

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 84 с., 22 рис., 20 табл., 38 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: качество электрической энергии, коэффициент несимметрии напряжения, несимметрия, потери электроэнергии, симметрирующее устройство, электрическая сеть низкого напряжения.

Объектом исследования являются мероприятия и средства компенсации несимметрии в сетях 0,4-10 кВ.

Цель работы – разобраться в причинах возникновения несимметрии в сетях низкого напряжения, рассмотреть её влияние на электрооборудование и определить наиболее эффективные мероприятия и средства компенсации несимметрии.

В процессе выполнения работы проведено исследование несимметрии в трехфазных сетях и выбор оптимальных методов компенсации несимметрии.

Степень внедрения: высокая.

Область применения: электрические сети и системы.

Экономическая эффективность работы заключается в повышении эффективности передачи электрической энергии в трехфазных сетях и снижении потерь, связанных с несимметрией напряжения, у потребителей.

Обозначения и сокращения

АД – асинхронный двигатель

ИУ – индуктивное устройство

КБ – конденсаторная батарея

КЗ – короткое замыкание

КПД – коэффициент полезного действия

КЭ – качество электрической энергии

МДС – магнитодвижущая сила

РТ – распределительный трансформатор

СУ – симметрирующее устройство

ТС – техническое средство

ФСУ – фильтро-симметрирующее устройство

ШСУ – шунто-симметрирующее устройство

ЭА – электромагнитный аппарат

Оглавление

Введение.....	17
1 Параметры качества электрической энергии	18
1.1 Нормирование параметров качества электрической энергии	18
1.2 Влияния отклонений параметров	19
1.3 Несимметрия напряжений в трехфазных системах.....	20
1.4 Нормирование коэффициентов несимметрии.....	22
2 Влияние несимметрии напряжения.....	23
2.1 Влияние на работу асинхронных двигателей.....	24
2.2 Влияние на потери в линиях электропередач	26
2.3 Влияние на трансформаторы	26
2.4 Влияние на конденсаторные батареи.....	27
2.5 Влияние на выпрямители	28
3 Анализ методов и средств компенсации несимметрии в сетях 0,4-10 кВ....	28
3.1 Уменьшение потерь в нулевом проводе	29
3.2 Изменение схемы обмоток распределительного трансформатора	30
3.3 Перераспределение нагрузок по фазам.....	35
3.4 Применение элементов-посредников.....	39
3.5 Устройства компенсации токов обратной последовательности	40
3. 6 Симметрирующие устройства с автоматическим управлением	42
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Ошибка! Закладка не определена.
4.1 Техничко-экономическое обоснование НТИ Ошибка! Закладка не определена.	
4.2 Определение трудоемкости работ... Ошибка! Закладка не определена.	
4.3 Расчет бюджета НТИ	Ошибка! Закладка не определена.
4.4 Анализ и оценка уровня НТИ	Ошибка! Закладка не определена.
5 Социальная ответственность	Ошибка! Закладка не определена.
5.1. Производственная безопасность Ошибка! Закладка не определена.	
5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.1.2 Электромагнитные поля и излучения	Ошибка! Закладка не определена.

5.1.3 Акустический шум.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.1.4 Освещение	Ошибка! Закладка не определена.
5.1.5 Микроклимат.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.1.6 Электробезопасность.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.2 Чрезвычайные ситуации.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.3 Экологическая безопасность.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.3.1 Утилизация твердых отходов	Ошибка! Закладка не определена.
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Ошибка! Закладка не определена.
Заключение	47
Список литературы	49
Приложение А	53

Введение

Современное развитие России, характеризующееся увеличением мощности нагрузок на предприятиях, автоматизацией производственных процессов, ростом коммунально-бытовых нагрузок, ведет за собой ухудшение качества электрической энергии в системах электроснабжения и как следствие к снижению эффективности работы и сокращения срока службы как электроприёмников, так и самих систем электроснабжения.

Одной из причин ухудшения качества электрической энергии является несимметрия напряжений в сети и на зажимах оборудования, которая является следствием нерационального распределения большого количества несимметричных и нелинейных потребителей.

Увеличение несимметрии ведет к увеличению потерь в энергетическом оборудовании при передаче и потреблении электрической энергии, а также к сокращению срока службы оборудования. В следствии этого исследование возникновения и компенсации несимметрии, а также определение наиболее эффективных методов ее снижения является весьма актуальной задачей в электроэнергетике.

1 Параметры качества электрической энергии

1.1 Нормирование параметров качества электрической энергии

В настоящее время КЭ нормируется согласно действующему межгосударственному стандарту ГОСТ 32144-13 [1], принятый взамен национального стандарта ГОСТ 54149-10 [2].

Настоящий стандарт устанавливает показатели и нормы качества электрической энергии в точках передачи её потребителям на низком, среднем и высоком напряжении переменного тока частотой 50 Гц [1].

Стандарт применяется при установлении норм КЭ в системах электроснабжения общего назначения, присоединённых к Единой энергетической системе; изолированных систем электроснабжения общего назначения.

К установленным и нормируемым показателям качества электроэнергии относятся частота, значение и формы напряжения, а также симметрия напряжения в трехфазных системах электроснабжения. Данные характеристики подвержены изменениям из-за изменений нагрузки, создаваемых отдельными видами оборудования, и возникновения различного рода авариями.

Согласно [1], изменения характеристик напряжения электропитания подразделяют на две категории - продолжительные изменения характеристик напряжения и случайные события. Первые представляют собой длительные отклонения характеристик напряжения от номинальных значений и обусловлены, в основном, изменениями нагрузки или влиянием нелинейных нагрузок. Случайные события - внезапные и значительные изменения формы напряжения, приводящие к отклонению его параметров от номинальных. Данные изменения напряжения, как правило, вызываются непредсказуемыми событиями (например, повреждениями оборудования пользователя электрической сети) или внешними воздействиями (например,

погодными условиями или действиями стороны, не являющейся пользователем электрической сети).

В свою очередь продолжительные изменения характеристик напряжения подразделяются на:

- 1) Отклонение частоты;
- 2) Медленные изменения напряжения;
- 3) Колебания напряжения и фликер (продолжительность менее 1 минуты), в том числе одиночные быстрое изменения напряжения, обусловленные возникновением фликера;
- 4) Несинусоидальность напряжения;
- 5) Несимметрия напряжений в трехфазных системах.

Случайные события включают в себя:

- 1) Прерывания напряжения;
- 2) Провалы напряжения и перенапряжения;
- 3) Импульсные напряжения.

1.2 Влияния отклонений параметров

Длительная работа электроприёмников обеспечивается при номинальных электрических параметрах режима (f_n , U_n , I_n и т.д.), также при этом их технико-экономические показатели приобретают наивысшие значения. Тем не менее в сетях, при передачи электроэнергии от станции к потребителям, имеет место изменение параметров напряжения, о которых говорилось в [п. 1.1] данной работы.

Отклонение той или иной характеристики влияет на работу электроприёмников, поэтому можно говорить о непосредственной связи качества электроэнергии с экономичностью производства, поскольку отклонения приводят к снижению КПД, коэффициента мощности, производительности, повышению потерь электрической энергии и сокращению срока службы электрооборудования и т.д.

Кроме того, качество электроэнергии влияет на саму продукцию и на её качество, так как отклонение показателей КЭ от номинальных ведет к нарушению технологических процессов (нагрева, прокатки, обработки и т.д.)

Также КЭ связано с проблемами в социальной сфере. Например, снижение освещенности, при недопустимом отклонении напряжения, что негативно влияет на органы зрения людей. Вдобавок, появление в сетях электроснабжения высших гармоник ведет к нарушению радио и телевизионной аппаратуры. Более того, высокочастотная вибрация рабочего инструмента, вызванная наличием в сети высших гармоник, приводит к различным профессиональным заболеваниям.

1.3 Несимметрия напряжений в трехфазных системах

В данной работе рассматривается подробнее такое отклонение характеристики напряжения, как несимметрия напряжений, так как в электрических сетях России имеет место работа в несимметричном режиме. Это объясняется наличием в трехфазных системах электроснабжения потребителей, симметричное исполнение которых невозможно или экономически нецелесообразны. К таким установкам относятся тяговые нагрузки, электросварочные агрегаты, дуговые и индукционные печи, а также потребителей коммунально-бытовой сферы. Как пример коммунально-бытовой сферы, на рисунке 1.1 приведен суточный график пофазного потребления активной мощности многоквартирного дома, в котором к каждой фазе подключено практически одинаковое количество квартир. Также на рисунке 1.1, как пример, показана разность потребления электроэнергии в один момент времени фазы А и фазы С.

