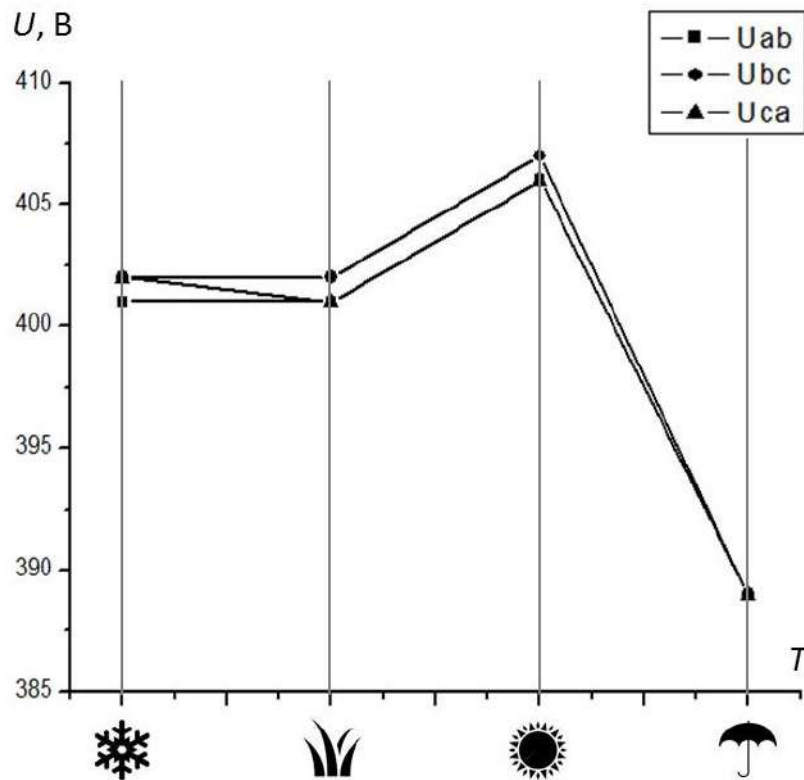


Рисунок 3.55 – Зависимость межфазных напряжений на Л2 ТП-17 от времени года

Таблица 3.9 – Результаты произведенных измерений фазных и межфазных токов линий ТП-17

	Линия	I_A	I_B	I_C	I_N	I_{BC}
Зима	Л1	91,48	99,38	96,69	29,40	90,14
	Л2	115,35	95,70	147,28	18,91	114,27
Весна	Л1	65,47	78,79	71,71	17,93	75,24
	Л2	105,51	96,62	96,82	18,18	101,44
Лето	Л1	27,16	30,08	39,76	14,09	39,18
	Л2	33,34	29,64	25,60	13,17	35,13
Осень	Л1	47,96	63,79	65,71	14,12	63,37
	Л2	98,37	94,43	90,45	17,90	94,03

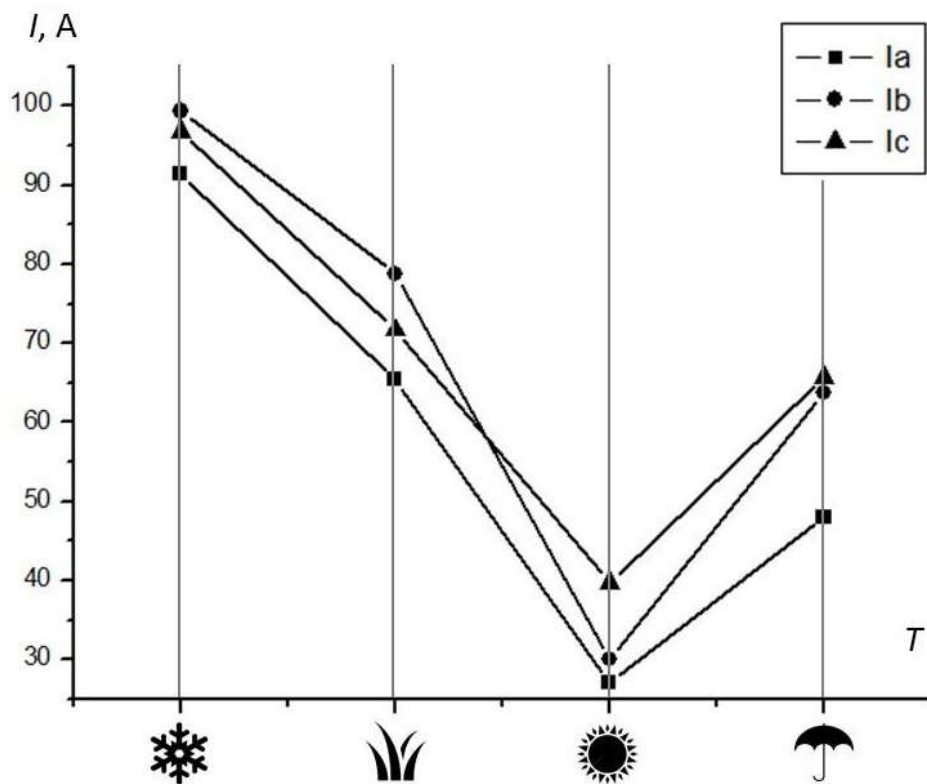


Рисунок 3.56 – Зависимость фазных токов на Л1 ТП-17 от времени года

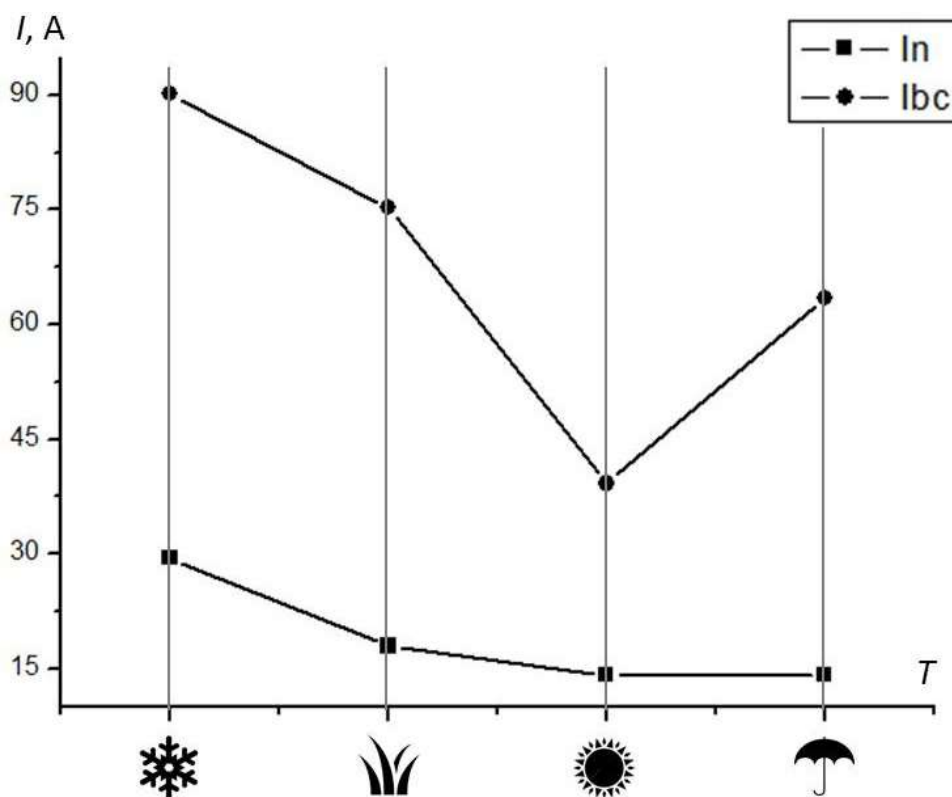


Рисунок 3.57 – Зависимость межфазных токов на Л1 ТП-17 от времени года

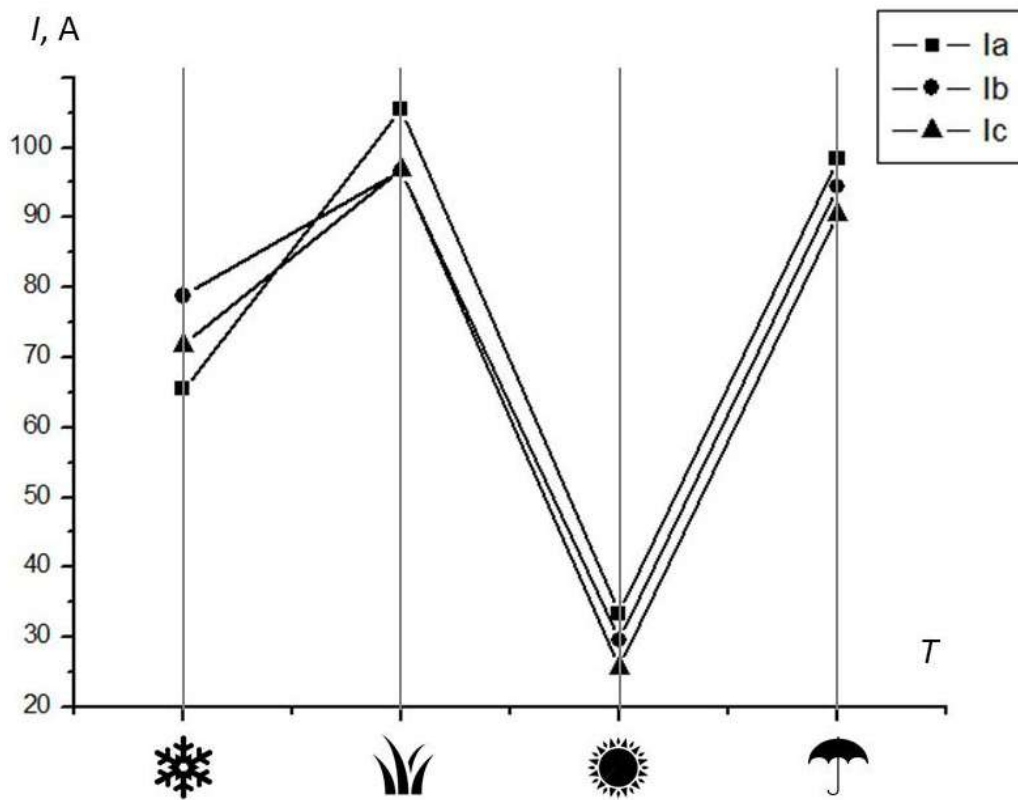


Рисунок 3.58 – Зависимость фазных токов на Л2 ТП-17 от времени года

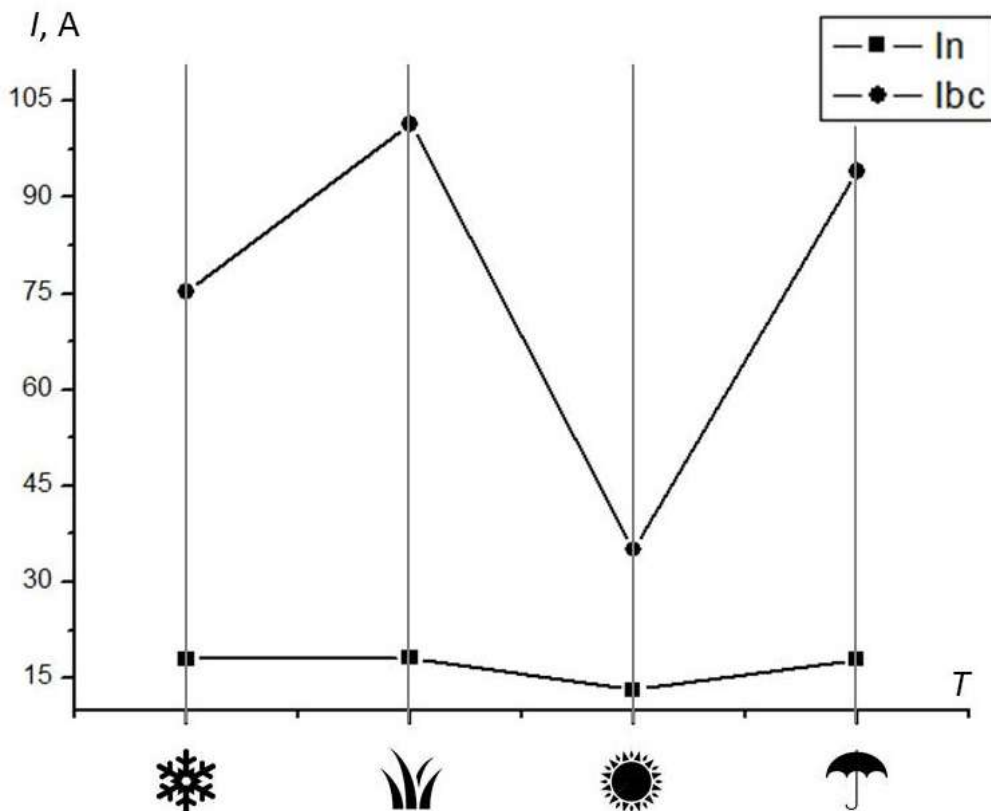


Рисунок 3.59 – Зависимость межфазных токов на Л2 ТП-17 от времени года

Таблица 3.10 – Результаты вычислений коэффициенты обратной и нулевой последовательностей токов, а также напряжений и коэффициента увеличения потерь мощности линий ТП-17

	Линия	K_{2I}	K_{0I}	K_P	K_{2U}	K_{0U}
Зима	Л1	0,242	0,133	1,155	0,027	0,036
	Л2	0,15	0,059	1,019	0,029	0,039
Весна	Л1	0,205	0,095	1,133	0,015	0,018
	Л2	0,124	0,065	1,047	0,018	0,019
Лето	Л1	0,337	0,167	1,262	0,004	0,007
	Л2	0,35	0,165	1,244	0,004	0,007
Осень	Л1	0,271	0,104	1,135	0,007	0,017
	Л2	0,114	0,066	1,024	0,008	0,016

Результаты измерений и вычислений указывают на следующие потери, связанные с несимметрией токов и напряжений в линиях Л1 и Л2 подстанции ТП-17:

- зимний сезон: Л1 — 1,4 МВт·ч, Л2 — 0,2 МВт·ч, т.о. суммарный объем потерь составляет 1,6 МВт·ч;
- весенний сезон: Л1 — 0,7 МВт·ч, Л2 — 0,3 МВт·ч, т.о. суммарный объем потерь составляет 1 МВт·ч;
- летний сезон: Л1 — 0,25 МВт·ч, Л2 — 0,1 МВт·ч, т.о. суммарный объем потерь составляет 0,35 МВт·ч;
- осенний сезон: Л1 — 0,48 МВт·ч, Л2 — 0,14 МВт·ч., т.о. суммарный объем потерь составляет 0,62 МВт·ч.

Результаты проведенных расчетов показывают, что трансформаторная подстанция ТП-17 большей частью использовалась для обогрева помещений. В зимний период нагрузка наибольшая и, соответственно самые большие потери электроэнергии. В целом же для ТП-17 характерны не только наименьшие абсолютные показатели потерь, но и относительная величина потерь, связанная с несимметрией токов и напряжений, является наименьшей. Графики токов и напряжений показывают, что электроприемники представляют в данном случае достаточно равномерную загрузку сети.

