

УДК 621.316.722.076.12

**Шарипов Рушан Ришатович**, студент, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

**Аннотация.** Разработка методов компенсации реактивной мощности для уменьшения сечения линий электропередач за счет снижения значения протекаемого тока, снижение уровня гармоник в системе электроснабжения, финансовая экономия при оплате электроэнергии для потребителей, снижение излишней нагрузки и нагрева для электрооборудования и, соответственно, увеличение срока службы устройств, улучшение показателей качества электроэнергии.

**Annotation.** Development of methods for compensating reactive power to reduce the cross-section of power lines by reducing the current value, reducing the level of harmonics in the power supply system, saving money on electricity bills for consumers, reducing unnecessary load and heating for electrical equipment, and thus increasing the service life of devices, and improving the quality of electricity.

**Ключевые слова:** реактивная мощность, методы, моделирование, расчёт, конденсаторные батареи.

**Keywords:** reactive power, methods, modeling, calculation, capacitor banks.

### **Введение**

По линии электропередач передается полная мощность, которая состоит из активной и реактивной составляющих. Полезную работу выполняет лишь активная мощность, однако пропускная способность линии ограничена, соответственно реактивная мощность может значительно снижать производительность энергосистемы у потребителей.

Устройства компенсации реактивной мощности позволяют уменьшить потери активной мощности в линиях и создать энергетически и экономически более эффективную систему электроснабжения.

К последствиям при использовании устройств компенсации реактивной мощности также относится:

- уменьшение сечения линий электропередач за счет снижения значения протекаемого тока;
- снижение уровня гармоник в системе электроснабжения;
- финансовая экономия при оплате электроэнергии для потребителей;
- снижение излишней нагрузки и нагрева для электрооборудования и, соответственно, увеличение срока службы устройств;
- улучшение показателей качества электроэнергии

## **1 Распространенное оборудование для компенсации реактивной мощности**

Батареи статических конденсаторов (БСК) – это силовые конденсаторы, предназначенные специально для генерации реактивной мощности.

Силовой конденсатор состоит из отдельных конденсаторных или емкостных элементов. Обкладками конденсаторных элементов (КЭ) является фольга, толщиной несколько микрон. Фольга многослойная, до десяти слоев. Диэлектриком является специальная конденсаторная бумага, пропитанная минеральным маслом. Она также многослойная с толщиной каждого слоя несколько микрон. Диэлектриком может быть также полипропиленовая пленка.

В каждой фазе высоковольтной БСК может быть несколько однофазных конденсаторов. Из однофазных конденсаторов собирается трехфазная батарея. Фазы трехфазной батареи конденсаторов могут быть соединены в треугольник или в звезду.

При напряжении до 1 кВ отдельные фазы конденсатора обычно включают треугольником. В каждую фазу включается предохранитель, на схеме предохранители могут не указываться.

При напряжении 6 кВ и выше соединение конденсаторов выполняется как треугольником, так и по схеме звезды с изолированной или глухозаземленной нейтралью в зависимости от напряжения.

## 1.2 Статические тиристорные компенсаторы

В статических тиристорных компенсаторах (СТК) реактивная мощность регулируется путем изменения напряжения с помощью тиристорных регуляторов напряжения.

Установки СТК, что содержат одну или несколько неуправляемых конденсаторных групп (КГ) и управляемую тиристорно-реакторную группы (ТРГ), являются установками типа КГ+ТРГ. Конденсаторные группы содержат базовую неуправляемую емкость и позволяют регулировать РМ ступенчато. Мощность КГ:

$$Q_{\text{КГ}} = \omega \cdot C \cdot U^2. \quad (1.1)$$

Тиристорно-реакторная группа содержит тиристоры и индуктивность, и позволяет регулировать РМ плавно. При нескольких КГ плавное регулирование РМ будет между соседними ступенями КГ. Величина индуктивности плавно изменяется путем управления тиристорами. При управлении тиристорами потребляемая реактивная мощность ТРГ:

$$Q_{\text{ТРГ}} = \omega \cdot L \cdot I^2. \quad (1.2)$$

Эквивалентная реактивная мощность СТК будет

$$Q_{\text{СТК}} = Q_{\text{ТРГ}} - Q_{\text{КГ}}. \quad (1.3)$$

При управлении тиристорами реактивная мощность ТРГ и эквивалентная реактивная мощность СТК могут плавно изменяться.