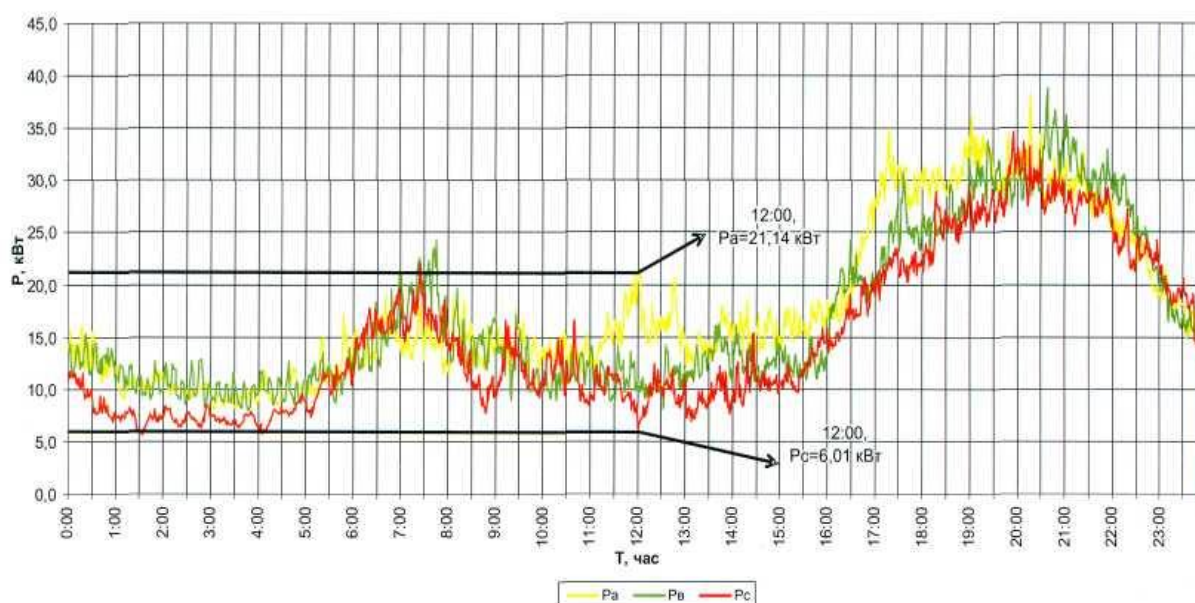


Рисунок 1.1 – Суточный график пофазного потребления активной мощности многоквартирного дома

Кроме перечисленных, причиной несимметрии могут служить аварийные ситуации в сетях, таких как несимметричные КЗ или обрывы фаз. В силу этого происходит так называемая неслучайная несимметрия или «перекос фаз», который представляет собой перегрузку одних фаз, и недогрузку других.

Для устранения неслучайной несимметрии в сетях следует на стадии проектирования разработать схему равномерного подключений нагрузок. При этом необходимо учитывать их мощности и графики работ. Согласно [3] равномерное распределение нагрузок в сетях низших напряжений обеспечивает снижение потерь в сетях на 15-20%.

Однако случайные включения и отключения нагрузок определяют наличие, помимо неслучайной несимметрии, случайную или вероятностную. Такая несимметрия изменяется во времени независимо от изменения самих нагрузок.

Таким образом даже в сетях с равномерным распределением нагрузок будет иметь место несимметричный режим, основной составляющей которой будет вероятностная несимметрия.

1.4 Нормирование коэффициентов несимметрии

В соответствии с ГОСТом 32144-13 [1], несимметрия трехфазной системы напряжений оценивается такими показателями КЭ как: коэффициент несимметрии по обратной $K_{2U}, \%$ и нулевой последовательности $K_{0U}, \%$.

Коэффициенты несимметрии обратной и нулевой последовательности являются нормированными показателями качества. Согласно [1], КЭ по коэффициентам несимметрии считают соответствующими требованиям данного стандарта, если усредненные в интервале 10 минут значения коэффициентов не превышают 2% в течении 95% времени в одну неделю, и не выходят за пределы 4% в течении 100% этого интервала.

Данные нормы являются обязательными для всех режимов работы электроснабжения, исключением являются лишь режимы, обусловленные непредвиденными обстоятельствами.

Значения коэффициентов несимметрии напряжения измеряется в процентах и находятся по формулам:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%; K_{0U} = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100\%, \quad (1.1; 1.2)$$

где U_2 – напряжение обратной последовательности;

U_0 – напряжение нулевой последовательности;

U_1 – напряжение прямой последовательности.

Помимо нормируемого показателя – коэффициента несимметрии напряжения, существует ненормируемый – коэффициент несимметрии токов, которые определяются как:

$$K_{2I} = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100\%; K_{0I} = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100\%, \quad (1.3; 1.4)$$

где I_2 – ток обратной последовательности;

I_0 – ток нулевой последовательности;

I_1 – ток прямой последовательности.

Коэффициенты несимметрии характеризуют отклонения от симметрии токов и напряжений трехфазной системы основной частоты.

2 Влияние несимметрии напряжения

При нарушении симметрии многофазной системы, последнюю можно разложить на три симметричные – систему прямой последовательности и накладываемые на неё системы обратной и нулевой последовательности [4]. Векторные диаграммы систем представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Векторные диаграммы прямой, обратной и нулевой последовательности

Прямую последовательность составляют три вектора A_1 , B_1 и C_1 , которые имеют одинаковый модуль, но при этом сдвинутые друг относительно друга на 120 градусов, причем A_1 опережает B_1 , а B_1 в свою очередь опережает C_1 . Обратная последовательность аналогична прямой, отличием является то, что вектор A_2 опережает C_2 , который опережает B_2 . Нулевая последовательность образована векторами одинаковыми как по модулю, так и по направлению.

Наличие обратной приводит к изменению абсолютных значений как фазных, так и линейных напряжений. Наложение же нулевой

последовательности влечет за собой смещение нейтрали, при которой возникает несимметрия только фазных напряжений. Оба случая представлены на рисунках 2.2 и 2.3 соответственно.

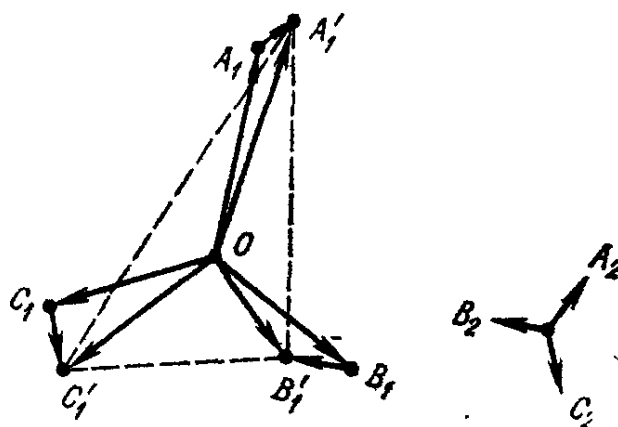


Рисунок 2.2 – Наложение обратной последовательности на прямую

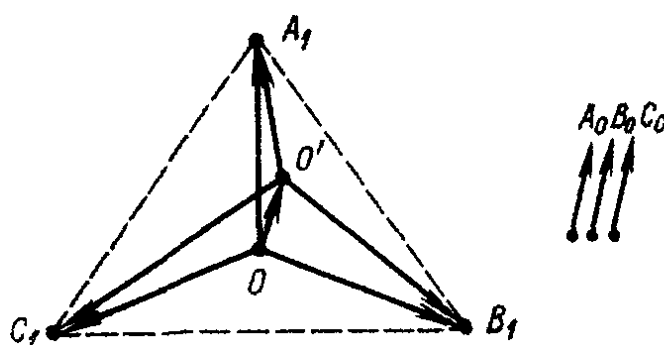


Рисунок 2.3 – Наложение нулевой последовательности на прямую

2.1 Влияние на работу асинхронных двигателей

Большим количеством нагрузок являются вращающиеся машины, большую часть которых состоит из асинхронных двигателей, несимметрия напряжения в которых приводит к появлению дополнительного нагрева, увеличению потерь мощности и уменьшению их срока эксплуатации [5].

При возникновении несимметрии система обратной последовательности создаёт обратное магнитное поле, которое вращается в противоположную сторону поля прямой последовательности, в следствие этого возрастает значение скольжения [6]. То есть, обратная составляющая поля уменьшает

результатирующий вращающий момент, тем что создаёт противодействующий, тормозящий момент, что приводит к снижению производительности двигателя. Зависимость момента АД от скольжения при неизменном моменте нагрузки показана на рисунке 2.4.

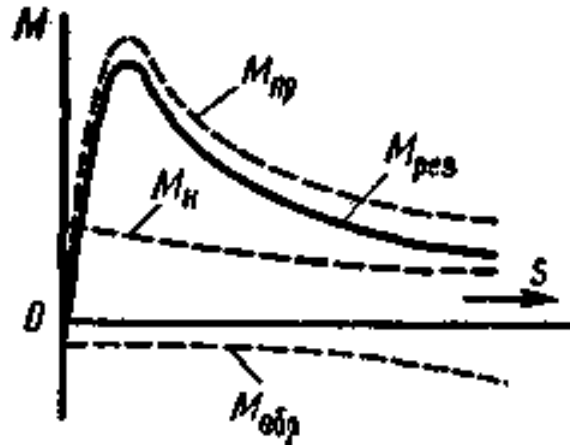


Рисунок 2.4 – Зависимость моментов АД от скольжения

Кроме того, так как сопротивление обратной последовательности АД много меньше (5-7 раз) сопротивления прямой последовательности, то наличие небольшого искажения симметрии обуславливает возникновение значительного тока обратной последовательности, при протекании которого увеличивается нагрев обмоток и снижается КПД. Зависимость КПД от коэффициента несимметрии показана на рисунке 2.5.