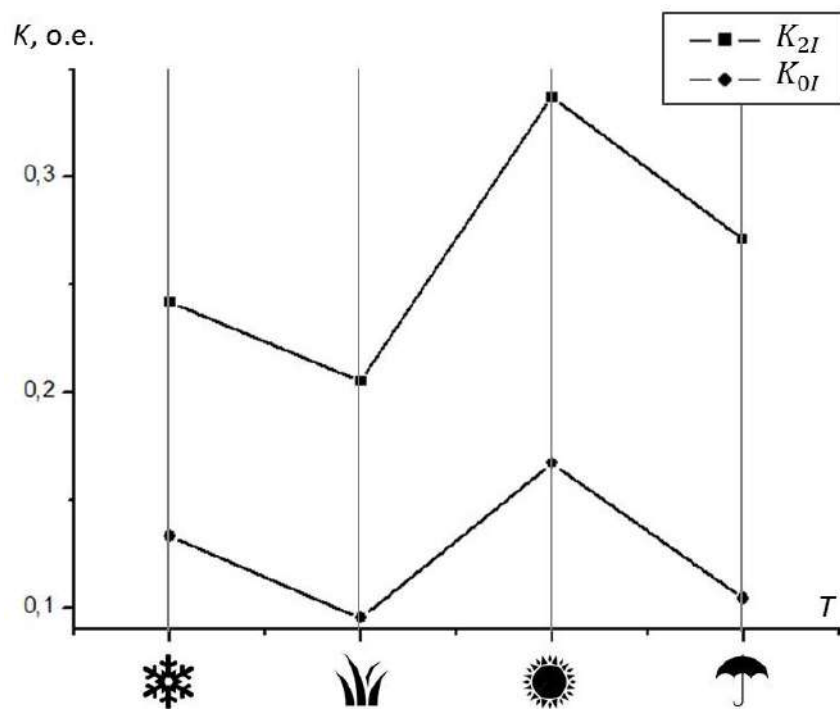


Рисунок 3.60 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей токов на Л1 ТП-17 от времени года

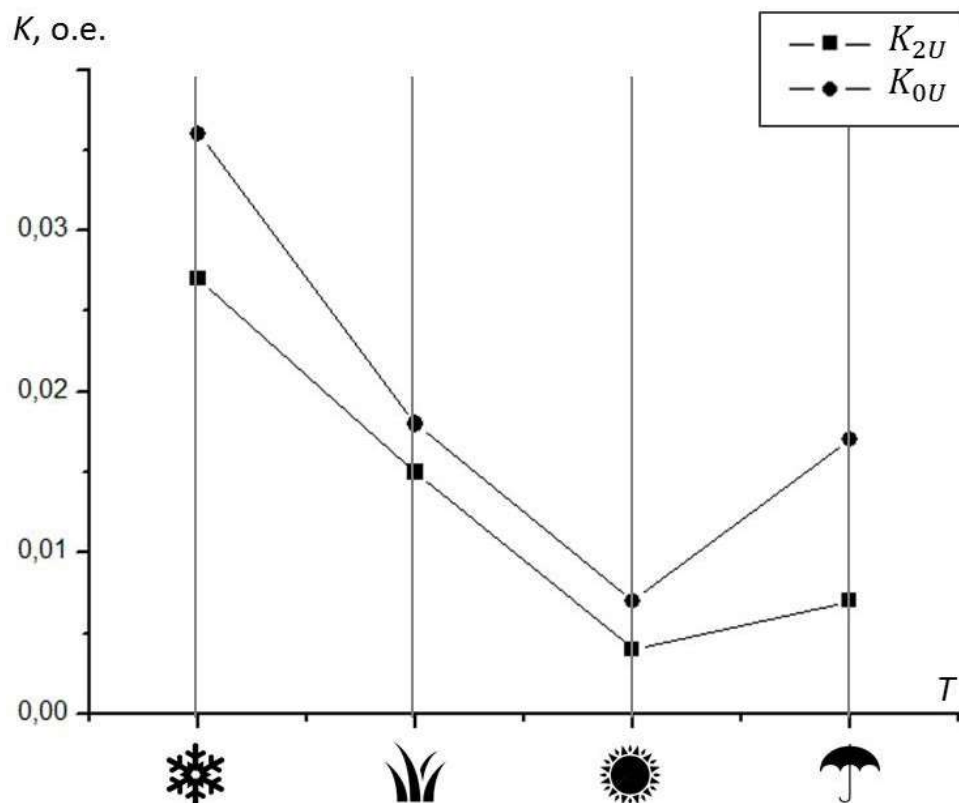


Рисунок 3.61 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей напряжений на Л1 ТП-17 от времени года

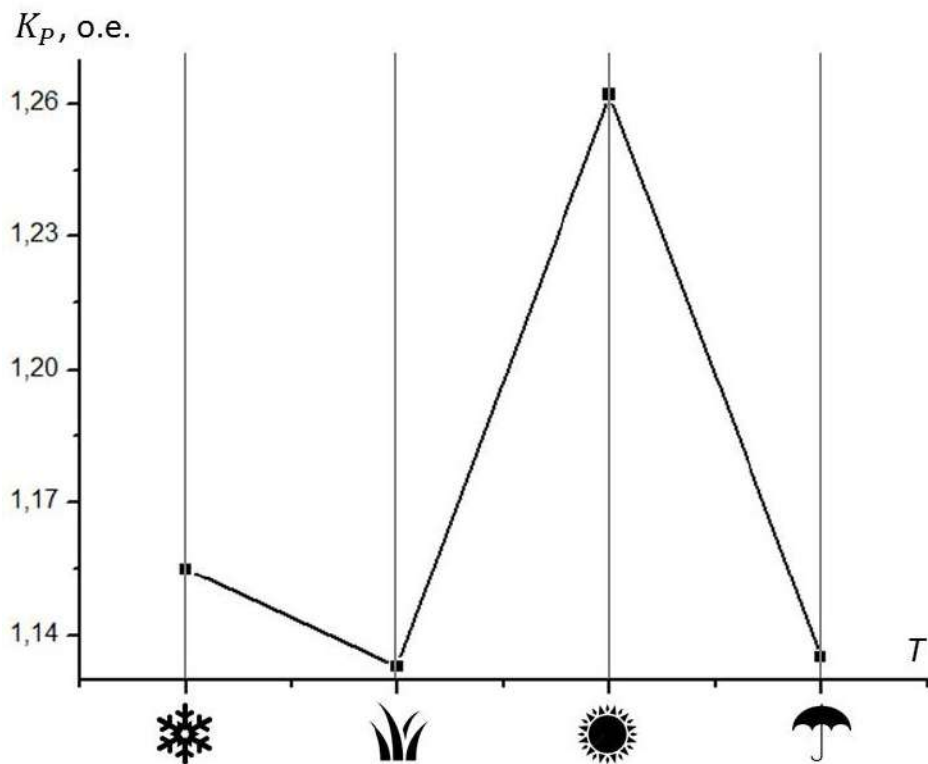


Рисунок 3.62 – Зависимость коэффициент дополнительных потерь на Л1 ТП-17 от времени года

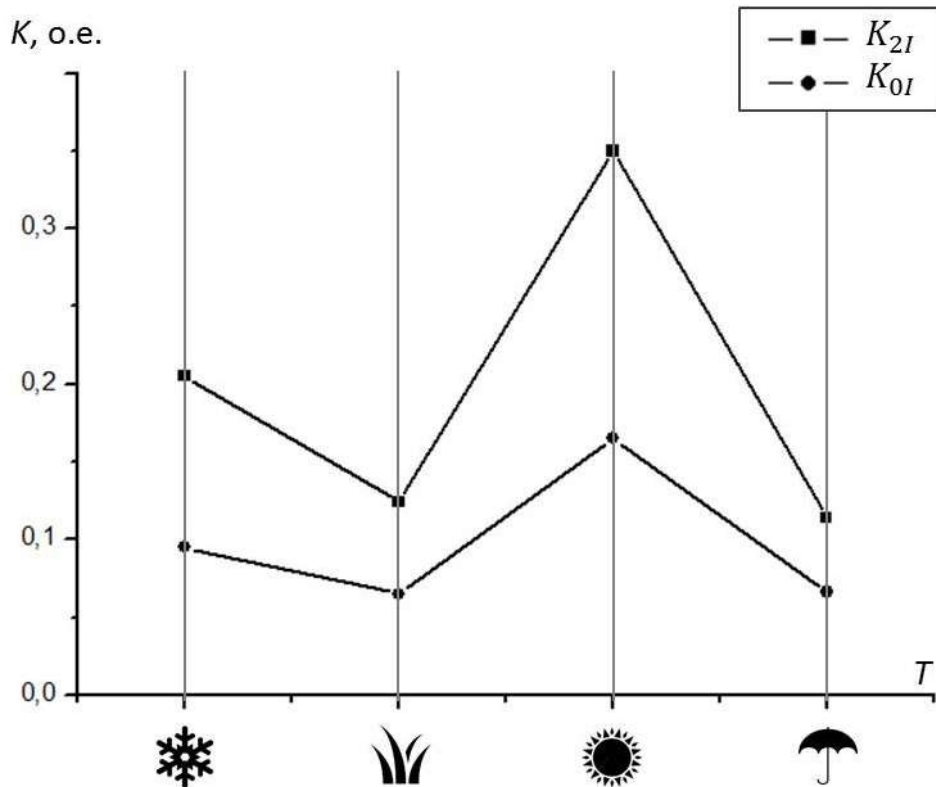


Рисунок 3.63 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей токов на Л2 ТП-17 от времени года

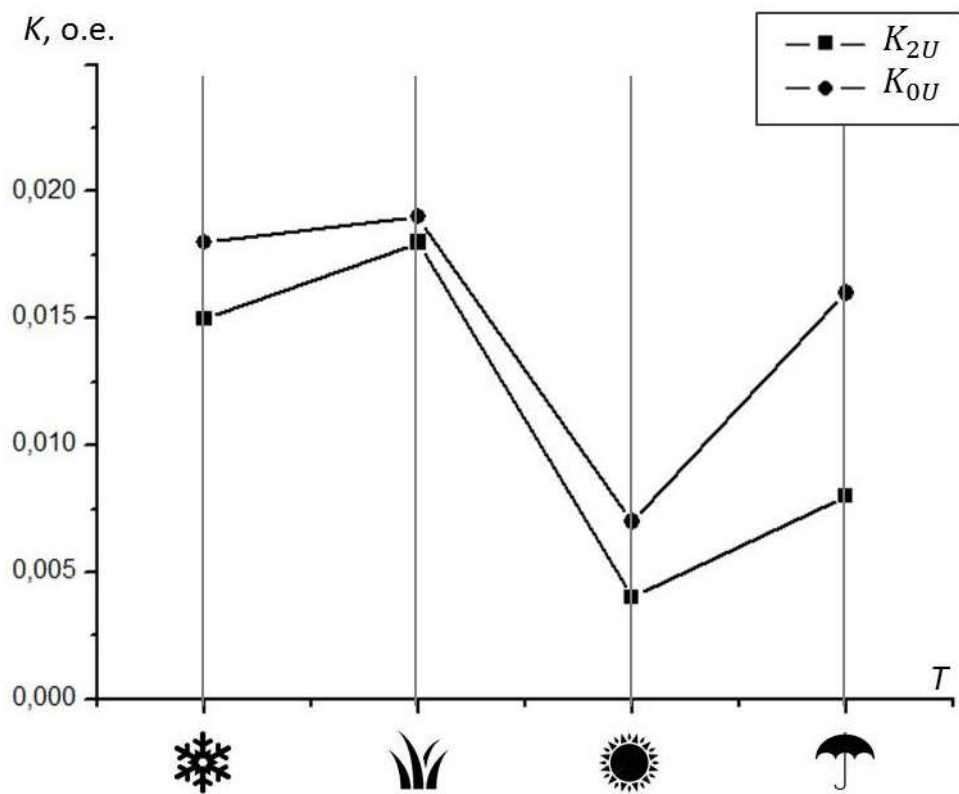


Рисунок 3.64 – Зависимость обратной и нулевой последовательностей напряжений на Л2 ТП-17 от времени года

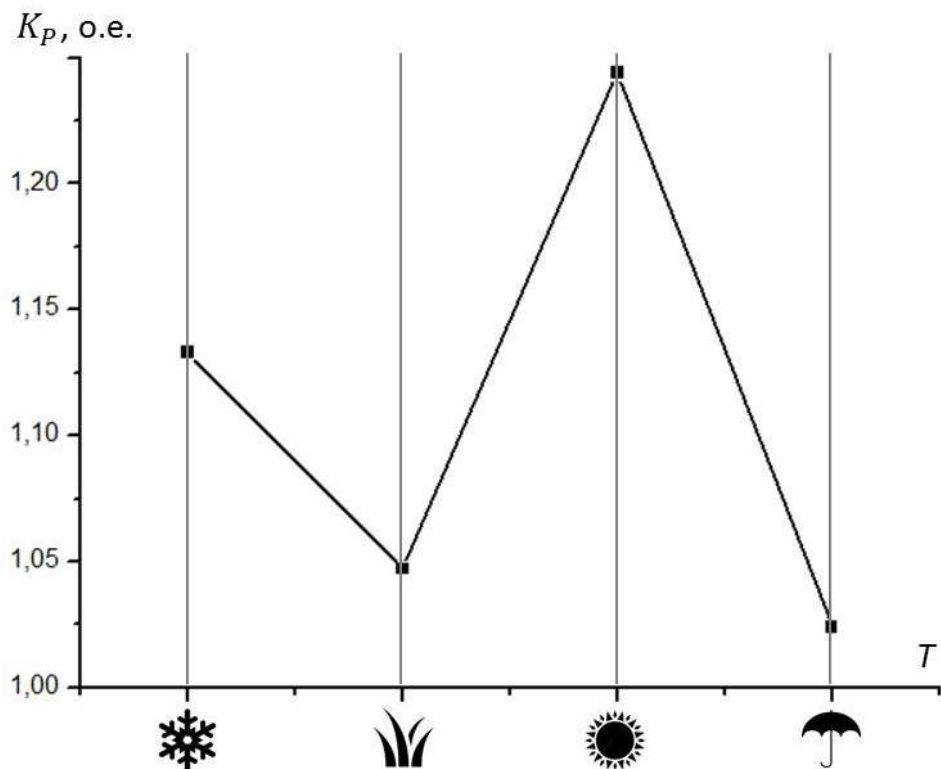


Рисунок 3.65 – Зависимость коэффициент дополнительных потерь на Л2 ТП-17 от времени года

Таким образом, проведенные расчеты потерь электроэнергии, которые обусловлены несимметрией токов и напряжений в трехфазных сетях ТП-5, ТП-9 и ТП-17 показали, что их суммарная величина составила 129,2 МВт·ч.

Общий анализ качества электроэнергии показывает, что на шинах трансформаторной подстанции ТП-5 средневзвешенное значение несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям составляет 9,5 и 11% соответственно, что не соответствует ГОСТу. В весеннее время среднее значение этих коэффициентов составило 2,65 и 3,13%, что удовлетворяет требованиям ГОСТа. Средние значения показателей качества, характеризующих несимметрию трёхфазной системы напряжений линий ТП-5 для летнего и осеннего периодов измерений также не выходят за пределы, установленные ГОСТом.

Изменения качества электроэнергии для ТП-9 показывают, что в зимний период, несмотря на значительные потери, вызванные несимметрией токов, в большинстве случаев режим работы трансформаторной подстанции соответствует требованиям ГОСТа. Данные измерений, проведенных в весенний период, показали, что значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности удовлетворяют требованиям, но среднее значение коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности превышает требуемые значения в 1,3 раза. Летний период измерений можно связать с резким уменьшением систематической и вероятностной несимметрией токов и напряжений и, соответственно, стабильным качеством электроэнергии. Это же в значительной степени относится и к осеннему периоду.

Исследование показателей качества электроэнергии на двух линиях трансформаторной подстанции ТП-17 показали, что коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям в зимний период выходят за установленные ГОСТом требования. В весенний, летний и осенний периоды значения показателей несимметрии токов и напряжений по обратной и нулевой последовательностям полностью соответствуют требованиям ГОСТ.

3.3. Выводы к разделу 3

1. В результате анализа статистики измерений режимов работы сельскохозяйственных ЛЭП показано, что работа сельских электрических сетей в первую очередь зависят от климатических условий. Регионы с резко континентальным климатом основной хозяйственной деятельности, для которых является зерноводство и животноводство, характеризуются резкими перепадами температур, и, соответственно, масштабными электронагрузками на ЛЭП, что необходимо учитывать при планировании сельской инфраструктуры.

2. Установлено, что качество электрической энергии в исследуемых электрических сетях 0,38 кВ существенно ухудшается в зимний период, а также ранней весной и поздней осенью, достигая средних значений для коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности, равных 9,5 и 11%, соответственно, что связано с активным использованием электрообогревательных приборов.

3. Предложено симметрирование режима работы линий трансформаторных подстанций за счет снижения систематической и вероятностной несимметрии фазных токов. Отмечено, что статистическая несимметрия токов может быть уменьшена путем перераспределения однофазных нагрузок.

РАЗДЕЛ 4

ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Проведенный теоретический анализ, результаты математического моделирования и статистика измерений показали, что искажение симметрии токов и напряжений приводит к увеличению потерь электроэнергии, снижению эффективности работы электрооборудования и уменьшению его срока эксплуатации, что говорит о необходимости создания условий нормальной работы, а под этим в рамках данной работы подразумевается обеспечение питания электроприёмников от симметричной системы напряжений или же снижения влияния на них асимметрии. Как было отмечено в разделе 1, несимметрию токов и напряжений в сети, обусловленную несимметричными электроприемниками, можно существенно уменьшить как с помощью схемных решений, так и путем применения специальных симметрирующих устройств.

4.1 Изменение схемы обмоток распределительного трансформатора

Базовыми схемами силовых трансформаторов, которые характеризуют различными реакциями на работу в несимметричном режиме, являются следующие [44-46]:

- «звезда-звезда»;
- «треугольник-звезда»;
- «звезда - зигзаг».

Сопротивления прямой последовательности трансформаторов для всех рассмотренных схем соединения определяют через следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{P_{кз}}{3I_H^2} \\ X_1 = \sqrt{Z^2 - R_1^2}, \\ Z = \frac{U_k \cdot U_H^2}{100 \cdot S_H} \end{cases} \quad (4.1)$$

где U_k — сопротивление обмоток трансформатора, S_H — полная мощность нагрузки, $P_{кз}$ — мощность короткого замыкания трансформатора.