Установки СТК типа ТКГ+ТРГ содержат тиристорно-конденсаторные группы (ТКГ) и тиристорно-реакторные группы.

Тиристорно-конденсаторная группа содержит несколько батарей конденсаторов, включаемыми ступенями с помощью тиристоров. Тиристорно-

реакторная группа содержит тиристоры и индуктивность. Величина индуктивности изменяется плавно.

Мощности КГ, ТРГ и ТКГ определяется требуемой мощностью компенсации.

Недостаток СТК – высокий уровень высших гармоник тока, генерируемых в питающую сеть. Поэтому оба типа СТК содержат фильтрующие элементы (ФЭ) для фильтрации гармоник тока, создаваемых при работе тиристорных групп при плавном регулировании РМ. Степень фильтрации определяется ограничениями по генерации гармоник в электрическую сеть.

### **1.3 Низковольтные и высоковольтные батареи статических конденсаторов**

В системах электроснабжения промышленных предприятий применяются БСК на напряжения 0,4; 6 и 10 кВ. Одна из задач при проектировании КРМ – это выбор между установкой низковольтных батарей конденсаторов (НБК) напряжением 0,4 кВ и высоковольтных батарей конденсаторов (ВБК) напряжением 6 или 10 кВ. При выборе между НБК и ВБК учитываются:

- 1) Удельная стоимость батарей конденсаторов  $K_{уд.}$ ;
- 2) Удельные потери активной мощности  $\Delta P_{уд.}$ ;
- 3) Капитальные затраты на вводные устройства  $K_{вв.}$ ;
- 4) Потери мощности в электрической сети  $\Delta p_{с.}$ .

Сравним НБК и ВБК по перечисленным критериям.

- 1) Удельная стоимость батарей конденсаторов  $K_{уд.}$ .

При отсутствии данных о конкретных типах БСК на момент проектирования при сравнении вариантов можно принимать удельную стоимость НБК примерно в два раза выше удельной стоимости ВБК.

- 2) Удельные потери активной мощности  $\Delta P_{уд.}$ .

На стадии проектирования при отсутствии конкретных данных о конкретных БСК можно принимать удельные потери активной мощности на генерирование РМ  $\Delta P_{уд.}$  в НБК примерно в два раза больше, чем удельные потери активной мощности в ВБК.

3) Капитальные затраты на вводные устройства  $K_{вв.}$ , через которые БСК подключается к сети.

## 2 Анализ применения устройств компенсации реактивной мощности

### 2.1 Расчет энергетической эффективности внедрения

Достаточную точность расчета для ВЛ обеспечивает метод «прямого счета» на основе формулы

$$\Delta W = 3 \cdot I_{ск.}^2 \cdot R \cdot \Delta t, \quad (2.1)$$

где  $I_{ск.}$  – среднеквадратичный ток, который, проходя по линии за время  $\Delta t$ , вызывает те же потери мощности и электроэнергии, что и постоянный ток за это же время, А;

$R$  – активное сопротивление участка ВЛ, Ом;

$\Delta t$  – времени расчетного периода, ч.

$$I_{ск.} = \frac{K_{ф.} \cdot W}{\sqrt{3} \cdot T \cdot U \cdot \cos \varphi}, \quad (2.2)$$

где  $K_{ф.}$  – коэффициент формы графика, принимаем равным 1,1;

$W$  – расход активной энергии, кВт·ч;

$T$  – время расхода активной энергии, ч;

$U$  – напряжение в сети, кВ;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности, принимаем равным 0,85 и 0,90.

Активное сопротивление линии ВЛ рассчитываем по формуле:

$$R = r \cdot l, \quad (2.3)$$

где  $r$  – удельное активное сопротивление, Ом/км;

$l$  – длина ВЛ, км.