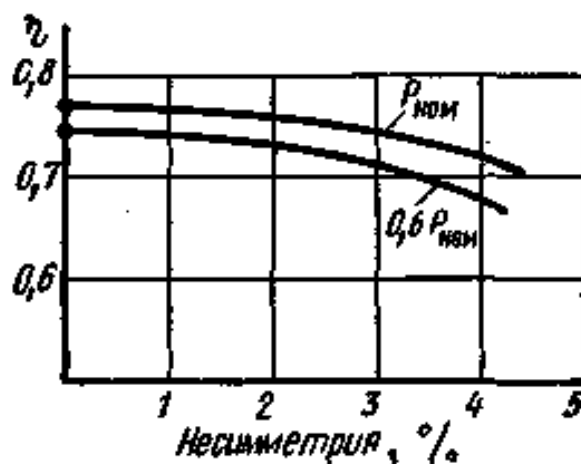


Рисунок 2.5 – Зависимость КПД АД от коэффициента несимметрии

В свою очередь увеличение нагрева влечет за собой увеличение потерь, которые согласно [7] составляют около 37% от общих потерь в двигателе. Согласно [8], увеличение нагрева, которое обусловлено уровнем

несимметрии в 4% ведет к более быстрому старению изоляции, что снижает срок эксплуатации в 2 раза.

2.2 Влияние на потери в линиях электропередач

Передачи электроэнергии по линиям электропередач низкого напряжения в несимметричном режиме ведёт к значительному увеличению потерь [9, 10]. Данное утверждение подтверждается сравнением потерь на нагрев симметричного и несимметричного режимов.

Потери энергии на нагрев в симметричном режиме трехфазной сети составляют:

$$\Delta P = I_A^2 \cdot r_A + I_B^2 \cdot r_B + I_C^2 \cdot r_C = 3I^2 \cdot r, \quad (2.1)$$

тогда как при несимметричном режиме потери равны:

$$\Delta P = I_A^2 \cdot r_A + (I_B - \Delta I)^2 \cdot r_B + (I_C - \Delta I)^2 \cdot r_C, \quad (2.2)$$

результаты расчета приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчета потерь в ЛЭП

Режим	I_A, A	I_B, A	I_C, A	Потери, кВт
Симметричный	600	600	600	1080
Несимметричный	645	570	585	1083,15

Примечание: активное сопротивление линии принято равным 1 Ом, для упрощения расчетов.

Расчеты, представленные в таблице 1 показывают увеличение потерь в линиях на нагрев при несимметрично загруженных фазах.

2.3 Влияние на трансформаторы

При подведении несимметричных напряжений к трансформатору или подключении несимметричной нагрузки возникают токи нулевой последовательности, посредством которых создаются магнитные потоки, которые пронизывают железо трансформатора и дополнительно разогревают его, а это в свою очередь ухудшает охлаждение активной части. Плохой

отвод тепла от активной части вызывает ещё больший нагрев изоляции, вплоть до того, что при загрузке трансформатора ниже номинальной мощности он может оказаться перегруженным. Такое влияние вынуждает увеличивать установленную номинальную мощность трансформаторов, что является экономически невыгодным.

В трансформаторах с большим значением сопротивления нулевой последовательности при работе в несимметричном режиме дополнительные потери от магнитных полей нулевой последовательности составляют около 30% потерь холостого хода [11].

2.4 Влияние на конденсаторные батареи

Подключение конденсаторной батареи к сети, работающей в несимметричном режиме, может вызвать ещё большую несимметрию. При таком подключении каждая фаза батареи загружается разным значением реактивной мощности, что приводит к изменению общей мощности, потери при этом так же распределяются неравномерно. В свою очередь, снижение общей мощности КБ, в следствии жесткой связи с квадратом напряжения, ведет к ещё большему пофазному снижению напряжения, что приводит к ещё более значительному искажению симметрии режима работы сети.

Такая неравномерность уменьшает располагаемую мощность [7,10] конденсаторной установки относительно номинальной. Располагаемая мощность определяется как [3]:

$$Q_{\text{расп}} = Q_{\text{н}}(1 + k_U^2) \left(\frac{U'}{U_{\text{max}}} \right)^2, \quad (2.3)$$

где U_{max} – напряжение наиболее загруженной фазы установки;

U' – рабочее напряжение конденсаторной установки;

k_U – коэффициент несимметрии.

2.5 Влияние на выпрямители

Искажение симметрии также отрицательно влияет на работу многофазных выпрямителей, так как в выпрямителях протекают различные токи и как результат допустимая мощность выпрямителя уменьшается, так как не все выпрямители оказываются загруженными.

Кроме того, несимметрия вызывает возникновение в выпрямленном токе пульсаций удвоенной частоты. Амплитуда таких пульсаций пропорциональна коэффициенту несимметрии. Эти пульсации резонируют в фильтрах и тем самым перегружают их и выводят их из строя.

Пульсации отрицательно влияют на тяговые сети, даже без нарушения работы фильтров.

3 Анализ методов и средств компенсации несимметрии в сетях 0,4-10 кВ

Раздел «влияние несимметрии» [п. 2] показал, что так или иначе искажение симметрии приводит к увеличению потерь, снижению эффективности работы оборудования и уменьшению его срока эксплуатации, что говорит о необходимости создания условий нормальной работы оборудования, для устранения этих последствий.

Так как в данной работе рассматривается несимметрия напряжения в сети, то под условиями нормальной работы можно понимать обеспечение питания приёмников от симметричной системы напряжений или же снижения влияния на них асимметрии.

Как уже отмечалось, первоначальным решением проблемы несимметрии является равномерное распределение нагрузок в сети, к которому также относится перевод сетей 0,38 кВ в замкнутый или полужамкнутый режим.

Рассматривая первый случай – сеть замыкается от одного РТ, во втором от нескольких. Более эффективно в отношении распределения нагрузок по фазам является замыкание с питанием от одного РТ, так как на всех клеммах

трансформатора напряжение имеет одинаковую амплитуду и фазу для всех подключенных линий. Такое выравнивание снижает несимметрию вдоль замыкаемых линий. Так как значения и фазы, симметричных составляющих напряжения и токов – случайные величины, то вероятность возникновения напряжения обратной последовательности составляет 33% от незамкнутой сети. Кроме того, в перевод сетей в режим замкнутых и полужамкнутых повышает качество напряжения и уменьшает потери за счет разгрузки нулевого и фазных проводов.

Во всяком случае, для снижения основной составляющей искажения – вероятностной несимметрии [п. 1.3] распределения не достаточно. Снижение вероятностной составляющей достигается путем проведения дополнительных мероприятий и применением технических средств, обладающих данным эффектом.

Снижение основной составляющей несимметрии сводится к снижению коэффициентов несимметрии [п. 3], которое возможно осуществить многими разными способами и техническими средствами, которые условно можно разделить на 4 группы: 1 – уменьшающие сопротивление нулевой последовательности; 2 – снижающие коэффициент системы нулевой последовательности; 3 – снижение коэффициента обратной последовательности и 4 – комбинированные ТС. Далее рассмотрим подробнее некоторые мероприятия и средства.

3.1 Уменьшение потерь в нулевом проводе

Уменьшение потерь достигается снижением сопротивления, что в свою очередь достигается путем увеличения его сечения. Данное мероприятие снижает потери в нулевом проводе при протекании через него тока, однако снижение сопротивления также влечет за собой увеличение токов нулевой и обратной последовательности, т.е. приводит к увеличению коэффициента несимметрии. Кроме того, выбор сечений производится по технико-экономическим расчетам, которые обеспечивают минимизацию затрат, а

значит такой способ ведет к дополнительным капитальным вложениям. В связи с выше сказанным можно утверждать, что такое решение приводит к неоправданному удорожанию сети.

Снижение потерь и асимметрии напряжения также можно достигнуть путем уменьшения длины нулевого провода, что достигается перемещением нейтрали ближе к однофазным нагрузкам. Перемещение нейтрали обеспечивается установкой трехфазного ЭА, называемого нейтралером, обмотка которого представляет собой схему «зигзаг». Нейтралер устанавливается вблизи однофазных нагрузок, при этом до него сеть – трехпроводная с линейным напряжением, равным номинальному приёмников, а от нейтралера до однофазного приёмника сеть выполняется четырехпроводной. В сети подобного исполнения смещение нейтрали практически отсутствует, так как длина нулевого провода мала.

3.2 Изменение схемы обмоток распределительного трансформатора

В соответствии с ГОСТ 11677-85 [12] силовые трансформаторы 10(6)/0,4 кВ изготавливаются со схемами «звезда-звезда», «треугольник – звезда» и «звезда – зигзаг». Данные схемы характеризуются различными реакциями на работу в несимметричном режиме.