Как было отмечено в разделе 2, наиболее типичной схемой соединения для сельских сетей является схема «звезда-звезда с нулем».



Рисунок 4.1 – Направление нулевых токов и магнитных потоков нулевой последовательности при схеме соединения «звезда-звезда с нулем»

Эта схема характеризуется низкой себестоимостью, однако малоэффективна в случае ее применения для нивелирования энергопотерь, связанных с несимметрией нагрузок. Общей вид схемы «звезда-звезда с нулем» показан на рисунке 4.1. Как можно видеть, в обмотке, соединенной в звезду без нулевой точки, не происходит протекание токов нулевой последовательности, поэтому в режиме несимметрии эти токи протекают во

вторичной обмотке. Магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются через бак трансформатора и выходят за пределы сердечников, что ухудшает охлаждение и существенно увеличивает сопротивление нулевой последовательности:

$$\begin{cases} R_0 \gg R_1 \\ X_0 \gg X_1 \end{cases} \quad (4.2)$$

Характерно, что сопротивление нулевой последовательности трансформатора данного типа зависит от особенностей конструкции и может быть только измерено экспериментально.

Для устранения несимметрии может быть использовано встраиваемое симметрирующее устройство (СУ) в виде обмотки, наложенной поверх обмоток трансформатора (рис. 4.2). Обмотка СУ при этом должна быть рассчитана на протекание по ней номинального тока I_N .

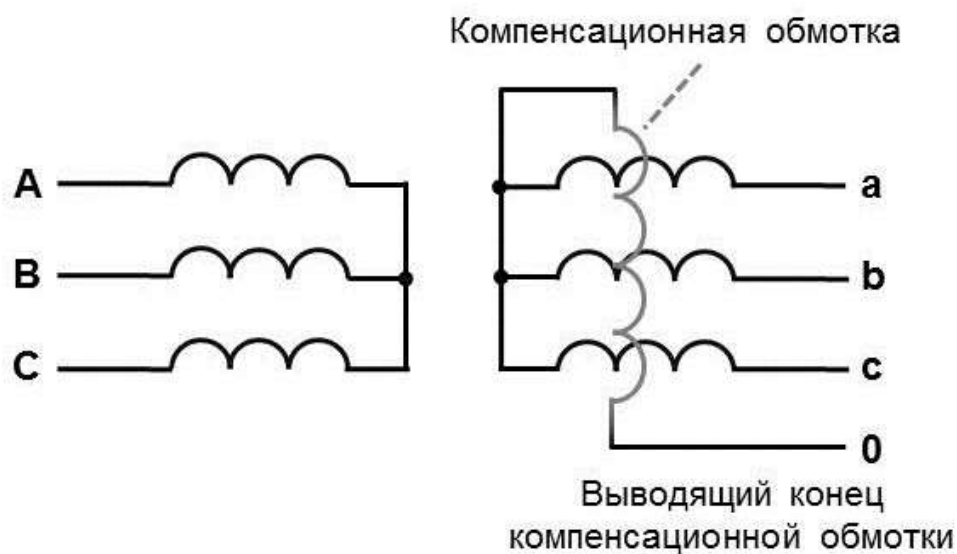


Рисунок 4.2 – Схема соединения трансформатора с обмоткой симметрирующего типа

Принцип действия данной схемы заключается в том, что при нарушении симметрии нагрузки и появлении в рабочих обмотках токов нулевой последовательности, создающих в сердечнике магнитодвижущую силу нулевой последовательности, компенсация несимметрии происходит за счет потоков нулевой последовательности, создаваемых протеканием тока через СУ.

При соединении трансформатора в соответствии со схемой «треугольник – звезда с нулем», токи всех последовательностей протекают как

в первичной, так и вот вторичной обмотках. В первичной обмотке токи нулевой последовательности замыкаются внутри «треугольника» и не попадают в сеть, а магнитодвижущая сила, обусловленная протеканием токов нулевой последовательности в первичной и вторичной обмотке, почти полностью компенсируются, что снижает величину реактивных сопротивлений токов нулевой последовательности. В таком трансформаторе сопротивление нулевой последовательности определяется в соответствии со следующей системой:

$$\begin{cases} R_0 = R_1 \\ X_0 = X_1 \end{cases} \quad (4.3)$$



Рисунок 4.3 – Направление нулевых токов и магнитных потоков нулевой последовательности при схеме соединения «треугольник – звезда с нулём»

В трансформаторах со схемой «звезда-зигзаг с нулем» в несимметричном режиме протекание токов нулевой последовательности происходит только во вторичной обмотке. Протекание этих токов не создает нулевой магнитный поток, так как на стержнях расположены по две вторичные полуобмотки разных фаз, намагничивающие силы направлены друг другу навстречу, что обеспечивает их взаимную компенсацию (рис. 4.4). Сопротивление нулевой последовательности в таких трансформаторах меньше сопротивлений прямой последовательности, то есть:

$$\begin{cases} R_0 < R_1 \\ X_0 < X_1 \end{cases} \quad (4.4)$$

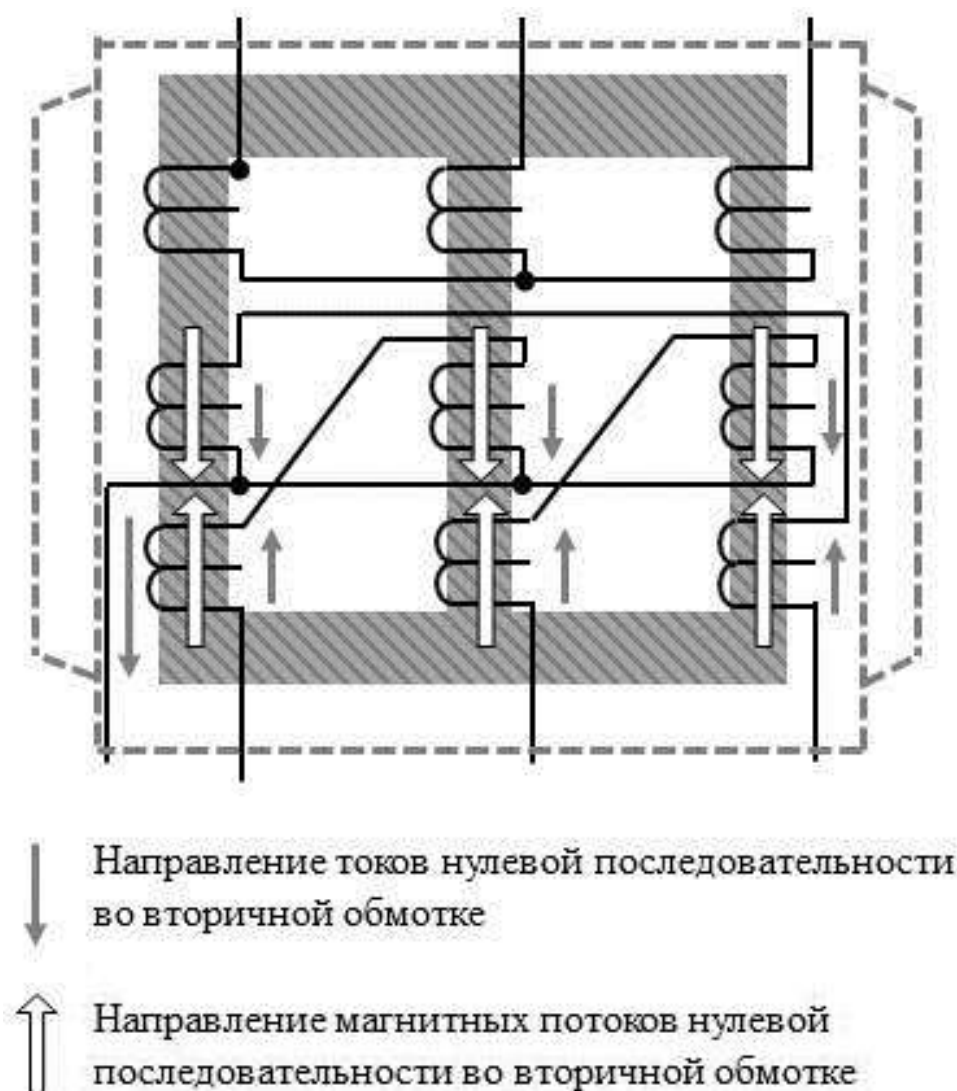


Рисунок 4.4 – Направление нулевых токов и магнитных потоков нулевой последовательности при схеме соединения «звезда – зигзаг с нулем»

Таким образом, наиболее эффективным в плане компенсации несимметричных режимов является использование трансформатора с обмотками «звезда-зигзаг с нулем», в то время как при использовании схем «звезда-звезда с нулем» для уменьшения несимметрии необходимо использовать СУ в нулевом проводе.

4.2. Метод перераспределения нагрузок по фазам

Равномерное распределение нагрузок в сетях обеспечивает существенное снижение потерь, в сельских сетях не всегда есть возможность обеспечить равномерную пофазную загрузку на стадии проектирования сети. Возможность регулирования сети после подключения электроприемников возможна в случае применения трансформатора с пофазным регулированием, базовая схема которого приведена на рисунке 4.5 [47].

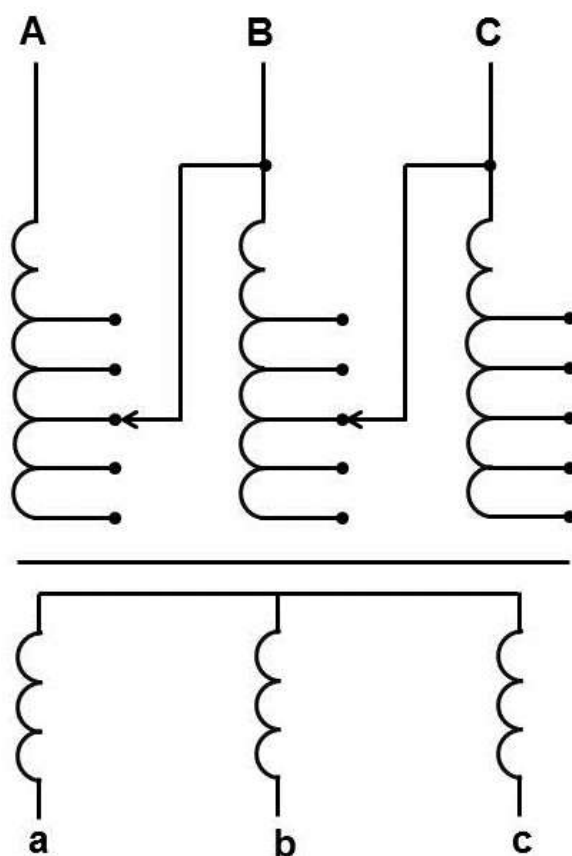


Рисунок 4.5 – Базовая схема соединения трансформатора с пофазным регулированием

При симметричной системе напряжений сдвиг между фазами составляет 120° и вторичная система напряжений тоже будет симметричной.

В случае, когда в одной из фаз изменяется коэффициент трансформации, одновременно изменяется и фазное напряжение на вторичной обмотке трансформатора и, соответственно, система линейных напряжений. Это помогает симметризовать сеть. Наиболее наглядно принцип работы такого трансформатора может быть представлен на векторной диаграмме (рис. 4.6).

Для повышения нагрузочной эффективности и КПД трансформатора через уменьшение потерь от токов нулевой последовательности в каждую отдельную фазу обмоток трансформатора может быть подключена первичная обмотка индуктивного устройства (ИУ).

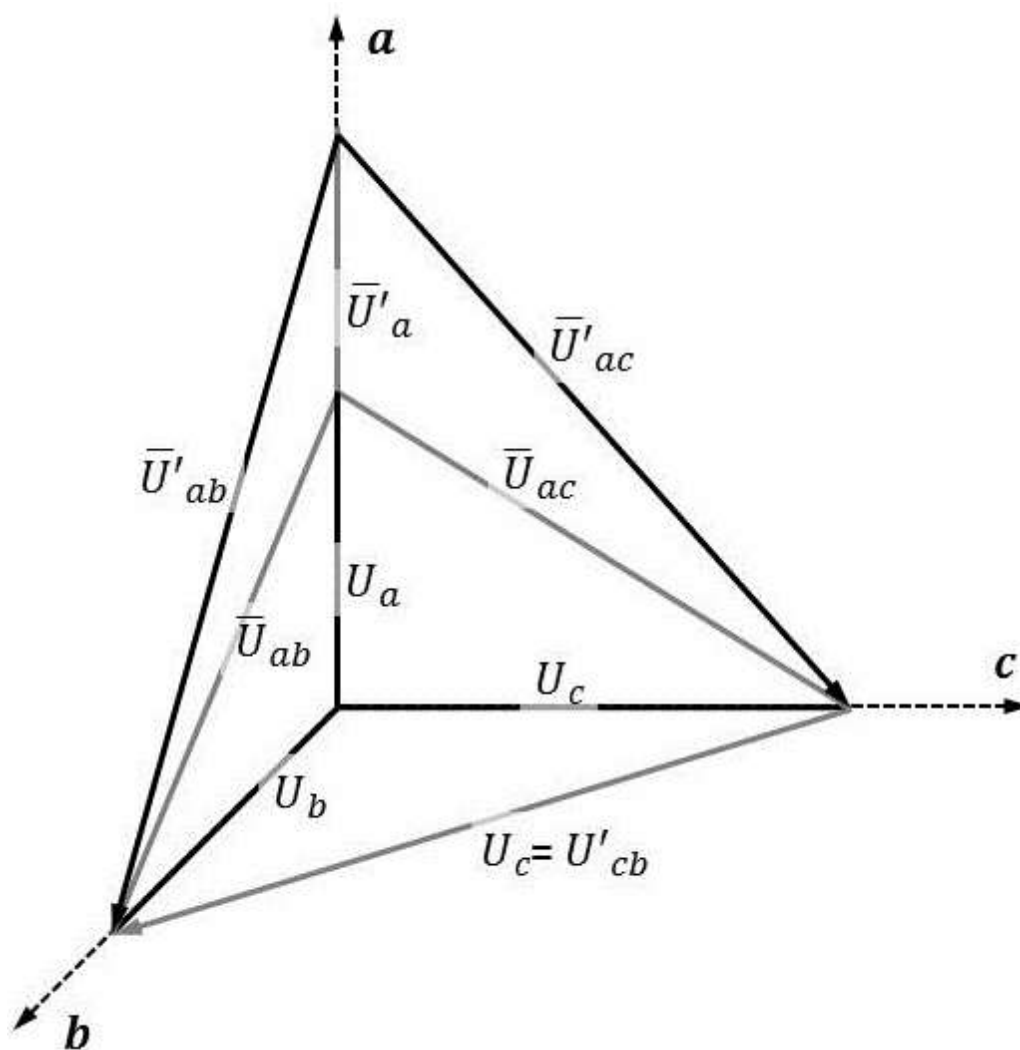


Рисунок 4.6 – Векторная диаграмма трансформатора с пофазной регулировкой

ИУ включает в себя магнитопровод и вторичную обмотку, соединенную концами с обмотками фаз. Схема ИУ также может содержать две

вторичные обмотки, одна из которых соединена с вторичной обмоткой устройства второй фазы, а другая — с третьей фазой. При такой схеме соединения вторичных обмоток индуктивных устройств токи нулевой последовательности в них не протекают, поэтому МДС токов нулевой последовательности первичных обмоток являются намагничивающими токами ИУ. При этом токи прямой и обратной последовательностей, на которые могут быть разложены токи нагрузки, тем не менее, могут замыкаться по вторичным обмоткам. Поэтому для них МДС токов первичных обмоток могут быть скомпенсированы токами обмоток, ИУ внесут в цепь первичных обмоток относительно малые сопротивления.

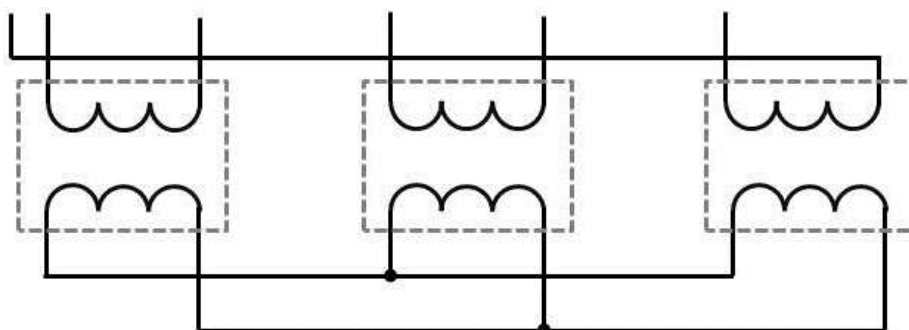


Рисунок 4.7 – Схема индуктивного устройства с параллельным соединением вторичных обмоток всех фаз

Более простым вариантом реализации ИУ является схема с параллельным соединением вторичных обмоток ИУ всех фаз (рис. 4.7).