Расчет:

При коэффициенте мощности 0,85:

$$I_{\text{ск.}} = \frac{1,1 \cdot 83844626,7}{\sqrt{3} \cdot 8760 \cdot 35 \cdot 0,85} = 204,32 \text{ А};$$

$$\Delta W_{0,85} = 3 \cdot 204,32^2 \cdot 0,21 \cdot 95 \cdot 8760 \cdot 10^{-3} = 21887728 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

При коэффициенте мощности 0,90:

$$I_{\text{ск.}} = \frac{1,1 \cdot 83844626,7}{\sqrt{3} \cdot 8760 \cdot 35 \cdot 0,9} = 192,97 \text{ А};$$

$$\Delta W_{0,90} = 3 \cdot 192,97^2 \cdot 0,21 \cdot 95 \cdot 8760 \cdot 10^{-3} = 19523313 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Снижение потерь при изменении коэффициента мощности:

$$\Delta W = \Delta W_{0,90} - \Delta W_{0,85} = 21887728 - 19523313 = 2364415 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

При тарифе электрической энергии  $F = 6,27$  руб./кВт·ч, годовой экономический эффект при уменьшении реактивной нагрузки выходит

$$B = \Delta W \cdot F = 2364415 \cdot 6,27 \cdot 10^{-3} = 14825 \text{ тыс. руб.}$$

Расчет затрат на установку компенсатора

Суммарные затраты на установку компенсатора состоят из затрат на приобретение материалов, транспортных расходов и стоимости проведения монтажных работ по установке

$$C_{\text{у.}} = C_{\text{об.}} + C_{\text{тр.}} + C_{\text{р.}}$$

Выбираем реактор-трансформатор ТМ 1000/35/10 УХЛ1 в количестве 3-х штук, стоимость каждого составляет 1188,85 тыс. руб./шт. Полные затраты на приобретение оборудования в таком случае составят

$$C_{\text{об.}} = 1188,85 \cdot 3 = 3566,6 \text{ тыс. руб.}$$

Транспортные расходы возьмем как 5 % от стоимости материалов

$$C_{\text{тр.}} = 0,05 \cdot C_{\text{об.}} = 0,05 \cdot 3566,6 = 178,3 \text{ тыс. руб.}$$

Расходы на проведение работ по установке возьмем как 30 % от стоимости материалов

$$C_{\text{р.}} = 0,3 \cdot C_{\text{об.}} = 0,3 \cdot 3566,6 = 1070 \text{ тыс. руб.}$$

Суммарные затраты на установку

$$C_{\text{у.}} = C_{\text{об.}} + C_{\text{тр.}} + C_{\text{р.}} = 3566,6 + 178,3 + 1070 = 4814,9 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на эксплуатацию можно приравнять на затраты по эксплуатации силового трансформатора

$$C_{\text{экс.}} = 120 \text{ тыс. руб.}$$

Расчет экономического эффекта от внедрения данного оборудования.

Затраты на реализацию мероприятия

$$C = C_{\text{у.}} + C_{\text{экс.}} = 4814,9 + 120 = 4934,9 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом, подобное мероприятие обладает высокой эффективностью и небольшим сроком окупаемости.

Результаты расчетов для удобства анализа сведены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Результаты расчетов энергетической эффективности

Изначальный коэффициент мощности $\cos \varphi$	Ожидаемый коэффициент мощности $\cos \varphi$	Изначальные потери электрической энергии $\Delta W_{0,85}$ , кВт·ч	Уменьшение потерь электрической энергии $\Delta W$ , кВт·ч	Годовой экономический эффект $B$ , тыс. руб.
0,85	0,90	21887728	2364415	14825

## 2.2 Моделирование шестиступенчатого компенсатора реактивной мощности

В качестве примера средств компенсации реактивной мощности в электрических сетях была выбрана схема для моделирования, позволяющей по ступеням реализовать различные режимы компенсации в соответствии с патентом № 2001108937 «Система компенсации реактивной мощности». Схема состоит из двух вентильных мостовых преобразователей, которые подключены к фазам сети через реакторы и конденсаторные батареи и влияют

на соединение для изменения емкости и, соответственно, коэффициента мощности.

Полученная модель была построена с помощью программы Electronics Workbench 5.12, анализ моделирования всех шести ступеней проводился в этой же среде. Для проверки эффективности действия каждой ступени выбиралась одна и та же нагрузка активно-индуктивного характера.

Первая ступень соответствует переключению первого блока мостового преобразователя и конденсаторов  $C1 - C3$  в звезду (рисунок 5.1, 5.2).