Сопротивления прямой последовательности трансформаторов для всех схем соединения обмоток определяются как:

$$R_1 = \frac{P_{кз}}{3I_H^2}; \quad X_1 = \sqrt{Z^2 - R_1^2}; \quad Z = \frac{U_K \cdot U_H^2}{100S_H}. \quad (3.1)$$

Тогда можно сказать, что сопротивления зависят от $P_{кз}$ и U_K , однако если обратиться к каталогам, то можно убедиться, что эти величины почти не изменяются от схем соединения, а значит и сопротивление прямой последовательности от них не зависит.

В отличие от сопротивлений прямой последовательности значения сопротивлений нулевой последовательности отличаются друг от друга в зависимости от схемы соединения обмоток.

Рассмотрим несимметричный режим работы трансформаторов с различными схемами соединения.

«Звезда-звезда с нулем»

Наиболее распространённым в сетях 0,4/10 кВ является трансформатор, имеющий схему соединения «звезда-звезда с нулем», так как они дешевле в изготовлении. Однако они совсем неэкономичны при несимметрии нагрузок.

В обмотке, соединенной в звезду без нулевой точки, протекание токов нулевой последовательности не имеет места, поэтому в режиме несимметрии токи этой последовательности протекают во вторичной обмотке. Согласно рисунку 3.1 магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются через бак трансформатора выходя за пределы сердечников, что ухудшает охлаждение и определяет значительное сопротивление нулевой последовательности, то есть: $R_0 \gg R_1$ и $X_0 \gg X_1$.

Также стоит отметить, что сопротивление нулевой последовательности такого трансформатора не поддаются расчету, так как оно зависит от конкретной конструкции трансформатора. Измерить такое сопротивление можно только экспериментально, что делает предприятие-изготовитель по просьбе заказчиков согласно ГОСТ 3484.1-88 [13].

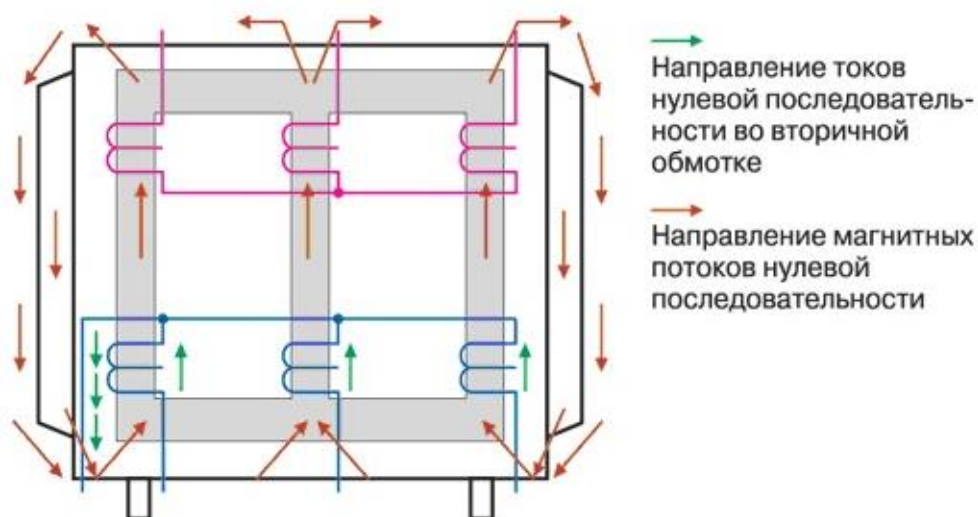


Рисунок 3.1 – Направление «нулевых» токов и магнитных потоков при схеме соединения Y/Y_n

Для устранения несимметрии в трансформаторах с такой схемой соединения применяется встраиваемое симметрирующее устройство, которое представляет собой обмотку, наложенную в виде бандаж поверх обмоток ВН трансформатора (рисунок 3.2). Обмотка СУ рассчитана на нагрузку равную полной номинальной однофазно, то есть на протекание по ней номинального тока. Согласно [14] данное устройство имеет высокую эффективность.

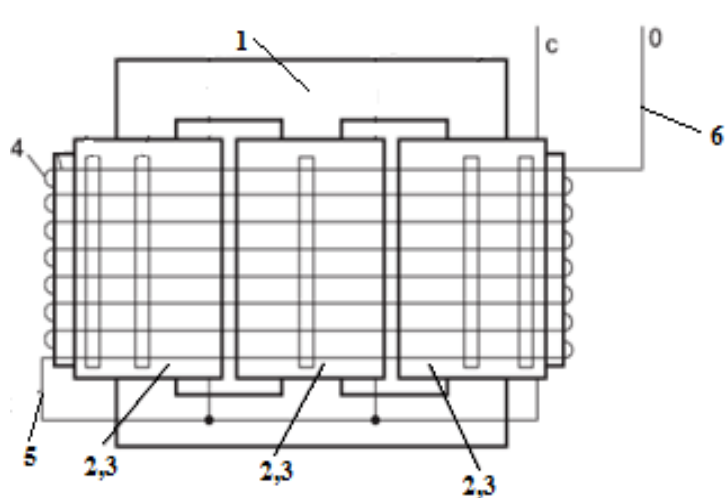


Рисунок 3.2 – Трехфазный трансформатор с симметрирующим устройством

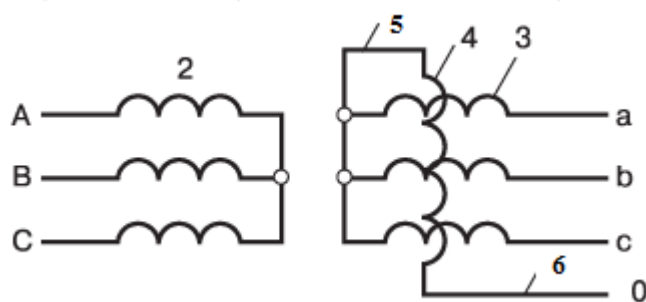


Рисунок 3.3 – Схема соединения трансформатора Y/Y_n с обмоткой симметрирующего устройства

На рисунках 3.2; 3.3 можно видеть: 1 – трехстержневой магнитопровод; 2,3 – обмотки ВН и НН; 4 – компенсационная обмотка; 5 – подключаемый к нейтрали конец компенсационной обмотки; 6 – выводимый конец компенсационной обмотки.

Принцип действия, включенного в рассечку нулевого провода СУ заключается в том, что при искажении симметрии нагрузки и появлении в рабочих обмотках токов нулевой последовательности, создающих в сердечнике МДС нулевой последовательности, компенсируются направленными встречно потоками нулевой последовательности создаваемых протеканием тока через СУ.

«Треугольник – звезда с нулём»

Теперь рассмотрим трансформатор со схемой «треугольник – звезда с нулем», в которых токи всех последовательностей протекают и в первичной, и вторичной обмотках. При этом в первичной обмотке токи нулевой последовательности замыкаются внутри «треугольника» и в сеть не попадают, а намагничивающие силы, создаваемые протеканием в первичной и вторичной обмотке токов нулевой последовательности почти полностью компенсируются, что обуславливает малую величину реактивных сопротивлений. В таком трансформаторе сопротивление нулевой последовательности можно принять как $R_0 = R_1$ и $X_0 = X_1$. Протекание

токов нулевой последовательности и направление намагничивающих сил показано на рисунке 3.4.

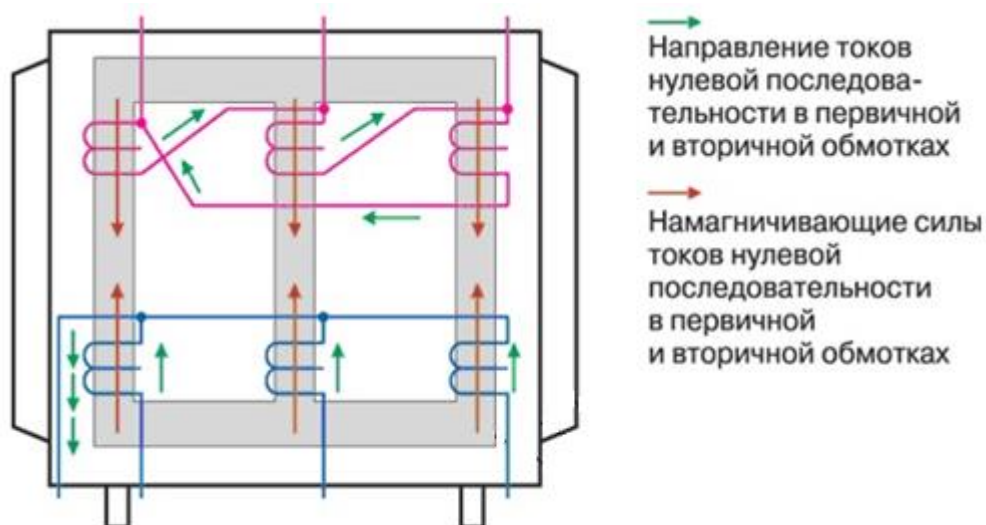


Рисунок 3.4 – Направление «нулевых» токов и магнитных потоков при схеме соединения Δ/Y_n

«Звезда – зигзаг с нулем»

В свою очередь в трансформаторах со схемой «звезда – зигзаг с нулем» в несимметричном режиме протекание токов нулевой последовательности имеет место только во вторичной обмотке. Особенностью такой схемы является в том, что протекание этих токов не создают «нулевой» магнитный поток. Эта особенность обуславливается тем, что на стержнях расположены по две вторично полуобмотки разных фаз, за счет чего создаваемые токами нулевой последовательности намагничивающие силы направлены встречно, что обеспечивает их взаимную компенсацию, как показано на рисунке 3.5. Сопротивление нулевой последовательности таких трансформаторов имеют значения меньше сопротивления прямой последовательности, т.е.: $R_0 < R_1$ и $X_0 < X_1$.