4.3 Методики компенсации токов обратной последовательности

Применение устройств компенсации токов обратной последовательности позволяет воздействовать на данные токи, что позволяет уменьшить коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности [47-50].

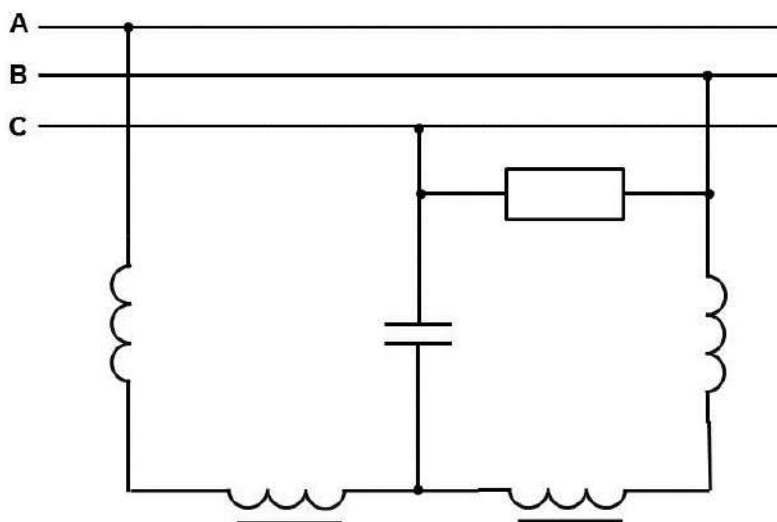


Рисунок 4.8 – Симметрирующее устройство токов обратной последовательности

Индуктивно-емкостные элементы подают в сеть пульсирующие, совпадающие по фазе мощности, которые компенсирует перекося в однофазных нагрузках. Базовая схема состоит из индуктивности с промежуточным отводом, конденсаторной батареи, воздушных индуктивностей и нагрузки, которая вносит несимметрию. При этом две индуктивности связаны с фазами (А и В), промежуточный отвод и конденсатор подключены к фазе С, а нагрузка включена между фазами С и В. Для симметрирования необходимо чтобы мощность нагрузки определялась следующим образом:

$$S_H = \sum_i Q_{Li} + Q_C, \quad (4.5)$$

где Q_C — мощность конденсатора; Q_{Li} — мощность индуктивных элементов. Недостатком СУ является низкая эффективность фильтрации. Для исправления этого недостатка в схему включаются дополнительные фильтровые звенья (рис. 4.9).

Наиболее распространенные из фильтро-симметрирующих устройств относятся к шунто-симметрирующим устройствам, особенностью которых заключается в том, что они имеют минимальное сопротивление нулевой последовательности, что дает возможность части нулевых токов замыкаться на участке подключения устройства. Таким образом, такие ФСУ шунтируют токи и не пропускают их в другие участки сети.

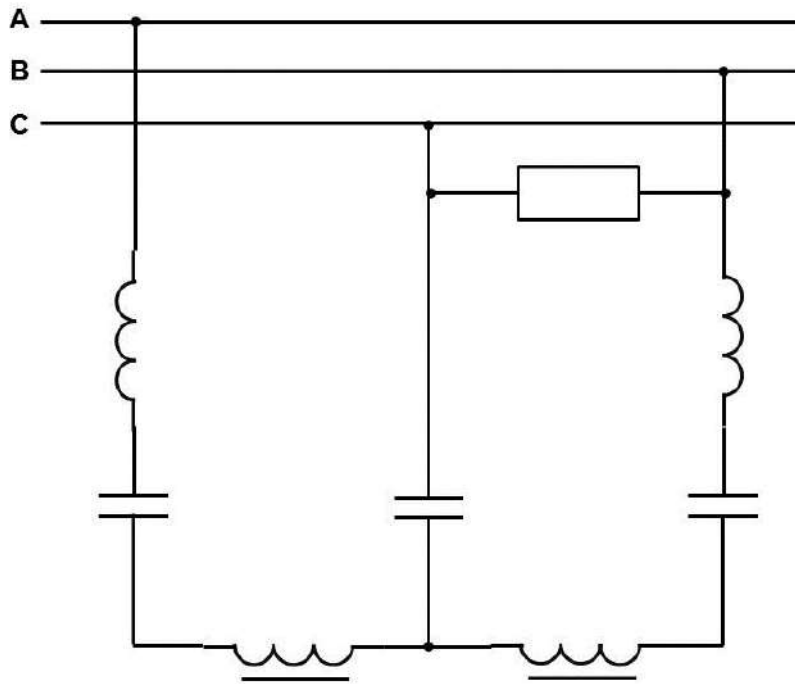


Рисунок 4.9 – Фильтро-симметрирующее устройство токов обратной последовательности

Для трёхфазной сети с регулируемыми параметрами также эффективно применение симметрирующего устройства, содержащего две ступени мощности, включающие в себя емкостные элементы и индуктивность. При этом первая ступень мощности включает в себя катушку индуктивности до дополнительного вывода, а вторая ступень мощности — полную катушку индуктивности.

При другом методе построения, схемы СУ можно графически представить в виде шести емкостных элементов, соединенных в звезду и катушки индуктивности с дополнительным выводом. Катушка индуктивности подключена к общей точке и нулевому проводу. Лучи звезды емкостей присоединяют к фазным проводам сети А, В и С. При возрастании несимметрии токов и напряжений в рамках работы ИУ за счет подключения второй ступени мощности, которая состоит из трех дополнительных емкостей и полной катушки индуктивности. При достижении величины тока, соответствующего допустимому значению несимметрии токов и напряжений в нулевом проводе ИУ отключается от фазных проводов сети.

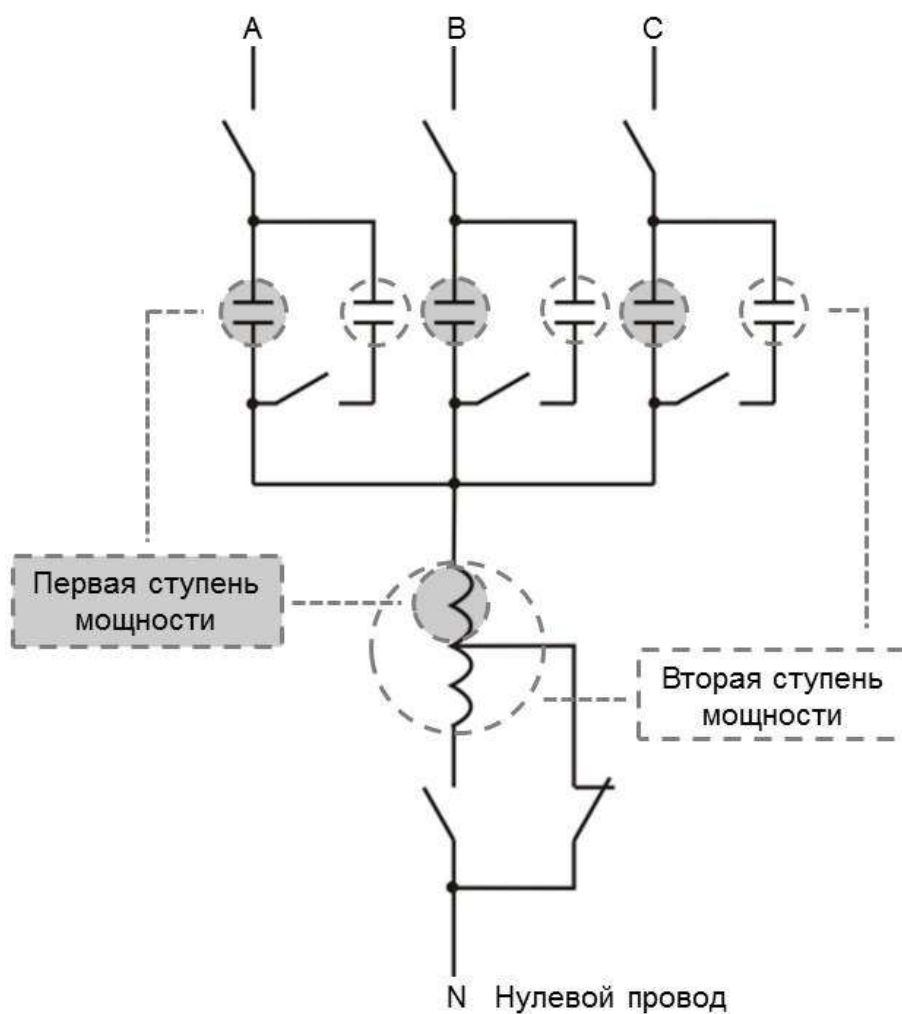


Рисунок 4.10 – Симметрирующее устройство для смешанной нагрузки

4.4 Методики автоматического управления симметрирующими устройствами

Несимметрия токов и напряжений изменяется во времени и зачастую имеет случайный характер, поэтому симметрирование режимов работы распределительных сетей с постоянной мощностью СУ не всегда может быть признано эффективным. В таких случаях лучше использовать СУ с регулируемыми параметрами, которое может быть построено как на основе релейно-контактной аппаратуры (рис. 4.11), так и с применением бесконтактных элементов [51].

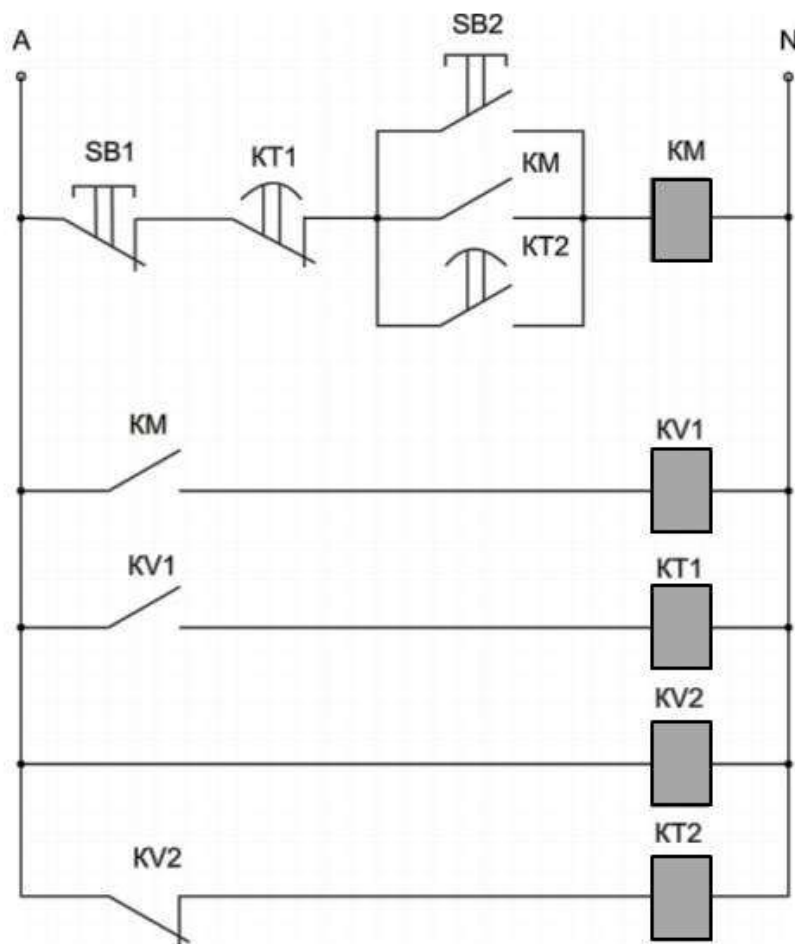


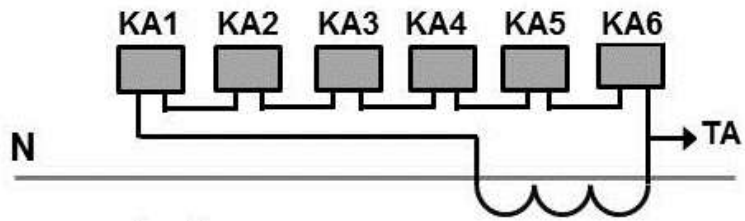
Рисунок 4.11 – Базовая схема автоматического управления симметрирующим устройством в функции напряжения

Работу схемы можно разделить на несколько этапов. В зависимости от уровня напряжения запускается либо реле максимального напряжения KV1, либо реле минимального напряжения KV2. Далее запускается реле времени (КТ1 или КТ2), которое с фиксированной задержкой времени через магнитный пускатель подключает или отключает СУ от сети.

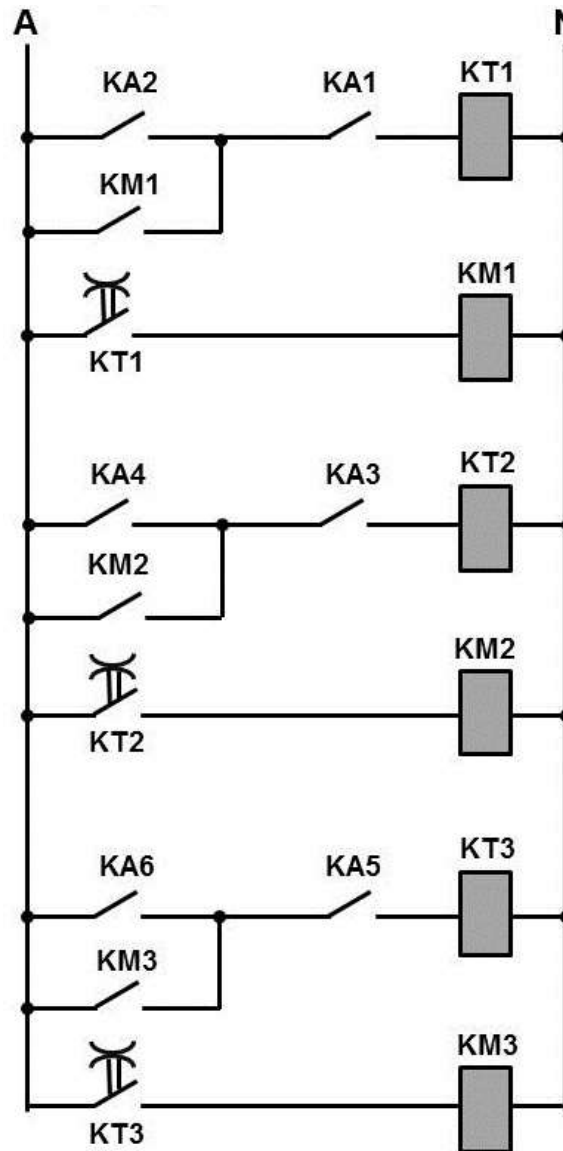


Рисунок 4.12 – Алгоритм работы автоматического управления симметрирующим устройством в функции напряжения

Поскольку предложенная схема не позволяет регулировать мощность СУ, была предложена схема автоматического управления СУ в функции тока (рис. 4.13).



(a)



(б)

Рисунок 4.13 – Релейно-контактная схема автоматического управления симметрирующим устройством в функции тока

Базовая схема состоит из следующих элементов:

- трансформатор тока ТА;
- токовые реле КА1 — КА6;
- реле времени КТ1 — КТ3;
- магнитные пускатели КМ1 — КМ3.

Данная схема работает за счет протекания нулевого тока по нулевому проводу, в который встроены трансформатор тока ТА, токовые реле и реле времени для каждой ступени. Компенсация магнитного потока нулевой последовательности осуществляется при помощи схемы соединения СУ. Для уменьшения уровня потерь используется автоматическое управления ступенями мощности СУ. Подключение ступеней происходит при увеличении значения тока, который протекает в нулевом проводе. Фактором контроля при этом служит трансформатор тока. Как и в предыдущей схеме, при достижении нулевым током допустимого уровня асимметрии СУ отключается. Работа схемы начинается с момента учета ТА превышения по току, после чего происходит замыкание контактов токовых реле КА, которые запускают реле времени КТ. Реле времени КТ обеспечивает задержку по времени и замыкает контакт реле времени КТ. Таким образом, питание поступает на электромагнитный пускатель КМ. Замыкание силовых контактов КМ включает в работу одну из ступеней. При уменьшении тока данный алгоритм выполняется аналогично, но элементы действуют в обратном порядке.

Практический опыт функционирования сельских сетей показывает, что для устранения вероятностной составляющей несимметрии имеет смысл использования трансформаторов типа «звезда-зигзаг с нулем». Поскольку большая часть используемых трансформаторов имеет более экономичную схему соединения «звезда-звезда с нулем», то необходимо предусмотреть установку СУ в нулевом проводе, либо применить шунтосимметрирующие устройства с малым сопротивлением токам нулевой последовательности, хотя их использование при динамической нагрузке может привести к дополнительными потерями. Это связано с тем, что устройства рассчитываются исходя из максимального уровня несимметрии, которая не обязательно имеет место в электросети. Поэтому для нивелирования дополнительных потерь необходимо применять автоматически регулируемые ШСУ.