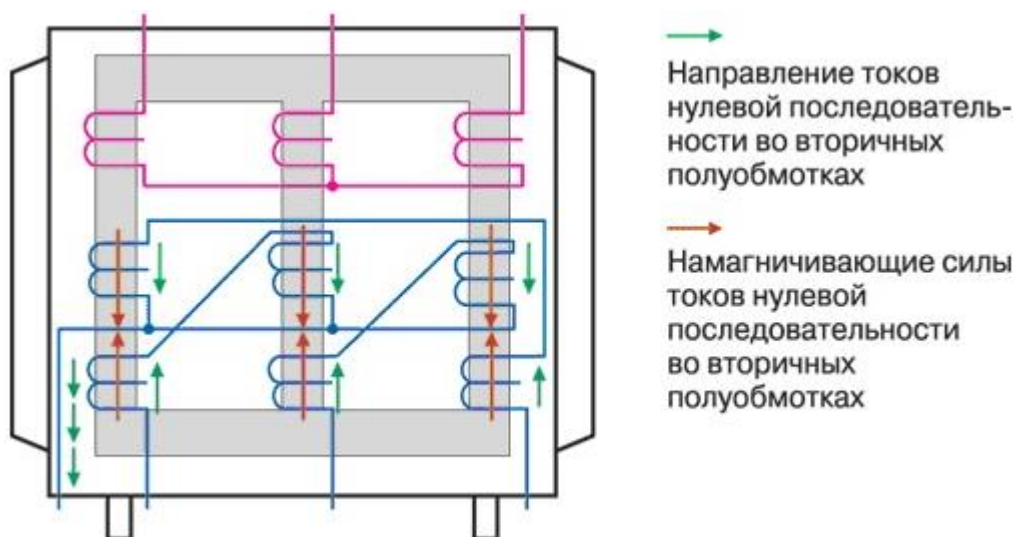


Рисунок 3.5 – Направление «нулевых» токов и магнитных потоков при схеме соединения Y/Zn

Подводя итог можно сказать, что наиболее эффективным является использование трансформаторы с обмотками «звезда – зигзаг с нулем», а при использовании схем «звезда–звезда с нулем» для уменьшения несимметрии необходимо использовать СУ в нулевом проводе.

3.3 Перераспределение нагрузок по фазам

Согласно [3] равномерное распределение нагрузок в сетях низших напряжений обеспечивает снижение потерь в них на 15-20%, однако обеспечить рациональную пофазную загрузку, на стадии проектирования, не всегда предоставляется возможным, в виду непостоянства тех или иных нагрузок, отсюда появляется необходимость регулирования «по факту».

Наиболее простым примером является примитивный трансформатор с пофазным регулированием, схема которого приведена на рисунке 3.6.

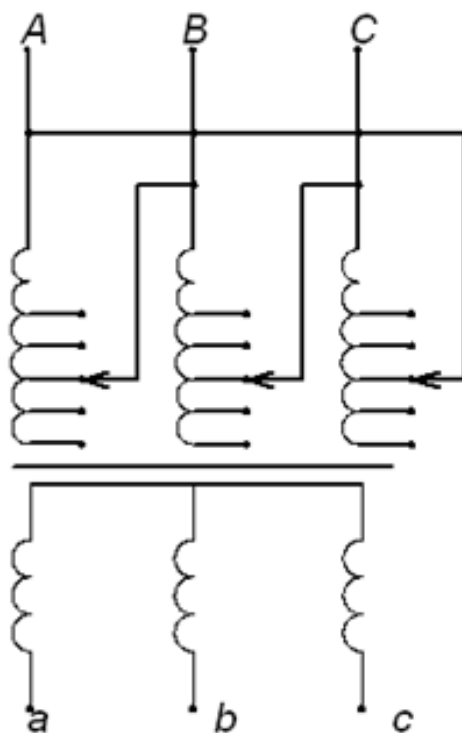


Рисунок 3.6 – Схема соединения трансформатора с пофазным регулированием

Если к трансформатору подведена симметричная система напряжений, то сдвиг между фазами составляет 120 градусов, при равных коэффициентах трансформации вторичная система напряжений также является симметричной. Если же в какой-либо фазе изменить коэффициент трансформации, то это приведет к изменению фазного напряжения на вторичной обмотке трансформатора и, как следствие, это приведет к перекручиванию системы линейных напряжений. С помощью этого можно достигать симметрирование сети. Векторная диаграмма такого трансформатора представлена на рисунке 3.7.

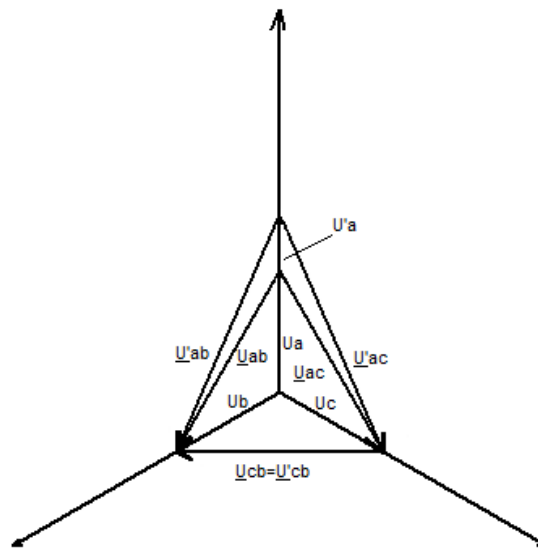


Рисунок 3.7 – Векторная диаграмма трансформатора с пофазной регулировкой

Кроме того, в целях повышения нагрузочной способности и КПД трансформатора путем уменьшения потерь от токов нулевой последовательности в каждую фазу нерегулируемых или регулируемых обмоток подключается первичная обмотка индуктивного устройства (ИУ), схема такого трансформатора [15] представлена на рисунке 3.8.

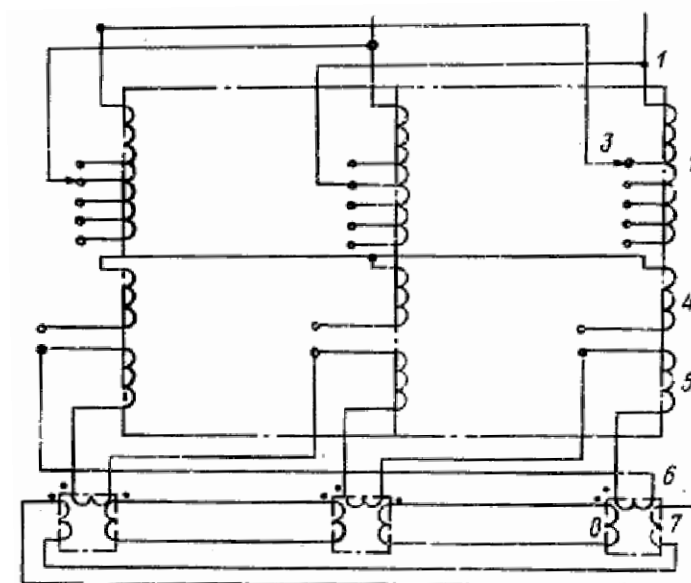


Рисунок 3.8 – Схема трансформатора при парном соединении вторичных обмоток ИУ

На рисунке 3.8 можно увидеть: 1 – магнитопровод; 2 – первичную обмотку; 3 – переключающее устройство; 4 – часть вторичной обмотки; 5 – вторая часть вторичной обмотки; 6 – первичная обмотка ИУ; 7 – магнитопровод ИУ; 8 – вторичная обмотка ИУ.

Индуктивное устройство имеет магнитопровод и, по меньшей мере, одну вторичную обмотку, соединенную одноименными концами аналогичными обмотками других фаз. Каждое из ИУ может содержать две вторичные обмотки, одна из которых соединена со вторичной обмоткой устройства второй фазы, а другая – со вторичной третьей.

При указанной схеме соединения вторичных обмоток 8 индуктивных устройств токи нулевой последовательности в них протекать не могут, поэтому магнитодвижущая сила токов нулевой последовательности первичных обмоток 6 являются лишь намагничивающими токами ИУ. При этом токи прямой и обратной последовательностей, на которые могут быть разложены токи нагрузки, могут замыкаться по вторичным обмоткам 8. Поэтому для них МДС токов первичных обмоток 6 могут быть скомпенсированы токами обмоток 8, и индуктивные устройства внесут в цепь первичных обмоток 6 лишь относительно малые сопротивления.

Помимо схемы с парным соединением вторичных обмоток разных фаз (рисунок 3.8), существует схема с параллельным соединением вторичных обмоток ИУ всех фаз. Данная схема приведена на рисунке 3.9, а работа такой схемы аналогична предыдущей.

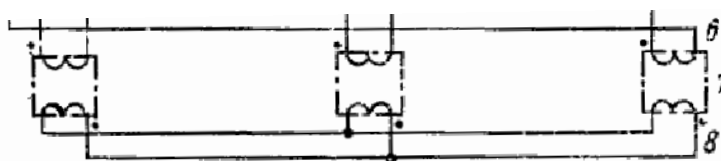


Рисунок 3.9 - Схема ИУ с параллельным соединением вторичных обмоток всех фаз

3.4 Применение элементов-посредников

Для приведения параметров электроэнергии питающей сети в соответствии с требованиями потребителей прибегают к использованию элементов-посредников. Примером такого элемента является трансформатор со схемой Скотта.

Такой трансформатор позволяет подключать двухфазную или группу однофазных нагрузок к трехфазной сети не нарушая её симметрии, что достигается схемой соединения, приведенной на рисунке 3.10.

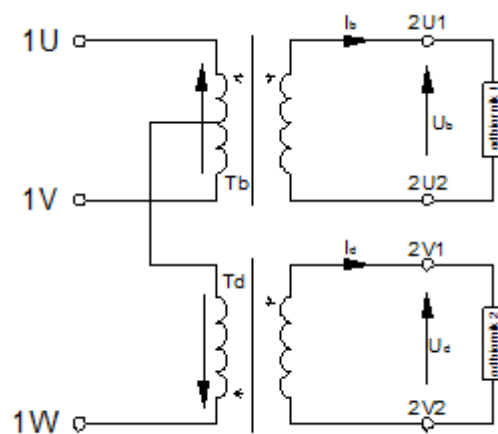


Рисунок 3.10 – Трансформаторная схема Скотта

Данная схема состоит из двух однофазных, одинаковых по мощности трансформаторов. На первичной обмотке одного из трансформаторов изготавливается ответвление, которое соединяется с концом первичной обмотки другого трансформатора. Для того, чтобы напряжения на вторичных обмотках трансформаторов были равны, трансформаторы должны питаться от симметричной сети, напряжение на первичных обмотках должны быть равны (рисунок 3.11), что достигается следующей пропорцией количества витков в первичных обмотках:

$$\frac{U_{1W-0}}{U_{1U-1V}} = \frac{Z_{1d}}{Z_b} = \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (3.2)$$

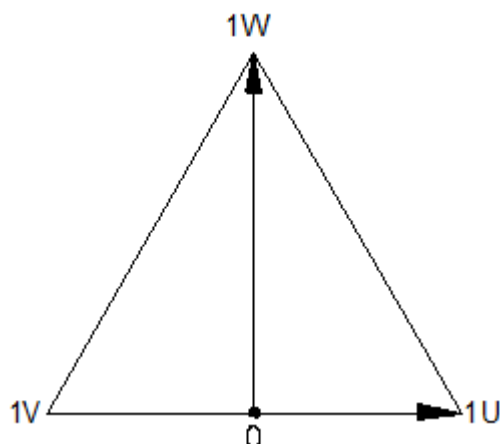


Рисунок 3.11 – Векторная диаграмма схемы Скотта

Трансформаторы с такой схемой соединения имеют широкое применение в электротермии.

3.5 Устройства компенсации токов обратной последовательности

Применение таких устройств позволяет воздействовать на токи обратной последовательности, то есть посредством таких устройств [16, 17, 18, 19] возможно снижение коэффициента K_{2I} .

Работа устройств основан на том, что индуктивно-емкостные элементы, включенные в сеть, создают и подают в эту сеть пульсирующие, совпадающие по фазе мощности для компенсации однофазных нагрузок.

Рассмотрим такие симметрирующие устройства на примере схемы, которая показана на рисунке 3.12.

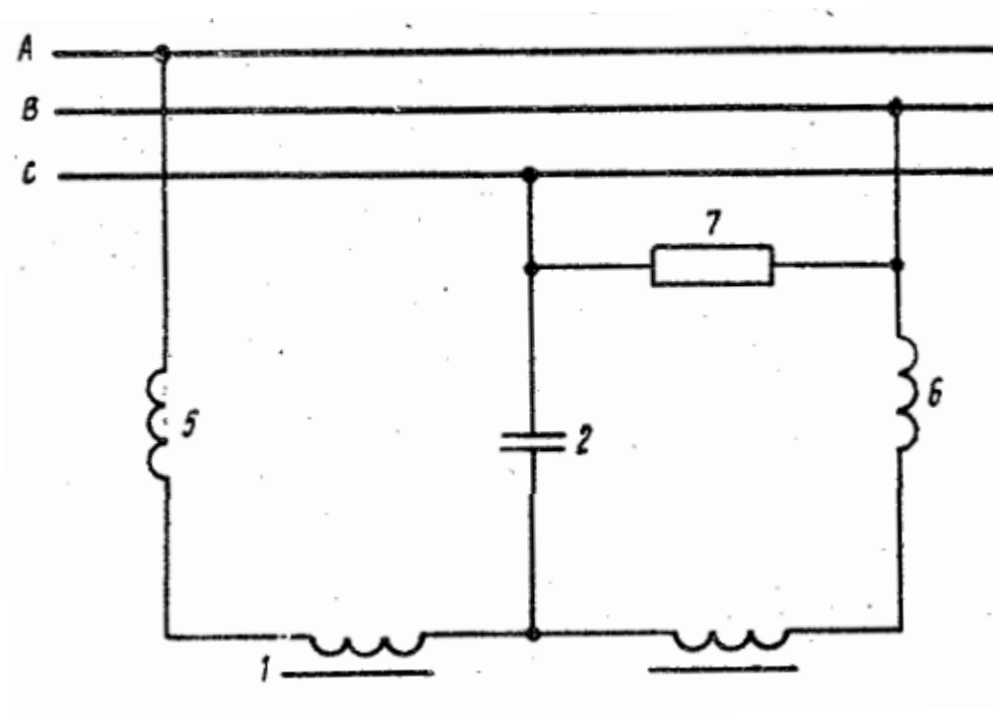


Рисунок 3.12 – СУ токов обратной последовательности

Схема состоит из: 1 – индуктивность с промежуточным отводом, который делит на обмотку на две равные магнитосвязанные части; 2 – конденсаторную батарею; 5,6 – воздушные индуктивности; 7 – несимметричная нагрузка.

Индуктивности 1,5 и 6 связаны с фазами А и В гальванической, а промежуточный отвод 1 и конденсатор 2 гальванически с фазой С, в свою очередь несимметричная нагрузка 7 включена между фазами С и В. При таком подключении вектора пульсирующих мощностей индуктивности 1 и КБ 2 совпадают и направлены встречно с вектором пульсирующей мощности несимметричной нагрузки, что позволяет достигнуть равенства установленных мощностей элементов СУ и несимметричной нагрузки.

Для симметрирования необходимо выполнение следующего выражения:

$$S_H = \sum Q_L + Q_C, \quad (3.3)$$

где Q_C – мощность КБ;

$\sum Q_L$ – суммарная мощность индуктивных элементов;

S_H – мощность нагрузки.

Недостатком таких СУ является недостаточная эффективность фильтрации, что устранено в ФСУ. Исполнение данных устройств возможно аналогично предыдущему, единственным отличием является – включение в схему дополнительных фильтровых звеньев, что положительно влияет на эффективность фильтрации высших гармонических колебаний.

Рассмотрим ФСУ [20], схема которого приведена на рисунке 3.13.

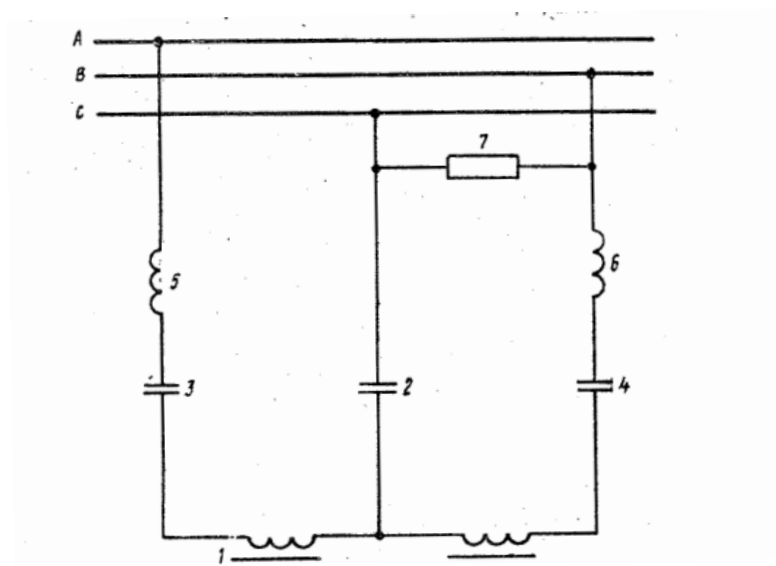


Рисунок 3.13 – ФСУ токов обратной последовательности

Фильтро-симметрирующие устройства, как и [19], относятся к шунто-симметрирующим, особенностью которых заключается в том, что они имеют минимальное сопротивление нулевой последовательности, почему часть «нулевых» токов и замыкается на участке подключения ШСУ. Другими словами – устройства шунтируют токи и не пропускают их в другие участки сети.