4.5 Разработка автоматизированной системы симметрирования фазных токов

Рассмотренные выше системы автоматизации симметрирования фазных токов могут быть взяты за основу построения устройств, которые эффективно снижают уровень несимметрии в сельской электросети. Типичным устройством симметрирования нагрузки трехфазной четырехпроводной линии можно считать систему, которая предусматривает переключение однофазной нагрузки к наименее нагруженной фазе, определяющуюся сравнением аргументов (фаз) основной гармоники напряжения нулевой последовательности (НПП) по отношению к каждому из фазных напряжений в месте подключения однофазной загрузки. Переключение однофазной нагрузки при этом производится при превышении НПП порогового значения.

Из недостатков данного способа можно обозначить следующие:

- низкая чувствительность к уровню несимметрии фазных токов трёхфазной четырёхпроводной сети;
- симметрирование нагрузок является некоммуникабельным, так как для диагностики и обслуживания устройства необходимо производить обесточивание электрической сети и демонтаж электротехнических изделий;
- данная группа изобретений сложна для реализации и, как следствие, неприемлема для широкого применения в электрических сетях.

Более предпочтительным вариантом является устройство для автоматического симметрирования нагрузки линий трёхфазной четырёхпроводной сети, часть потребителей которой являются однофазными. Технический результат достигается за счёт того, что в устройстве, предполагающем переключение, по меньшей мере, части однофазных нагрузок к наименее загруженной фазе, для каждой из переключаемых однофазных нагрузок в месте ее присоединения к линии определяют значения активной мощности, соответствующие каждому из фазных напряжений и току нулевого провода линии без учета тока однофазной нагрузки. В качестве наименее нагруженной принимают фазу линии с максимальным значением модуля активной мощности, знак которого противоположен знаку ак-

тивной мощности наиболее нагруженной фазы. Из недостатков изобретения можно выявить следующие:

- отсутствует возможность централизованного управления по команде оператора с АРМ;
- не предусмотрено фиксирование переключений однофазного потребителя между фазами;
- способ является затратным, так как для каждой нагрузки предполагается установка устройства с датчиками тока и напряжения.

Задача, решению которой посвящена данная работа, предполагает повышение чувствительности устройств для симметрирования фазных токов и создание группы автоматизированных устройств для устранения несимметрии фазных токов четырёхпроводной трёхфазной сети, переключение однофазных нагрузок между тремя фазами для достижения равномерного распределения нагрузки на трёхфазную сеть с возможностью мониторинга работы и управления системой через АРМ оператора. Данная задача решается за счет того, что предлагаемая группа изобретений имеет несколько модулей, отвечающих за симметрирование фазных токов.

Ключевым элементом схемы является центральный модуль, который обеспечивает выполнение следующих функций:

- программный анализ показаний датчиков тока;
- регистрация переключения однофазных нагрузок между фазами трёхфазной сети;
- отправление данных в зависимый модуль.

В свою очередь зависимый модуль отвечает за:

- обработку данных, отправляемых центральным модулем;
- переключение однофазной нагрузки между фазами трёхфазной сети.

Технический результат и эффективность работы системы достигается приведенной совокупностью признаков:

1. Использование PLC технологии для связи между зависимыми и центральными модулями (увеличение скорости устранения несимметрии).
2. Улучшение качества электроэнергии, поставляемой однофазному потребителю за счёт переключения нагрузки между фазами за короткий срок.

3. Использование в качестве коммутационных элементов симисторов (моментальное переключение однофазной нагрузки между фазами трёхфазной сети, без отсутствия скачков напряжения).

4. Повышение надёжности оборудования для симметрирования фазных токов в трёхфазных сетях из-за отсутствия электромеханических изделий в системе симметрирования.

5. Возможность мониторинга работы схемы на расстоянии с использованием АРМ (упрощение обслуживания устройств для симметрирования фазных токов).

6. Использование внутренней памяти устройства (регистрация переключений однофазных потребителей между фазами).

Результатом внедрения данной схемы является увеличение оперативности устройств для симметрирования фазных токов трёхфазной четырёхпроводной сети, достижение высокой скорости переключения однофазной нагрузки между фазами трёхфазной сети при любых уровнях несимметрии, исключая перепады напряжения. Также достигается упрощение в реализации и монтаже устройства симметрирования однофазных нагрузок трёхфазной линии. Кроме того, в устройстве предусмотрено переключение однофазной нагрузки между фазами трёхфазной сети по команде оператора в режиме реального времени.

Схема устройства, реализующего данный алгоритм приведена на рисунках 4.13-4.15. Также на схеме показан способ подключения однофазной нагрузки к трёхфазной четырёхпроводной линии.

Блок 1 содержит датчики для определения фазных токов 9,10,11 соответствующих фаз трёхфазной сети F1,F2,F3. Блок 8 PLC модем для связи устройств 1,2 по ЛЭП. В виде блока 7 изображена центральная плата со встроенными часами реального времени 13, UART преобразователем 15, её работа основана на использовании AVR микроконтроллера 14 и его дополнительной обвязки. Блок 12 – автоматизированное рабочее место оператора, подключаемое через разъём 30. Выводы устройства 20-25 предназначены для подключения фаз трёхфазной сети к датчикам тока и PLC модему.

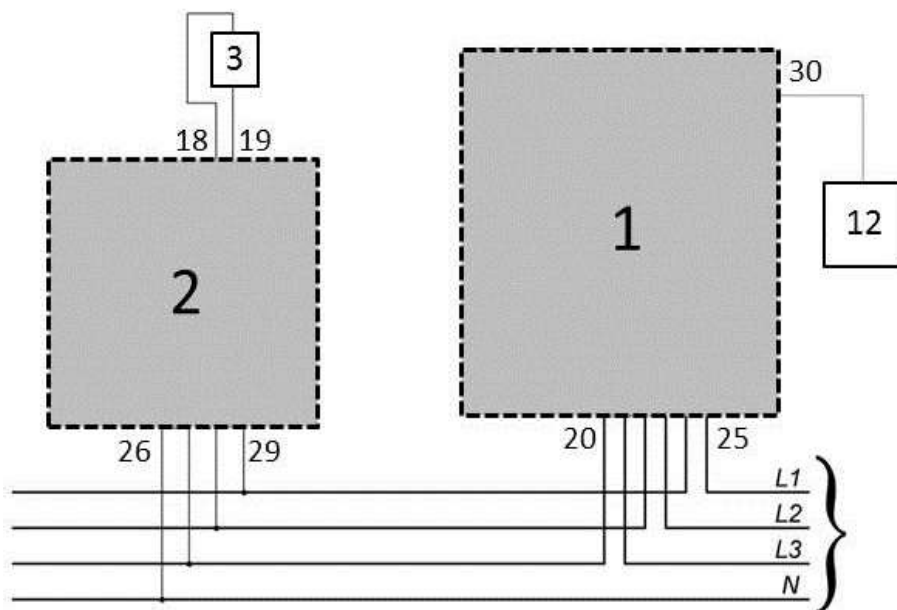


Рисунок 4.13 – Общая схема автоматизированной системы симметрирования фазных токов

Зависимый модуль 2 предназначен для переключения однофазной нагрузки 3 между фазами F1, F2, F3 и включает в себя симисторный блок коммутации 6, каскад из трёх симисторов 17, управляемый через опторазвязку 16 контроллером 4. Для приёма и передачи информации используется PLC модем 5. К выводам 18, 19 подключается однофазная нагрузка, выводы 26-29 используются для подключения устройства к трёхфазной четырёхпроводной сети.

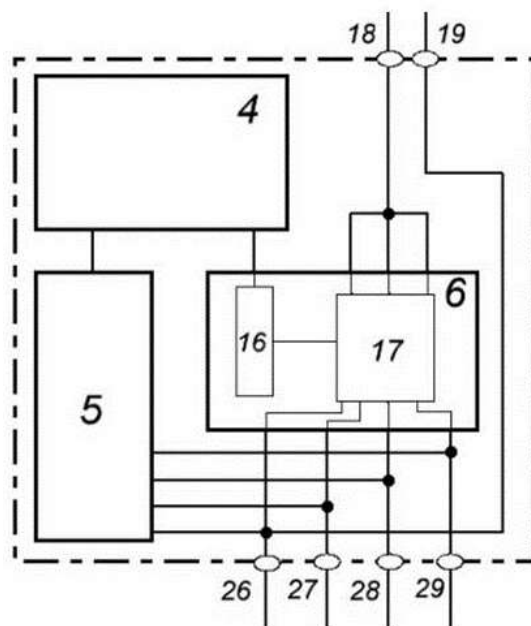


Рисунок 4.14 – Зависимый модуль автоматизированной системы симметрирования фазных токов

Базовый алгоритм работы устройства следующий: центральный модуль управления 1 (рис. 4.15) определяет ток, протекающий по каждой фазе трёхфазной линии с помощью трансформаторов тока 9-11. Принцип работы трансформаторов тока основан на эффекте Холла. Микроконтроллер 14 получает информацию о протекающих в фазах токах в виде аналогового сигнала. Далее сигнал преобразовывается аналого-цифровым преобразователем для дальнейшей программной обработки и вывода показаний оператору. Для обеспечения связи между АРМ оператора 12 и центральным модулем используется преобразователь USB-UART 15. Часы реального времени 13 необходимы для регистрации времени переключений нагрузок между фазами трёхфазной сети. PLC модем 8 используется для связи между центральным и зависимыми модулями по ЛЭП. Центральный модуль предполагает подключение от 1 до 125 зависимых модулей.

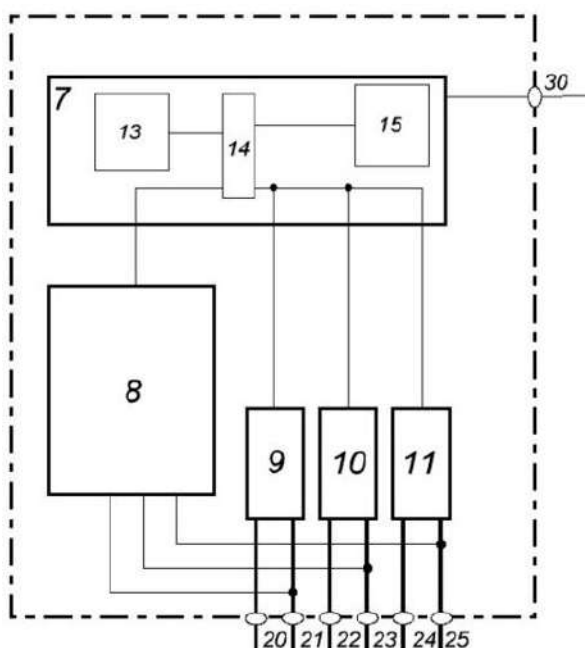


Рисунок 4.15 – Центральный модуль автоматизированной системы симметрирования фазных токов

Зависимый модуль 2 (рис. 4.14) предназначен для переключения однофазной нагрузки между фазами трёхфазной сети и включает в себя коммутационный блок 6. Коммутационный блок состоит из симисторного каскада 17 и опторазвязки, обеспечивающей “сухой контакт” для защиты логической электроники и PLC модема. В виде блока 4 изображена зависимая плата, которая осуществляет управление коммутационным блоком 6, так же зависи-

мая плата используется для получения данных от центрального модуля через PLC модем 5. В виде блока 3 изображена однофазная нагрузка.

Следует отметить, что к одному центральному модулю может подключаться до 125 зависимых модулей. Это достигается тем, что каждому из устройств даётся уникальный адрес, который в дальнейшем используется для управления определённым зависимым модулем для устранения несимметрии фазных токов.

4.6 Методы расчета параметров симметрирующих устройств

Приведенный в разделе 2 модульный метод расчета симметричных составляющих позволяет рассмотреть процесс дальнейшей реализации подобного рода алгоритма для определения параметров симметрирующего устройства. Тем не менее, наиболее эффективным считается метод выбора параметров симметрирующего устройства в зависимости от показателей несимметрии токов и напряжений в электросети, например метод симметричных координат, в основе которого лежит использование матриц преобразования симметричных координат.

В рамках данного метода система уравнений для токов и напряжений выглядит следующим образом [52]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} \bar{I}_A = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \\ \bar{I}_B = \bar{a}^2 \bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \\ \bar{I}_C = \bar{a} \bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \bar{U}_A = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 \\ \bar{U}_B = \bar{a}^2 \bar{U}_1 + \bar{a} \bar{U}_2 + \bar{U}_0 \\ \bar{U}_C = \bar{a} \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \bar{U}_2 + \bar{U}_0 \end{array} \right. \\ \bar{a} = e^{j2\pi/3} = e^{-j4\pi/3} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \end{array} \right. , \quad (4.6)$$

где \bar{a} в данной системе уравнений — оператор поворота, также называемый фазным множителем.

Решая систему (4.6) для симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений можно получить следующие соотношения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{I}_1 = \frac{1}{3}(\bar{a}^2 \bar{I}_C + \bar{a} \bar{I}_B + \bar{I}_A) \\ \bar{I}_2 = \frac{1}{3}(\bar{a}^2 \bar{I}_B + \bar{a} \bar{I}_C + \bar{I}_A) \\ \bar{I}_3 = \frac{1}{3}(\bar{I}_C + \bar{I}_B + \bar{I}_A) \\ \bar{U}_1 = \frac{1}{3}(\bar{a}^2 \bar{U}_C + \bar{a} \bar{U}_B + \bar{U}_A) \\ \bar{U}_2 = \frac{1}{3}(\bar{a}^2 \bar{U}_B + \bar{a} \bar{U}_C + \bar{U}_A) \\ \bar{U}_3 = \frac{1}{3}(\bar{U}_C + \bar{U}_B + \bar{U}_A) \\ \bar{a} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \end{array} \right. \quad (4.7)$$

Из полученного выражения следует, что несимметричная система фазных токов в рамках данного метода должна быть разложена на три трехфазные симметричные системы прямой, обратной и нулевой последовательности.

В общем случае узел нагрузки сельской электросети состоит из трёхфазных симметричных электроприёмников, которые образуют трёхфазную симметричную нагрузку и однофазных электроприемников, включенных на фазное напряжение, которые, в свою очередь образуют трехфазную несимметричную нагрузку. Если симметрирующее устройство включено непосредственно в узле нагрузки, то схема электроснабжения может быть представлена рисунком 4.16, где S_{Σ} представляет полную мощность трехфазной симметричной нагрузки; $S_{СУ}$ — полная мощность симметрирующего устройства, а $S_{Н}$ — полная мощность трехфазной несимметричной нагрузки.

Дальнейший анализ подразумевает использование в расчете показателей несимметрии токов и напряжений электросети определенных допущений, перечисленных ниже:

- система напряжений на шинах трансформатора Т1 симметрична и не зависит от нагрузки сети;
- все элементы сети, включая трансформатор и СУ, имеют линейные параметры;
- трёхфазная несимметричная нагрузка и СУ имеют статический характер.

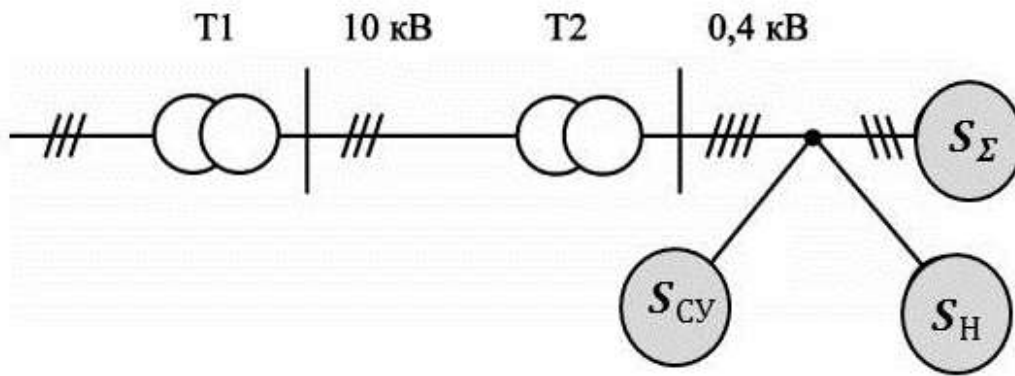


Рисунок 4.16 – Схема участка электрической сети с нагрузками и симметрирующим устройством

Для построения схемы трёхфазную несимметричную нагрузку следует заменить несимметричным источником напряжений. В результате этой замены цепь становится симметричной и разноимённые симметричные составляющие токов и напряжений не зависят друг от друга.