3. 6 Симметрирующие устройства с автоматическим управлением

К наиболее современным СУ с автоматическим регулированием в трехфазных сетях является [21], схема которого представлена на рисунке 3.14.

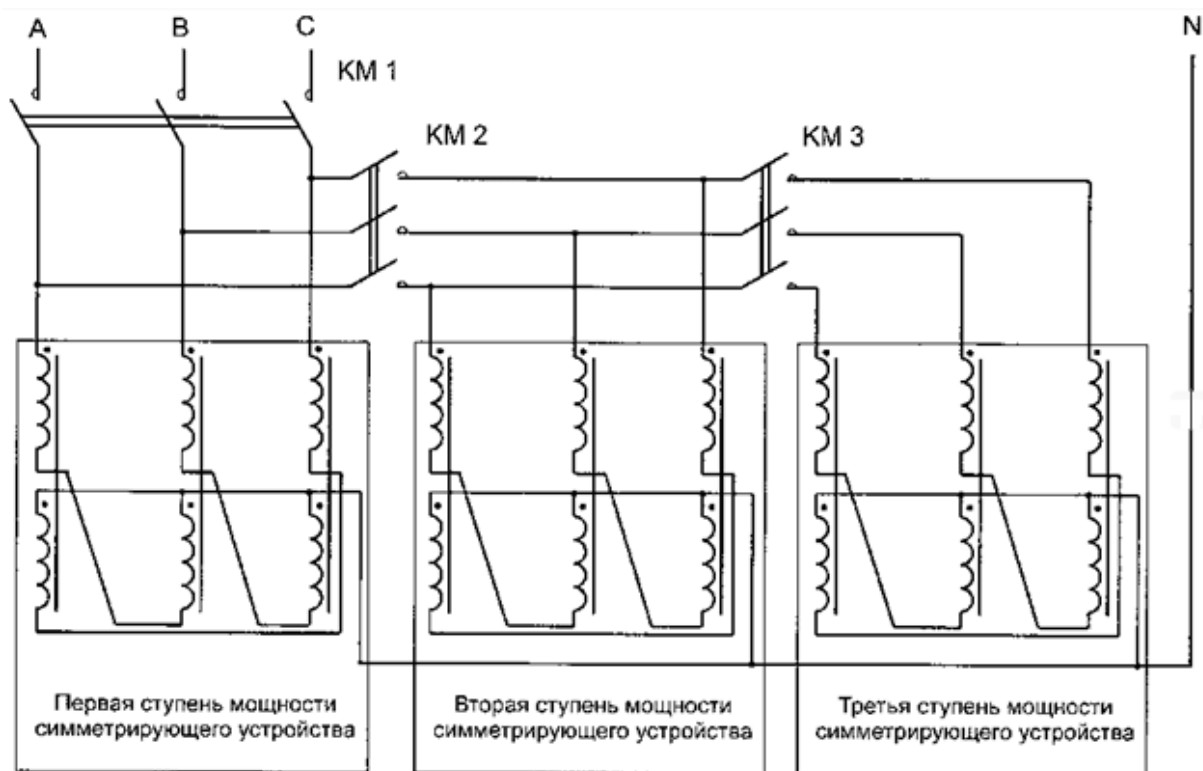


Рисунок 3.14 – Схема симметрирующего устройства с автоматическим управлением

Данное СУ представляет собой соединённые по схеме встречного зигзага обмотки электромагнитных аппаратов, которые имеют по три фазных и по одному нейтральному выводу, в соответствии с чем они и подключаются в сеть. Каждый ЭА представляет собой ступень мощности, которая включается при замыкании соответствующего магнитного пускателя, управление которым осуществляется согласно схеме, представленной на рисунке 3.15.

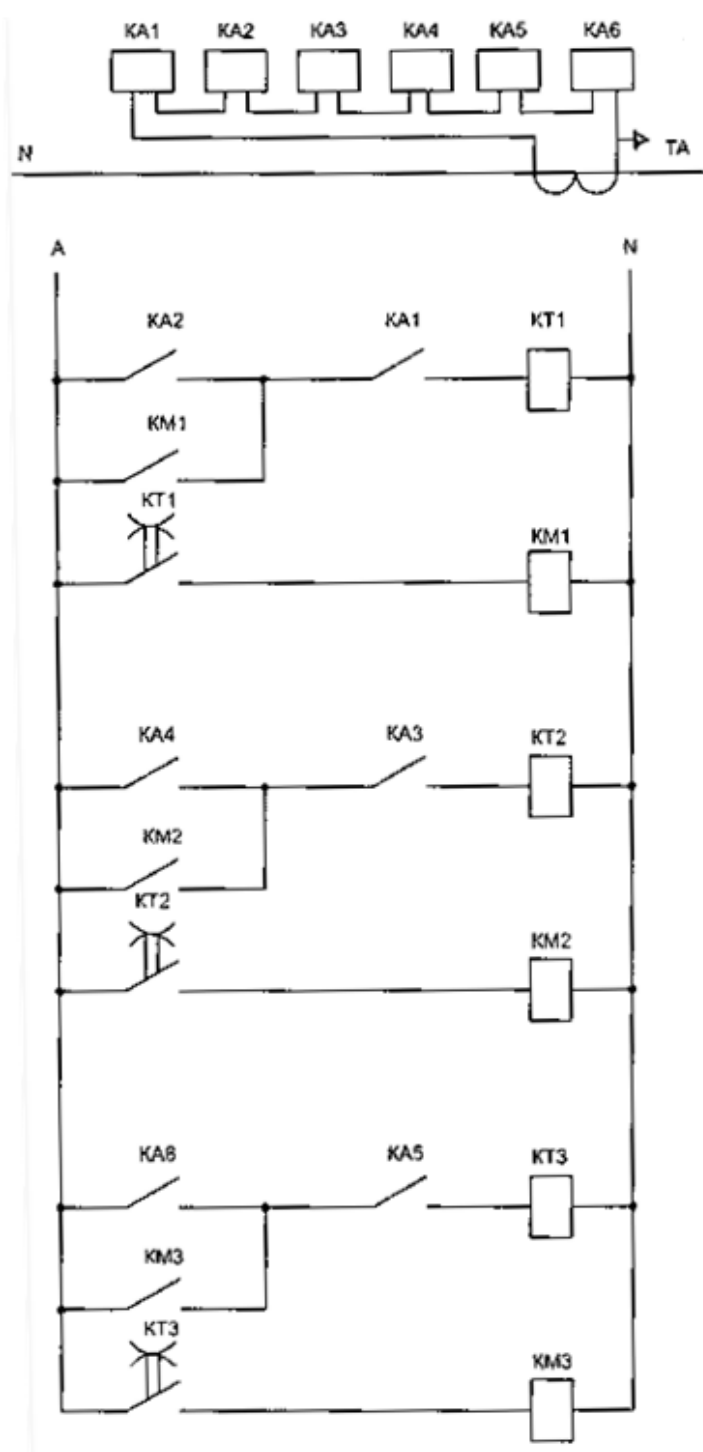


Рисунок 3.15 – Схема управления

Схема (рисунок 3.15) работает за счет протекания нулевого тока по нулевому проводу, в который встроен трансформатор тока ТА, также встроены два токовых реле и реле времени для каждой ступени.

Принцип работы СУ заключается в компенсации магнитного потока нулевой последовательности, за счет схемы соединения СУ в зигзаг. Причем

для уменьшения потерь и более эффективной работы устройства вводится автоматическое управления ступенями СУ. Речь идёт о увеличении мощности самого устройства, то есть подключении последующих ступеней, при увеличении значения тока, который протекает в нулевом проводе, контроль которого производится за счет трансформатора тока. Также предполагается полное отключение СУ при достижении нулевым током минимального значения, при котором обеспечивается нормально допустимый уровень асимметрии согласно [1].

Автоматическое управление устройства обеспечивается схемой, представленной на рисунке 19. Работа данной схемы начинается с момента фиксации ТА превышение уставки по току, после чего происходит замыкание контактов токовых реле КА, которые запускают реле времени КТ. После выдержки времени замыкается контакт реле времени КТ и питание поступает на электромагнитный пускатель КМ, который замыкает силовые контакты КМ и тем самым включает в работу одну из ступеней. При уменьшении тока работа схемы производится в обратном порядке.

Проведенный анализ показывает, что для устранения неслучайной симметрии достаточно рационального распределения нагрузок на стадии проектирования. Для устранения вероятностной составляющей несимметрии целесообразным можно считать использование трансформаторов, имеющих схему соединения «звезда-зигзаг с нулем», но так как большая часть используемых трансформаторов имеет схему соединения «звезда-звезда с нулем», то в данном случае необходимо предусмотреть установку СУ в нулевом проводе.

В месте с тем так же эффективно применение шунто-симметрирующих устройств с малым сопротивлением токам нулевой последовательности, однако их использование при динамической нагрузке сопряжена с дополнительными потерями в самом устройстве. Данное явление связано с тем, что устройства рассчитываются исходя из максимального уровня

несимметрии, которая не всегда имеет место. Избежание дополнительных потерь возможно путем применения автоматически регулируемых ШСУ.

Заключение

В результате выполнения работы было определено, что в сети низкого напряжения может возникать как неслучайная несимметрия, так и вероятностная. Первая вызвана большим количеством нерационально распределенных несимметричных нагрузок, вторая – нелинейных нагрузок. В целом этими нагрузками могут выступать коммунально-бытовые нагрузки, а также оборудование на предприятиях, симметричное исполнение которых невозможно или экономически нецелесообразно.

Также было выявлено, что несимметрия отрицательно влияет на работу асинхронных двигателей, трансформаторов, конденсаторных батарей, выпрямителей и линии электропередачи. Это влияние сводится к дополнительным нагревам и уменьшению производительности, что является причиной уменьшения эффективности работы и сокращения срока эксплуатации оборудования.

Рассмотрев причины возникновения и влияние несимметрии был проведен анализ методов её компенсации при котором было выявлено, что для устранения неслучайной симметрии достаточно рационального распределения нагрузок на стадии проектирования. Для устранения вероятностной составляющей несимметрии целесообразным можно считать использование трансформаторов, имеющих схему соединения «звезда-зигзаг с нулем», но так как большая часть используемых трансформаторов имеет схему соединения «звезда-звезда с нулем», то в данном случае необходимо предусмотреть установку СУ в нулевом проводе.

Вместе с тем так же эффективно применение шунто-симметрирующих устройств с малым сопротивлением токам нулевой последовательности, однако их использование при динамической нагрузке сопряжено с дополнительными потерями в самом устройстве. Данное явление связано с тем, что устройства рассчитываются исходя из максимального уровня

несимметрии, которая не всегда имеет место. Избежание дополнительных потерь возможно путем применения автоматически регулируемых ШСУ.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» проведен анализ научно-технического исследования, при этом детально рассмотрено технико-экономическое обоснование НТИ, посредством которого выявлено, что сильные стороны работы преобладают над слабыми сторонами и угрозами реализации, что делает данное НТИ весьма актуальным. Также был рассмотрен план выполнения работы, произведена оценка трудоемкости, произведен расчет бюджета НТИ и определена оценка уровня исследовательской работы, которая имеет сравнительно высокую значимость теоретического и практического уровня, при этом может использоваться на всех предприятиях энергетической отрасли.

В разделе «Социальная ответственность» представлена оценка условий труда, анализ вредных и опасных факторов, рассмотрены мероприятия и средства защиты от этих факторов, пожарная безопасность, экологическая безопасности, а также правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

Список литературы

1) ГОСТ 32144-13 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации – Москва: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

2) ГОСТ 54149-10 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии – Москва: Стандартинформ, 2012. – 16 с.

3) Скороходов, В.А. Методы и технические средства повышения качества электроэнергии и компенсации / В.А. Скороходов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 152 с.

4) «Основы теории цепей: Учеб. для вузов» Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А.В. Нетушил, С. В. Страхов. –5-е изд., перераб. -М.: Энергоатомиздат, 1989. –528с.

5) В.Е. Китаев, Л.С. Шляпинтох. Электротехника с основами промышленной электроники. – 2е издание, перераб. и доп. / Москва: Издательство «высшая школа», 1968. – 340 с.

6) Вольдек А.И. Электрические машины. – Л., 1974 г.

7) Висящев, А.Н. Качество электрической энергии и электромагнитная совместимость в электрических системах: учебное пособие / А.Н. Висящев. – Иркутск, 1997. – 187 с.

8) 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.

9) Воротницкий, В.Э. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др.; под ред. В.Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.

- 10) Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
- 11) 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.
- 12) ГОСТ 11677-85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия / Государственный комитет СССР по стандартам. – Москва: Издательство стандартов, 2002. – 39 с.
- 13) ГОСТ 3484.1-88 Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний / Государственный комитет СССР по стандартам. – Москва: Издательство стандартов, 1989 – 40 с.
- 14) А. Сердешнев, И. Протсовицкий, Ю. Леус, П. Шумера. Симметрирующее устройство для трансформаторов. Средство стабилизации напряжения и снижения потерь в сетях 0,4 кВ. // Новости электротехники - 2005. - №31. - С. 69-71.
- 15) А.С. №557425 СССР. Трехфазный трансформатор с пофазным регулированием напряжения / Л.В. Лейтес, А.С. Митрошина, Л.М. Пестряева и М.А. Рогацкий – Оpubл. В Б.И., 1977 - №17.
- 16) 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.
- 17) А.С. №729750 СССР. Фальтросимметрирующее устройство / Ю.С. Михайлец. – Оpubл. в Б.И., 1980. – № 15.
- 18) 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.

- 19) А.С. №257596 СССР. Фильтр токов обратной последовательности / А.П. Кузнецов и В.М. Шурин. – Оpub. В Б.И., 1971 - №38.
- 20) А.С. №729750 СССР. Фильтро-симметрирующее устройство / Ю.С. Михайлец., Оpub. в Б.И., 1980. - №15.
- 21) Патент №2490768 РФ. Симметрирующее устройство для трехфазных сетей с нулевым проводом / И.В. Наумов, Д.В. Иванов, С.В. Подъячих, Д. Гантулга. – 2012г.
- 22) Распопов Е.В. Электрические системы и сети. Качество электроэнергии и его обеспечение, 1990 г.
- 23) Балашов А.И. Управление проектами: учебник для бакалавров/ А.И. Балашов, Е. М. Рогова, М. В. Тихонова, Е. А. Ткаченко; под ред. Е. М. Роговой. — М. : Издательство Юрай, 2013. — 383 с. — Серия : Бакалавр. Базовый курс.
- 24) Кондратьева М.Н. Экономика и организация производства: учебное пособие/ М.Н. Кондратьева, Е.В. Баландина, - Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 98 с.
- 25) Фатхутдинов Р.А. Производственный менеджмент: Учебник для вузов. 6-е изд. – СПб.: Питер, 2008. – 496 с.
- 26) ГОСТ 12.0.003-74. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – Введ.1976-01-01. Текст. М.: Изд-во стандартов, 2004. 4 с.
- 27) ГОСТ 12.1.002 – 84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. Введ. 1986-01-01. Текст. М.: Изд-во стандартов, 2009. 7 с.
- 28) СанПиН 2.2.4.1191-03. «Электромагнитные поля в производственных условиях». – М.: Госкомсанэпиднадзор России, 2003.

- 29) ГОСТ 12.4.172 – 2014. Комплект индивидуальный экранирующий для защиты от электрических полей промышленной частоты. Введ. 2015-01-12. Текст. М.: Изд-во стандартов, 2009. 37 с.
- 30) ГОСТ 12.1.003-2014. Шум. Общие требования безопасности. Введ. 2015-15-11. Текст. М.: Изд-во стандартов, 2015. 27 с.
- 31) ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические требования.
- 32) ГОСТ 12.1.029-80. Средства и методы защиты от шума. Классификация. Введ. 1981-30-06. Текст. М.: Изд-во стандартов, 1988. 4 с.
- 33) СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.
- 34) СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
- 35) Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 февраля 2014 г. – М.: КНОРУС, 2014– 488 с.
- 36) РД 34.03.603. Правила применения и испытания средств защиты, используемых в электроустановках, технические требования к ним. – М: МОСЭНЕРГО, 1992.
- 37) Об утверждении правил по охране труда при эксплуатации электроустановок: приказ министерства труда и социальной защиты РФ от 24 июля 2013 г. № 328н. –М., 2013. – 99 с
- 38) НПБ 05-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. Введ. 2003-08-01. 31 с.

Приложение А

Таблица А.1 – Диаграмма Ганта

			Дни																	
Этап (стадия)	Т _р	Исполнители	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45			
Разработка и согласование технического задания	1	Руководитель Студент	X																	
Составление плана работы, определение источников данных	4	Руководитель Студент	X	X																
Изучение информации о качественных параметрах электрической энергии	8	Студент			X	X														
Изучение информации о причинах возникновения несимметрии напряжения	8	Студент					X	X												
Изучение информации о влиянии на работу электрооборудования	10	Студент							X	X										
Изучение информации о методах, способах и ТС борьбы с несимметрией напряжения	12	Студент									X	X	X	X						

Продолжение таблицы А.1 – Диаграмма Ганта

			Дни											
Этап (стадия)	Т _р	Исполнители	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72	75	
Анализ полученных результатов и выделение основных и более эффективных методов, способов и ТС борьбы с несимметрией	8	Студент												
Корректировка работы	6	Студент												
Формирование комплекта документации	11	Студент												
Проверка комплекта документации руководителем	4	Руководитель												
Сдача отчета по НТИ	1	Студент												