Схема замещения участка электрической сети с нагрузками и симметрирующим устройством (рис. 4.17) в таком случае должна состоять из следующих элементов:

- источники неизвестных напряжений $\overline{U_{на1}}, \overline{U_{нб1}}, \overline{U_{нс1}}$;
- симметричные составляющие напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей $\overline{U_{н1}}, \overline{U_{н2}}, \overline{U_{н0}}$;
- система фазных напряжений вторичной обмотки трансформатора Т1: $\overline{U'_A} = \overline{U'_A}/\overline{n}, \overline{U'_B} = \overline{U'_B}/\overline{n}, \overline{U'_C} = \overline{U'_C}/\overline{n}$;
- комплексное сопротивление прямой и обратной последовательности линии $\overline{Z'_{лн1}} = \overline{Z'_{лн2}}$;
- комплексные сопротивления трансформатора Т2: $\overline{Z'_{Т1}} = \overline{Z'_{Т2}}, \overline{Z'_{Т0}}$.

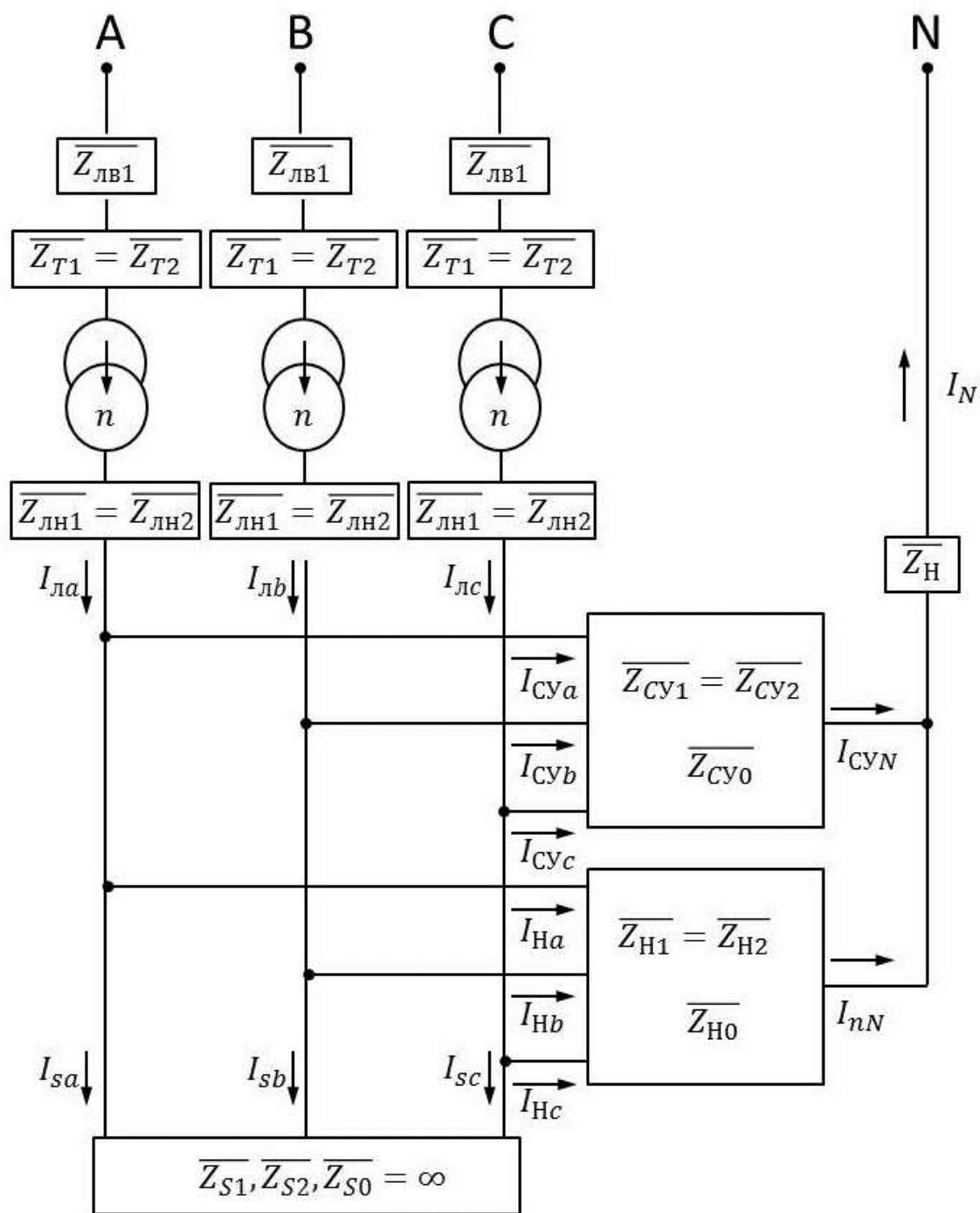


Рисунок 4.17 – Схема замещения участка электрической сети с нагрузками и симметрирующим устройством

Сопротивление трансформатора, следовательно, можно рассчитать как:

$$Z_{T1} = Z_{T2} = Z_{T*} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}, \quad (4.8)$$

где Z_{T*} — комплексное сопротивление трансформатора в относительных единицах, $S_{\text{ном}}$ — номинальная мощность трансформатора, $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора.

В симметричной цепи симметричная система напряжений вызывает симметричную систему токов той же последовательности, на основании чего можно составить независимые схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей для основной фазы. В случае если сопротивление нулевой последовательности трансформатора $Z_{T0} = \infty$, в схеме нулевой последовательности нет необходимости. Если в схеме прямой последовательности заменить активную и пассивные параллельные ветви одной эквивалентной ветвью с источником напряжения $\overline{U}_{\varepsilon 1}$ и проводимостью $\overline{Y}_{\varepsilon 1}$, то можно построить следующую схему (рис. 4.18):

Напряжение и проводимость вычисляется как:

$$\begin{cases} \overline{U}_{\varepsilon 1} = \frac{\overline{Y}_1 \cdot \overline{U}'_1}{\overline{Y}_1 + \overline{Y}_{p1}}, \\ \overline{Y}_{\varepsilon 1} = \overline{Y}_1 + \overline{Y}_{p1} \end{cases} \quad (4.9)$$

где

$$\begin{cases} \overline{Y}_1 = \frac{1}{\overline{Z}_1} \\ \overline{Z}_1 = \overline{Z}'_{\text{лв1}} + \overline{Z}'_{\text{Т1}} + \overline{Z}_{\text{лн1}} \end{cases} \quad (4.10)$$

Следующим этапом следует построить схемы прямой (рис. 4.19а), обратной (рис. 4.19б) и нулевой (рис. 4.19в) последовательностей для основной фазы симметричной цепи с СУ.

Если в схеме обратной последовательности заменить пассивные параллельные ветви одной эквивалентной ветвью с проводимостью, то можно вывести ее проводимость как $\overline{Y}_{\varepsilon 2}$:

$$\begin{cases} \overline{Y}_{\varepsilon 2} = \overline{Y}_2 + \overline{Y}_{p2} \\ \overline{Y}_2 = \frac{1}{\overline{Z}_2} \\ \overline{Z}_2 = \overline{Z}_{\text{лв2}} + \overline{Z}_{\text{Т2}} + \overline{Z}_{\text{лн2}} \\ \overline{Y}_{p2} = \overline{Y}_{\text{cy2}} + \overline{Y}_{\text{S2}} \end{cases} \quad (4.11)$$

где \bar{Y}_{p2} — комплексная проводимость обратной последовательности СУ и трёхфазной симметричной нагрузки.

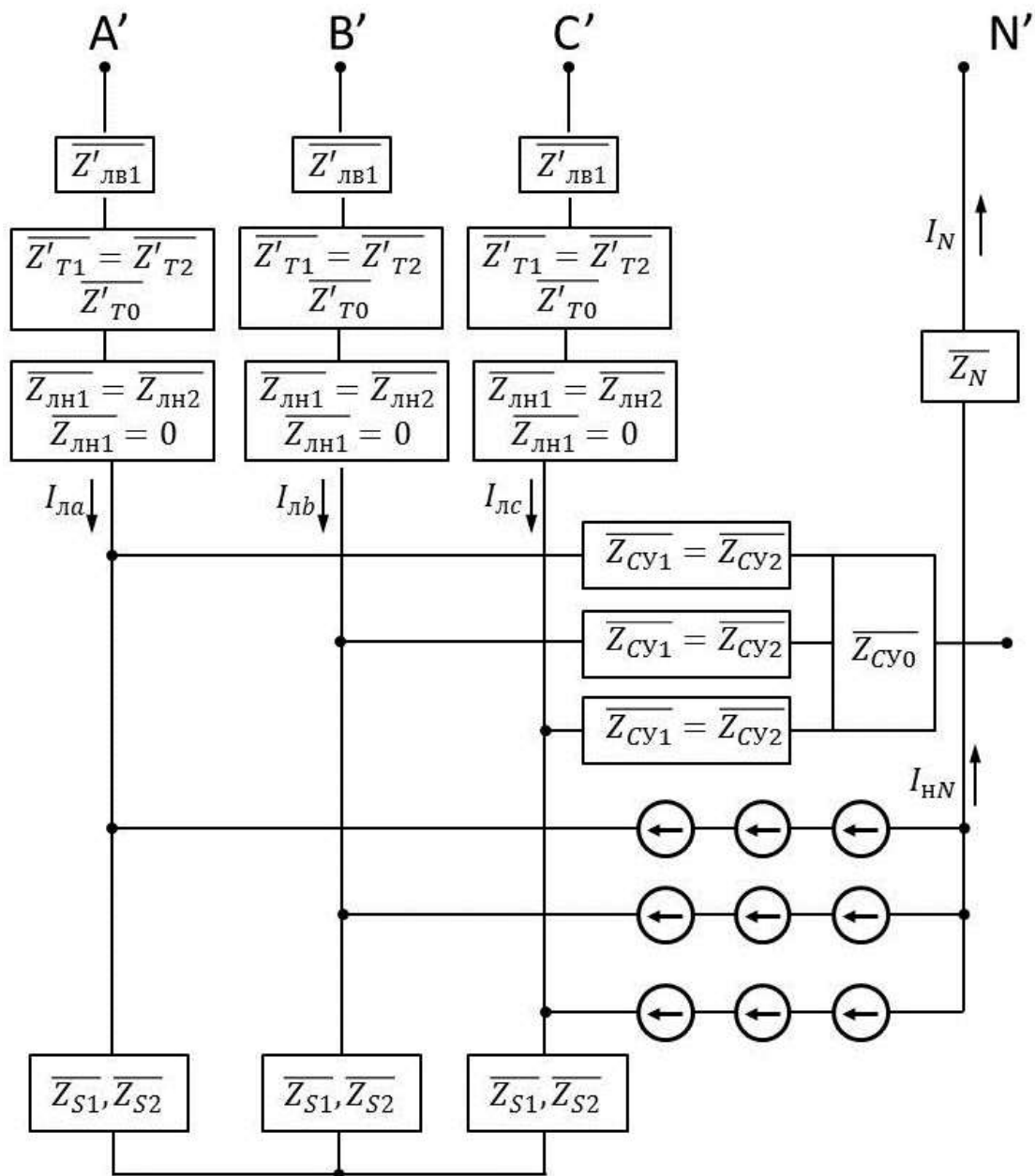
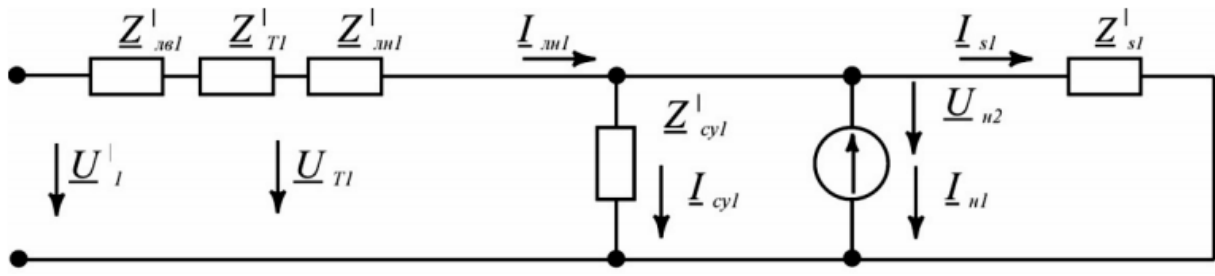
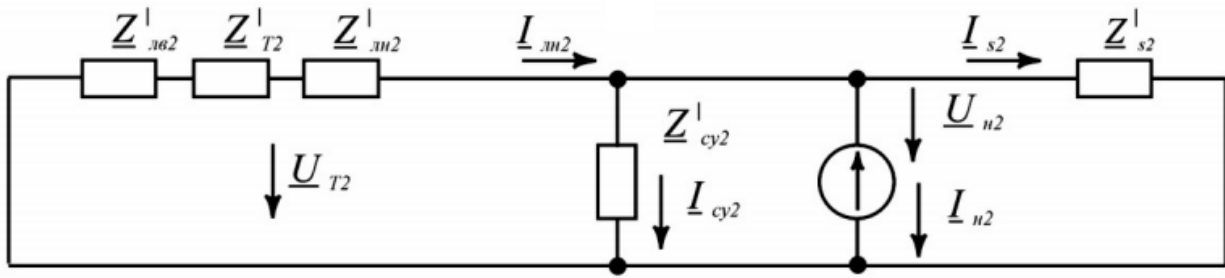


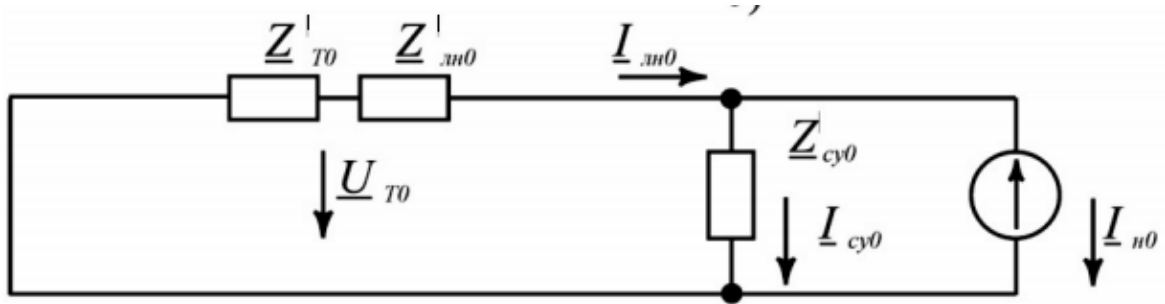
Рисунок 4.18 – Схема замещения участка электрической сети с трёхфазным несимметричным источником напряжения и приведенными параметрами



(a)



(б)



(в)

Рисунок 4.19 – Схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей для основной фазы симметричной цепи с СУ

Аналогично для схемы нулевой последовательности проводимость может быть определена как:

$$\begin{cases} \bar{Y}_{э0} = \bar{Y}_{сy0} + \bar{Y}_0 \\ \bar{Y}_0 = \frac{1}{\bar{Z}_0} \\ \bar{Z}_0 = \bar{Z}_{Т0} + \bar{Z}_{лн0} \end{cases} \quad (4.12)$$

После проведённых преобразований схем можно получить одноконтурные расчётные схемы замещения прямой, обратной и нулевой после-

довательностей (рис. 4.19) и по второму закону Кирхгофа составить следующие уравнения:

$$\begin{cases} \frac{\bar{I}_{H1}}{\bar{Y}_{\varepsilon 1}} + \bar{U}_{H1} = \bar{U}_{\varepsilon 1} \\ \frac{\bar{I}_{H2}}{\bar{Y}_{\varepsilon 2}} + \bar{U}_{H2} = 0, \\ \frac{\bar{I}_{H0}}{\bar{Y}_{\varepsilon 0}} + \bar{U}_{H0} = 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

$$\begin{cases} \bar{U}_{Ha} = \frac{\bar{I}_{Ha}}{\bar{Y}_a} \\ \bar{U}_{Hb} = \frac{\bar{I}_{Hb}}{\bar{Y}_b}, \\ \bar{U}_{Hc} = \frac{\bar{I}_{Hc}}{\bar{Y}_c} \end{cases} \quad (4.14)$$

где

$$\begin{cases} \bar{Y}_a = y_a \cdot e^{-j\varphi_a} \\ \bar{Y}_b = y_b \cdot e^{-j\varphi_b} \\ \bar{Y}_c = y_c \cdot e^{-j\varphi_c} \end{cases} \quad (4.15)$$

Выразив через симметричные составляющие (4.11) можно получить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \bar{U}_{H1} + \bar{U}_{H2} + \bar{U}_{H0} = \frac{\bar{I}_{H1} + \bar{I}_{H2} + \bar{I}_{H0}}{\bar{Y}_a} \\ \bar{a}^2 \bar{U}_{H1} + \bar{a} \bar{U}_{H2} + \bar{U}_{H0} = \frac{\bar{a}^2 \bar{I}_{H1} + \bar{a} \bar{I}_{H2} + \bar{I}_{H0}}{\bar{Y}_b} \\ \bar{a}^2 \bar{U}_{H2} + \bar{a} \bar{U}_{H1} + \bar{U}_{H0} = \frac{\bar{a}^2 \bar{I}_{H2} + \bar{a} \bar{I}_{H1} + \bar{I}_{H0}}{\bar{Y}_c} \end{cases} \quad (4.16)$$

Далее полученную систему уравнений нужно подставить значения \bar{U}_{H1} , \bar{U}_{H2} , \bar{U}_{H0} , полученные из (4.13):

$$\begin{cases} \bar{U}_{\varepsilon 1} = \bar{I}_{H1} \cdot \frac{\bar{Y}_a + \bar{Y}_{\varepsilon 1}}{\bar{Y}_a \cdot \bar{Y}_{\varepsilon 1}} + \bar{I}_{H2} \cdot \frac{\bar{Y}_a + \bar{Y}_{\varepsilon 2}}{\bar{Y}_a \cdot \bar{Y}_{\varepsilon 2}} + \bar{I}_{H0} \cdot \frac{\bar{Y}_a + \bar{Y}_{\varepsilon 0}}{\bar{Y}_a \cdot \bar{Y}_{\varepsilon 0}} \\ \bar{U}_{\varepsilon 1} \cdot \bar{a}^2 = \bar{a}^2 \bar{I}_{H1} \cdot \frac{\bar{Y}_b + \bar{Y}_{\varepsilon 1}}{\bar{Y}_b \cdot \bar{Y}_{\varepsilon 1}} + \bar{a} \bar{I}_{H2} \cdot \frac{\bar{Y}_a + \bar{Y}_{\varepsilon 2}}{\bar{Y}_a \cdot \bar{Y}_{\varepsilon 2}} + \bar{I}_{H0} \cdot \frac{\bar{Y}_b + \bar{Y}_{\varepsilon 0}}{\bar{Y}_b \cdot \bar{Y}_{\varepsilon 0}} \\ \bar{U}_{\varepsilon 1} \cdot \bar{a} = \bar{a} \bar{I}_{H1} \cdot \frac{\bar{Y}_a + \bar{Y}_{\varepsilon 1}}{\bar{Y}_a \cdot \bar{Y}_{\varepsilon 1}} + \bar{a}^2 \bar{I}_{H2} \cdot \frac{\bar{Y}_a + \bar{Y}_{\varepsilon 2}}{\bar{Y}_a \cdot \bar{Y}_{\varepsilon 2}} + \bar{I}_{H0} \cdot \frac{\bar{Y}_a + \bar{Y}_{\varepsilon 0}}{\bar{Y}_a \cdot \bar{Y}_{\varepsilon 0}} \end{cases} \quad (4.17)$$

Решение этой системы методом Крамера позволяет получить выражения для определителей $\bar{\Delta}$, $\bar{\Delta}_1$, $\bar{\Delta}_2$, $\bar{\Delta}_0$:

$$\bar{\Delta} = \frac{\bar{B}_{\Delta}}{\bar{A}_{\Delta}} \Rightarrow \bar{\Delta} = \frac{\bar{Y}_M^3 (\bar{a} - \bar{a}^2)}{\bar{Y}_a \bar{Y}_b \bar{Y}_c \bar{Y}_{\varepsilon 1} \bar{Y}_{\varepsilon 2} \bar{Y}_{\varepsilon 0}}; \quad (4.18)$$

$$\bar{\Delta}_1 = \frac{\bar{B}_{\Delta 1}}{\bar{A}_{\Delta 1}} \Rightarrow \bar{\Delta}_1 = \frac{\bar{U}_{\varepsilon 1} \cdot \bar{Y}_{H1}^3 \cdot (\bar{a} - \bar{a}^2)}{\bar{Y}_a \bar{Y}_b \bar{Y}_c \bar{Y}_{\varepsilon 2} \bar{Y}_{\varepsilon 0}}; \quad (4.19)$$

$$\bar{\Delta}_2 = \frac{\bar{B}_{\Delta 2}}{\bar{A}_{\Delta 2}} \Rightarrow \bar{\Delta}_2 = \frac{\bar{U}_{\varepsilon 1} \cdot \bar{Y}_K^2 \cdot (\bar{a} - \bar{a}^2)}{\bar{Y}_a \bar{Y}_b \bar{Y}_c \bar{Y}_{\varepsilon 0}}; \quad (4.20)$$

$$\bar{\Delta}_0 = \frac{\bar{B}_{\Delta 0}}{\bar{A}_{\Delta 0}} \Rightarrow \bar{\Delta}_0 = \frac{\bar{U}_{\varepsilon 1} \cdot \bar{Y}_L^2 \cdot (\bar{a} - \bar{a}^2)}{\bar{Y}_a \bar{Y}_b \bar{Y}_c \bar{Y}_{\varepsilon 2}}; \quad (4.21)$$

В этих выражениях \bar{Y}_M , \bar{Y}_K и \bar{Y}_L определяются как

$$\bar{Y}_M = \sqrt[3]{3\bar{Y}_a \bar{Y}_b \bar{Y}_c + \bar{Y}_{\Delta 0}^2 (\bar{Y}_{\varepsilon 2} + \bar{Y}_{\varepsilon 0}) + \bar{Y}_{E0} \bar{Y}_{\varepsilon 2} \bar{Y}_{\varepsilon 0}}; \quad (4.22)$$

$$\bar{Y}_K = \sqrt{\bar{Y}_{\varepsilon 0} \bar{Y}_{E1} - \bar{Y}_{\Delta 2}^2}; \quad (4.23)$$

$$\bar{Y}_L = \sqrt{\bar{Y}_{\varepsilon 2} \bar{Y}_{E2} - \bar{Y}_{\Delta 1}^2}; \quad (4.24)$$

где

$$\bar{Y}_{\Delta 0}^2 = \bar{Y}_a \bar{Y}_b + \bar{Y}_c \bar{Y}_b + \bar{Y}_a \bar{Y}_c; \quad (4.25)$$

$$\bar{Y}_{\Delta 1}^2 = \bar{Y}_a \bar{Y}_b \bar{a} + \bar{Y}_c \bar{Y}_b + \bar{a}^2 \bar{Y}_a \bar{Y}_c; \quad (4.26)$$

$$\bar{Y}_{\Delta 2}^2 = \bar{Y}_a \bar{Y}_b \bar{a}^2 + \bar{Y}_c \bar{Y}_b + \bar{a} \bar{Y}_a \bar{Y}_c; \quad (4.27)$$

$$\bar{Y}_{E1} = \bar{Y}_a + \bar{a} \bar{Y}_b + \bar{a}^2 \bar{Y}_c; \quad (4.28)$$

$$\bar{Y}_{E2} = \bar{Y}_a + \bar{a}^2 \bar{Y}_b + \bar{a} \bar{Y}_c; \quad (4.29)$$

Зная определители, из системы уравнений (4.17) можно вывести выражения эквивалентных проводимостей прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\begin{cases} \bar{Y}_{\varepsilon 1} = \frac{\Delta_1}{\Delta} \\ \bar{Y}_{\varepsilon 2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} \\ \bar{Y}_{\varepsilon 0} = \frac{\Delta_0}{\Delta} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \bar{Y}_{\varepsilon 1} = \frac{\bar{U}_A \bar{Y}_A + \bar{a} \bar{U}_B \bar{Y}_B + \bar{a}^2 \bar{U}_C \bar{Y}_C}{3 \cdot (\bar{U}_{\varepsilon 1} - \bar{U}_{H1})} \\ \bar{Y}_{\varepsilon 2} = \frac{-\bar{U}_A \bar{Y}_A - \bar{a} \bar{U}_C \bar{Y}_C - \bar{a}^2 \bar{U}_B \bar{Y}_B}{3 \bar{U}_{H2}} \\ \bar{Y}_{\varepsilon 0} = \frac{-\bar{U}_A \bar{Y}_A - \bar{U}_C \bar{Y}_C - \bar{U}_B \bar{Y}_B}{3 \bar{U}_{H0}} \end{cases}. \quad (4.30)$$

В результате на основе системы уравнений (4.30) можно найти проводимости СУ:

$$\begin{cases} \bar{Y}_{CY1} = \bar{Y}_{\varepsilon 1} + \bar{Y}_1 + \bar{Y}_{S1} \\ \bar{Y}_{CY2} = \bar{Y}_{\varepsilon 2} + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_{S2}, \\ \bar{Y}_{CY0} = \bar{Y}_{\varepsilon 1} - \bar{Y}_0 \end{cases} \quad (4.31)$$

Полученная система позволяет определить параметры СУ в зависимости уровня несимметрии токов и напряжений исследуемой сети, в частности напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей (4.32) и ток прямой, обратной и нулевой последовательностей (4.33):

$$\begin{cases} \bar{U}_{H1} = \frac{\bar{U}_a}{1 + K_{2UH}} \\ \bar{U}_{H2} = \bar{U}_{H1} \cdot K_{2UH} \\ \bar{U}_{H0} = \bar{U}_{H1} \cdot K_{0UH} \end{cases} \quad (4.32)$$

$$\begin{cases} \bar{I}_{H1} = \frac{\bar{I}_a}{1 + K_{2IH} + K_{0IH}} \\ \bar{I}_{H2} = \bar{I}_{H1} \cdot K_{2IH} \\ \bar{I}_{H0} = \bar{I}_{H1} \cdot K_{0IH} \end{cases} \quad (4.33)$$

где K_{2UH} и K_{0UH} — коэффициенты несимметрии напряжений, K_{2IH} и K_{0IH} — коэффициенты несимметрии токов, которые определяются отношениями параметров по обратной и нулевой последовательностей к соответствующим параметрам по прямой последовательности.

4.7 Выводы к разделу 4

1. Симметрирующие устройства и схемы автоматизации управления позволяют использовать различные ступени мощности в зависимости от изменяющейся несимметричной нагрузки потребителей.

2. Данные по несимметрии токов и напряжений на заданном участке, полученные экспериментально позволяют определить параметры симметрирующего устройства для каждого участка электросети.

3. Разработана автоматизированная система симметрирования фазных токов, которая позволяет существенно увеличить оперативность работы устройств для симметрирования фазных токов трёхфазной четырёхпроводной сети. Преимуществом разработанной схемы является достижение высокой скорости переключения однофазной нагрузки между фазами трёхфазной сети при любых уровнях несимметрии, исключая перепады напряжения.

РАЗДЕЛ 5

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В разделе 3 были рассмотрены и учтены потери сельских трехфазных электросетей, связанные с несимметрией токов и напряжений. Было показано, как возрастает нагрузка на сеть и одновременно возникает перекос фаз при активном использовании линий трансформаторных подстанций для обогрева помещений и освещения зимой, а также при проведении строительных работ с использованием электроинструмента в другие периоды года. На основе полученных формул, можно построить алгоритм расчета параметров экономической эффективности внедрения СУ в сельские электросети.

5.1 Определение суммарной мощности реактивных элементов электросети

Первым этапом работы по расчету параметров экономической эффективности внедрения СУ является определение суммарной мощности реактивных элементов (рис. 5.1).

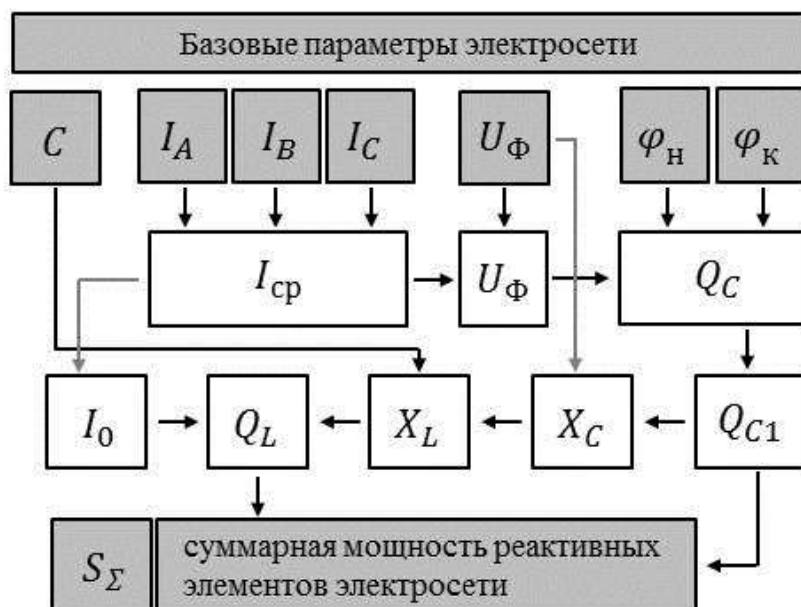


Рисунок 5.1 – Алгоритм расчета суммарной мощности реактивных элементов

Основой расчета является определение среднего значения тока на базе значений фазовых токов:

$$I_{cp} = (I_A + I_B + I_C)/3. \quad (5.1)$$

Следующим этапом на основе среднего значения тока определяется мощность фазы СУ:

$$S_{\Phi} = 3I_{cp} \cdot U_{\Phi}, \quad (5.2)$$

значение которой используется для получения мощности емкостных элементов в соответствии с выражением:

$$Q_C = S_{\Phi}(\sin(\varphi_H) - \sin(\varphi_K)), \quad (5.3)$$

где $\sin(\varphi_H)$ — значение синуса углов сдвига фаз, соответствующее начальному значению коэффициента мощности электросети, $\sin(\varphi_K)$ — значение синуса углов сдвига фаз, соответствующее конечному значению коэффициента мощности электросети.

Соответственно, мощность одной батареи конденсаторов составит треть значения Q_C :

$$Q_{C1} = Q_C/3, \quad (5.4)$$

На основе полученной мощности батареи определяются сопротивления емкости и индуктивности:

$$X_C = U_{\Phi}^2/Q_{C1}, \quad (5.5)$$

$$X_L = X_C/C. \quad (5.6)$$

Зная среднее значение тока и коэффициент нулевой последовательности токов можно определить ток нулевой последовательности:

$$I_0 = \frac{K_{0i} \cdot I_{cp}}{2}. \quad (5.7)$$

Относительная величина тока нулевой последовательности определяется как:

$$I_{0*} = \frac{K_{0i}}{2}. \quad (5.8)$$

Величины тока нулевой последовательности и сопротивления индуктивности, в свою очередь, могут быть использованы для определения мощности и индуктивности катушки:

$$Q_L = U_L \cdot I_0, \quad (5.9)$$

$$Q_L = 3X_L \cdot I_{0max}^2 \Rightarrow L = \frac{X_L}{\omega} \quad (5.10)$$

Итого, суммарная мощность реактивных элементов рассматриваемой электросети составляет:

$$S_\Sigma = 3Q_{C1} + Q_{Lmax}. \quad (5.11)$$

Таким образом, подбор элементов и оптимальной конструкции схемы СУ можно осуществить на основе данного алгоритма расчета мощности конденсаторной батареи и катушки индуктивности. Следует отметить, что низкая себестоимость и простота в изготовлении СУ позволяют данному типу устройств найти широкое применение для повышения качества электроэнергии и снижения дополнительных потерь мощности в сельских трехфазных электросетях.

5.2 Вычисление срока окупаемости симметрирующих устройств

Потери электроэнергии в сельских электросетях составляют около 20% от потребляемой сельскохозяйственными электроприемниками. Если учесть, что при этом, потери, связанные с перекосом фаз в линиях 0,38 кВ, составляют около 30%, как и потери в трансформаторах, то можно предположить, что потери от несимметрии токов и напряжений составляют до 60% от всех потерь и на них расходуется более 10% электроэнергии сельскохозяйственных сетей.

Для расчета экономической выгоды внедрения СУ в сельские электросети, возьмем за основу величину коэффициента потерь мощности, а также введем понятие начального (до симметрирования) и конечного (после внедрения СУ) коэффициента.

Начальный коэффициент потерь мощности определяется как:

$$K_{PH} = \frac{\Delta W_H}{\Delta W_S}, \quad (5.12)$$

где ΔW_H — потери электроэнергии в сети до симметрирования токов, а ΔW_S — потери, связанные только с протеканием токов прямой последовательности.

В свою очередь, конечный коэффициент потерь мощности определяется аналогично:

$$K_{PK} = \frac{\Delta W_K}{\Delta W_S}, \quad (5.13)$$

где ΔW_H — потери электроэнергии в сети после внедрения СУ.

Определим теперь уровень снижения потерь электроэнергии в сети за счет одного снижения коэффициента потерь:

$$\Delta W_{NS} = \Delta W_H - \Delta W_K \quad (5.14)$$

Если же теперь рассчитать потери в электросети после установки СУ

$$\Delta W_K = \Delta W_S K_{PK} \Rightarrow \Delta W_K = \Delta W_H \frac{K_{PK}}{K_{PH}} \quad (5.15)$$

и подставить в (5.13), то можно получить:

$$\Delta W_{NS} = \Delta W_H \left(1 - \frac{K_{PK}}{K_{PH}}\right). \quad (5.16)$$

Потери электроэнергии, которые проявляются вследствие компенсации реактивной мощности, следует вычислять с использованием выражения для коэффициента потерь мощности сети:

$$K_P^\varphi = \frac{\Delta P_\downarrow}{\Delta P_\uparrow} \Rightarrow K_P^\varphi = \frac{1}{\cos^2 \varphi}, \quad (5.17)$$

где ΔP_\downarrow — потери при $\cos \varphi < 1$, а ΔP_\uparrow — потери при $\cos \varphi > 1$.

Если обозначить значения коэффициентов мощности до и после компенсации реактивной мощности, как φ_H и φ_K , то соответствующие значения коэффициентов потерь мощности можно выразить следующим образом:

$$K_{PH}^\varphi = \frac{1}{\cos^2 \varphi_H}, \quad (5.18)$$

$$K_{PK}^\varphi = \frac{1}{\cos^2 \varphi_K}. \quad (5.19)$$

Те же коэффициенты потерь мощности можно выразить через потери электроэнергии:

$$K_{PH}^{\varphi} = \frac{\Delta W_H}{\Delta W_{\uparrow}}, \quad (5.20)$$

$$K_{PK}^{\varphi} = \frac{\Delta W_K}{\Delta W_{\uparrow}}, \quad (5.21)$$

где ΔW_H — потери электроэнергии в сети до компенсации реактивной мощности, ΔW_K — потери электроэнергии в сети после компенсации реактивной мощности, ΔW_{\uparrow} — потери электроэнергии в идеальном случае полной компенсации реактивной мощности.

$$\Delta W_{\text{крм}} = \Delta W_H - \Delta W_K \Rightarrow \Delta W_{\text{крм}} = \Delta W_H \cdot \left(1 - \frac{K_{PK}}{K_{PH}}\right). \quad (5.22)$$

Для точного вычисления снижения потерь электроэнергии вследствие внедрения СУ необходимо также учесть его собственные затраты электроэнергии $\Delta W_{\text{СУ}}$:

$$\Delta W = \Delta W_{NS} + \Delta W_{\text{крм}} - \Delta W_{\text{СУ}}. \quad (5.23)$$

Значение $\Delta W_{\text{СУ}}$ определяется через удельные потери в конденсаторах и катушке индуктивности p_C и p_L , соответственно, а также мощности конденсаторов и катушки:

$$\Delta W_{\text{СУ}} = T_M \cdot (p_C \cdot Q_C + p_L \cdot Q_L). \quad (5.24)$$

Экономический эффект от внедрения СУ можно рассчитать, если вывести формулу для срока окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = \frac{V_{\text{СУ}}}{V_{\text{э}} \cdot \Delta W - \frac{V_A}{100} \cdot V_{\text{СУ}}}, \quad (5.25)$$

$V_{\text{э}}$ — стоимость электроэнергии, $V_{\text{СУ}}$ — себестоимость СУ, A — относительные затраты на амортизацию и обслуживание. На основе $T_{\text{ок}}$ совершается учет годового экономического эффекта внедрения СУ для снижения потерь электроэнергии в линии за счет уменьшения несимметрии токов и компенсации реактивной мощности. Также, следует отметить наличие положительного экономического эффекта от повышения качества электроэнергии, эта составляющая соизмерима с получением экономического эффекта от снижения потерь мощности.

5.3 Выводы к разделу 5

1. С целью оптимизации работы сельских электросетей было предложено построить алгоритм расчета параметров экономической эффективности внедрения симметрирующих элементов.

2. Показан метод расчета суммарной мощности реактивных элементов на основе среднего значения тока, значение синуса углов сдвига фаз и других параметров электросети экспериментально полученных до и после установки симметрирующих устройств.

3. Разработана методика учета годового экономического эффекта внедрения симметрирующих устройств для снижения потерь электроэнергии в линии за счет уменьшения несимметрии токов и компенсации реактивной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бибко И. А. Снижение потерь электрической энергии в сельском хозяйстве /И. А. Бибко, С. Я. Меженных, В. Г. Стафийчук, В. Ю. Юрчук. – Киев : Урожай, 1981. – 120 с.
2. Zerriffi H. (2014). Rural electrification. Place of publication not identified: Springer.
3. Zerriffi H. (2010). Distributed Rural Electrification in Cambodia. Rural Electrification, 89-109. doi:10.1007/978-90-481-9594-7.
4. Бородин И. Ф. Мероприятия по управлению качеством электроэнергии в системах электроснабжения сельского хозяйства // И. Ф. Бородин, А. В. Виноградов, А. В. Шпаков // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. междунард. науч.-практ. конф. – М. : ВИЭСХ, 2008. – Т. 1. – С. 200-205.
5. Бородин И. Ф. Основные направления сбережения электрической энергии в сельском хозяйстве //И.Ф.Бородин// Энергосбережение в сельском хозяйстве. – М. : ВИЭСХ. –2000. – Ч.1.- 210с.
6. Бородин И. Ф. Потери электроэнергии в сельских сетях и пути их снижения / И. Ф. Бородин, А. П. Сердешнов //Техника в сельском хозяйстве. – 2002. – №1. – С. 23-26.
7. Будзко И. А. Электроснабжение сельского хозяйства/ И. А. Будзко, Т. Б. Лещинская, В. Н. Сукманов. – М. : Колос, 2000. – 560 с.
8. Будзко И. А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов / И. А. Будзко, В. Ю. Гессен, М. С. Левин. – М. : Колос, 1975. –287 с.
9. Takahashi I., Ando I., & Okita Y. (1998). Unbalance Load Compensation for a Three Phase Electrolytic Capacitor-Less Converter /Inverter. IEEE Transactions on Industry Applications, 118(11), 1260-1265. doi:10.1541/ieejias.118.1260.
10. Железко Ю. С. Научно-методические основы стратегии снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 /Железко Юрий Станиславович. – М., 1996. – 46 с.

11. Железко Ю. С. Определение симметричных составляющих по результатам измерения фазных и междуфазных напряжений / Ю. С. Железко // Электричество. – 2009. – №7. – С. 12-20.
12. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
13. Железко Ю. С. Расчет, анализ и нормирование потерь в электрических сетях: руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко А. В. Артемьев О. В. Савченко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 280 с.
14. Косоухов Ф. Д. Зависимость потерь мощности от несимметрии токов в силовых трансформаторах от их сопротивления нулевой последовательности /Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, Н. Ю. Криштопа // Известия СПбГАУ. – 2014. – №35. – С. 319-325.
15. Косоухов Ф. Д. Методика расчета потерь электроэнергии в сельских сетях 0,38 кВ при распределенной несимметричной нагрузке / Ф. Д. Косоухов, А. Г. Гущинский, М. В. Коломыцев // Известия СПбГАУ. – 2012. – №27. – С. 312-320.
16. Косоухов Ф. Д. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях: монография / Ф. Д. Косоухов, И. В. Наумов. – Иркутск, 2003. – 257 с.
17. Косоухов Ф. Д. Расчет потерь электроэнергии и показателей несимметрии токов и напряжений в сельской сети 0,38 кВ с помощью программы для ЭВМ / Ф. Д. Косоухов, А. О. Филиппов, М. В. Коломыцев // Известия СПбГАУ. – 2013. – №32. – С. 242-247.
18. Косоухов Ф. Д. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. О. Филиппов // Электротехника. – 2014. – №6. – С. 8-12.
19. Heidhin G. O. (2005). Compensation of harmonics and unbalance caused by a variable load using a dynamic phase balancer. IEE Seminar on Power - its a Quality Thing. doi:10.1049/ic.2005.0692.

20. Luo Y., Duan X., Meng F. & You, J. (2012). High Performance Repetitive Controller for Eliminating Periodic Disturbance of Inverter with Unbalance Load. 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. doi:10.1109/appeec.2012.6307610.
21. Наумов И. В. Качество электрической энергии и снижение дополнительных потерь мощности в электрических сетях / И. В. Наумов, С. В. Подъячих, Д. А. Иванов // Вестник ИрГСХА. – 2009. – №37. – С. 83-88.
22. Наумов И. В. Методика расчета показателей несимметрии токов и напряжений в сети 0,38 кВ с симметрирующим устройством / И. В. Наумов, Г.В. Лукина, С.В. Сукьясов, С.В. Подъячих // Ползуновский вестник. –2001. – № 2. –С. 49-56.
23. Наумов И. В. Несимметрия токов как причина дополнительных потерь мощности и снижения качества электрической энергии в сельской распределительной сети 0,38 кВ /И. В. Наумов, Г. В. Лукина, С. В. Сукьясов, С. В. Подъячих // Ползуновский вестник. –2001. – №2. – С. 35-38.
24. Наумов И. В. Оптимизация несимметричных режимов системы сельского электроснабжения / И. В. Наумов. – Иркутск: Изд-во «На Чехова», 2001. – 217 с.
25. Наумов И. В. Организационно - технические мероприятия в сельских распределительных сетях напряжением 0,38 кВ / И. В. Наумов, Г. В. Лукина, С. В. Сукьясов, С. В. Подъячих// Электротехника.– 2002. – № 3. – С. 56-57.
26. Наумов И. В. Практикум по электроснабжению сельского хозяйства: учебное пособие / И. В. Наумов, М. Р. Василевич, Г. В. Лукина. – Иркутск: ИрГСХА, 2000. –106 с.
27. Наумов И. В. Симметрирующее устройство для трехфазной четырехпроводной сети с регулируемыми параметрами / И. В. Наумов, Д. А. Иванов // Вестник КрасГАУ. – 2007. – №4. – С. 191-194.
28. Наумов И. В. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с по-

- мощью симметрирующих устройств: дис. докт. техн. наук: 05.20.02 / Наумов Игорь Владимирович. – Иркутск, 2002. – 387 с.
29. Наумов И. В. Функционирование электрических распределительных сетей низкого напряжения Монголии в условиях низкого качества электроэнергии / И. В. Наумов, Н. В. Васильев, Дамдинсурен Гантулга // Известия СПбГАУ. – 2012. – №26. – С. 427-432.
 30. Левин М. С. Качество электрической энергии сельских районов / М. С. Левин, А. Е. Мурадян, Н. Н. Сырых. – М.: Энергия, 1975. – 224 с.
 31. Майер В. Я. Исследование влияния симметричного и несимметричного отклонения напряжения на эксплуатационные характеристики асинхронного двигателя/ В. Я.Майер // Промышленная энергетика. – 1993. –№ 9. –С. 30-34.
 32. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения /Межгос. совет по стандартизации, метролог. и сертифицик. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
 33. Косоухов Ф. Д. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях: монография / Ф. Д. Косоухов, И. В. Наумов. – Иркутск, 2003. – 257 с.
 34. Naque R. U., Leng S., Perera N. & Salmon, J. (2014). Voltage balancing networks for floating voltage source converters using transformer coupled asymmetrical bridges. IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. doi:10.1109/iecon.2014.7049168.
 35. Li Y. & Crossley, P. A. (2013). Scott transformer based voltage balancing in low voltage distribution networks. 2013 IEEE Grenoble Conference. doi:10.1109/ptc.2013.6652417.
 36. Howell B., Koltick D. & Kobayashi M. (1990). Crimping: A wire fastening technique in wire chamber construction. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 289(1-2), 185-193. doi:10.1016/0168-9002(90)90258-8.

37. Маркушевич Н. С. Качество напряжений в городских электрических сетях/Н. С. Маркушевич, Л. А. Солдаткина. – М.: Энергия, 1975. – 256 с.
38. Майер В. Я. Исследование влияния симметричного и ессимметричного отклонения напряжения на эксплуатационные характеристики асинхронного двигателя/ В.Я.Майер // Промышленная энергетика. – 1993. –№ 9. –С. 30-34.
39. Мельников Н. А. Несимметрия напряжений в промышленных электрических сетях / Н.А. Мельников, Л.А. Солдаткина. – М.: Энергия, 1975. – 78 с.
40. Милях А. Н. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях / А. Н. Милях, А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – Киев: Наукова думка, 1973 – 75 с.
41. Жежеленко И. В. Оценка надёжности электрооборудования при пониженном качестве электроэнергии / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, А. В. Горпинич // Вести в электроэнергетике. – 2006. – №6. – С. 13-17.
42. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – 3-е изд., перераб. и доп. / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
43. Гантулга Дамдинсурэнгийн. Способы нормализации качества и снижения потерь электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кв монголии: дис. канд. техн. наук: 05.20.02 / Гантулга Дамдинсурэнгийн. – Иркутск, 2015. – 190 с.
44. ГОСТ 11677-85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия / Государственный комитет СССР по стандартам. – Москва: Издательство стандартов, 2002. – 39 с.
45. ГОСТ 3484.1-88 Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний / Государственный комитет СССР по стандартам. – Москва: Издательство стандартов, 1989 – 40 с.
46. А. Сердешнев, И. Протсовицкий, Ю. Леус, П. Шумера. Симметрирующее устройство для трансформаторов. Средство стабилиза-

ции напряжения и снижения потерь в сетях 0,4 кВ. // Новости электротехники -2005. - №31. - С. 69-71.

47. А.С. №557425 СССР. Трехфазный трансформатор с пофазным регулированием напряжения / Л. В. Лейтес, А. С. Митрошина, Л. М. Пестряева и М. А. Рогацкин – Оpubл. В Б.И., 1977 - №17.
48. А. С. №862313 СССР. Симметрирующее устройство для трехфазной четырехпроводной электрической сети / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, И. В. Мостовяк, А. В. Самков. – Оpubл. в Б.И.,1981. – №33.
49. А.С. №729750 СССР. Фильтросимметрирующее устройство / Ю.С. Михайлец. – Оpubл. в Б.И., 1980. – № 15.
50. А.С. №801187 СССР. Устройства для симметрирования токов в трехфазной сети с нулевым проводом / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, И. В. Мостовяк, А. В. Самков. – Оpubл. в Б.И.,1981. – № 4.
51. Красник, В. В. Автоматические устройства по компенсации реактивной мощности в электросетях промышленных предприятий / В.В. Красник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
52. Иванов Д. А. Повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ, питающихся от тяговых подстанций железных дорог: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Иванов Дмитрий Александрович. – Красноярск, 2008. – 200 с.
53. Шидловский А. К. Симметрирование однофазных и двухплечевых электротехнологических установок / А. К. Шидловский, Б. П. Борисов. – Киев: Наукова думка, 1977. – 160 с.
54. Шидловский А.К. Симметрирующее устройство с трансформаторными фазосдвигающими элементами / А.К. Шидловский, Г.А. Москаленко. – Киев: Наукова думка, 1981. – 204 с.
55. Шидловский А.К. Анализ и принципы построения пофазно – управляемых устройств коррекции режимов трехфазных сетей с нулевым проводом / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, В.А. Невский. – Киев: ИЭД АН УССР, 1982. – 62 с.

56. Шидловский, А. К. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, В.Г. Николаенко. – Киев: Наукова думка, 1987. – 173 с.
57. Zhelezko Yu.S. Powerinelectricalnetworksdependingo-nweatherconditions / Yu.S. Zhelezko, V.A. Kostyushko, S.V. Krylov, E.P. Nikiforov, O.V. Savchenko, L.V. Timashova, E.A. Solomonik // Power Technology and Engineering. – 2005. – Т. 39. –№1. – С. 51-56.
58. Zhelezko Yu.S. Calculation of energy loss in power systems with reversal interconnection / Yu.S. Zhelezko, O.V. Savchenko // Электричество. – 1995. – №3. – С. 37-40.
59. Kartashev I.I. A method for instrumental detecting distortion sources of voltage and determining their influence on the electric power quality / I.I. Kartashev, I.S. Ponomarenko, S.Yu. Syromyatnikov, L.L. Guk // Электричество. – 2001. – №3. – С. 2-7.
60. Losi A., & Russo, M. (n.d.). A simulation tool for evaluating technical and economical issues in the deregulated electric power industry. 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134). doi:10.1109/pess.2000.867340.

Научное издание

Виктор Иванович Чарыков
Фаниль Раилевич Фахргалеев
Владимир Иванович Мошкин

**СИММЕТРИЗАТОР ТОКА:
ТЕОРИЯ,
РАСЧЕТ,
КОНСТРУКЦИЯ**

Монография

В авторской редакции

Подписано в печать 03.08
Печать цифровая
Заказ № 149

Формат 60x84 1/16
Усл. печ. л. 8,0
Тираж 100

Бумага 80 г/м²
Уч.-изд.л. 8,0

Библиотечно-издательский центр КГУ.
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.
Курганский государственный университет.