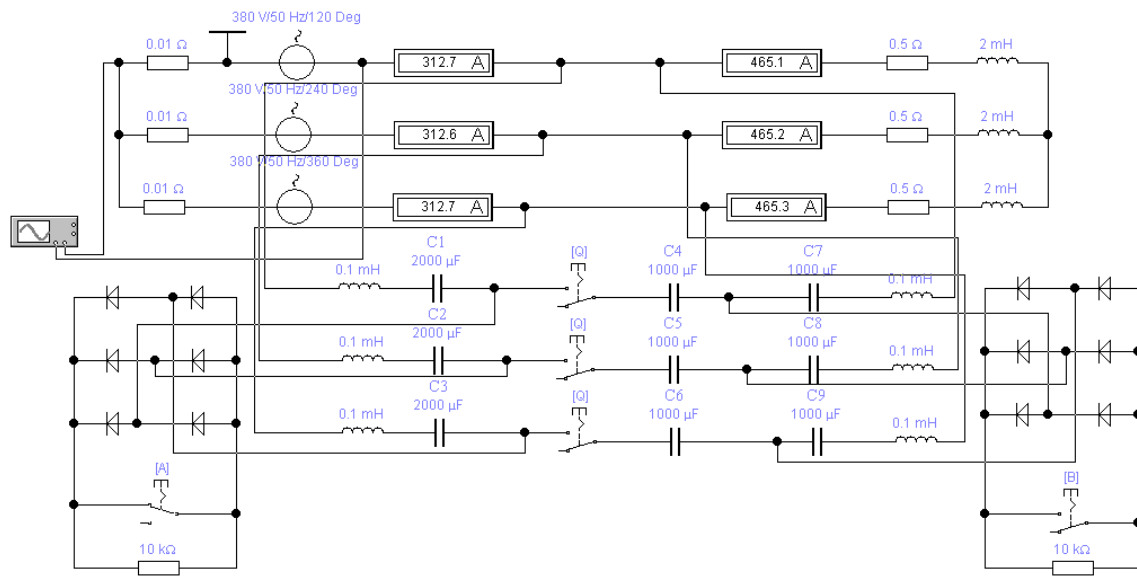


Рисунок 2.1 – Схема модели и необходимые переключения для первой ступени

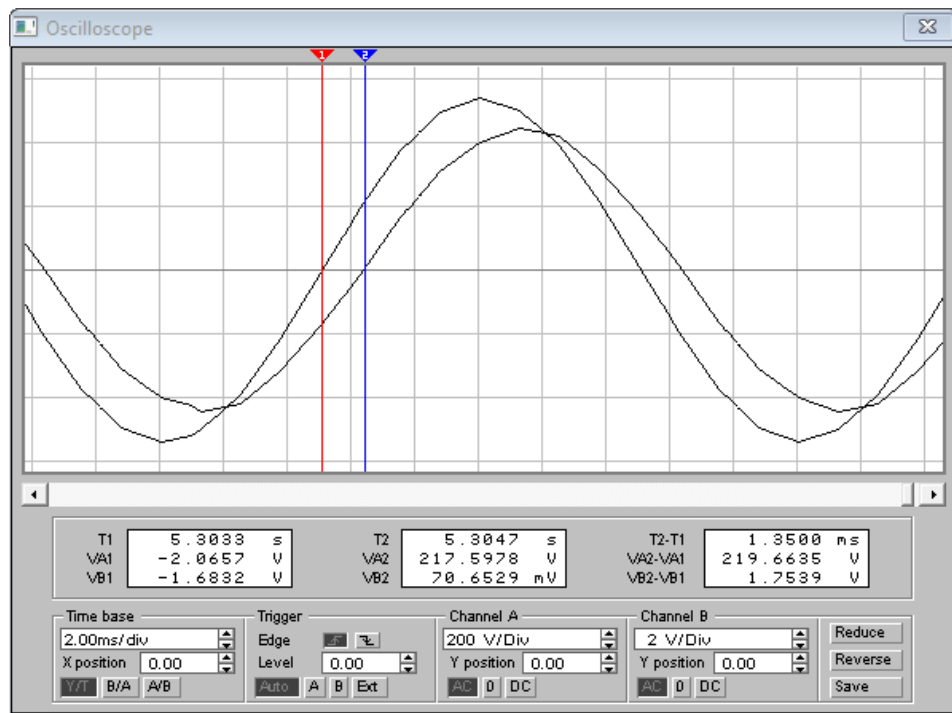


Рисунок 2.2 – Осциллограмма напряжения и тока при включении первой ступени

Вторая ступень соответствует аналогичному переключению на этот раз второго блока и конденсаторов  $C7 - C9$ .

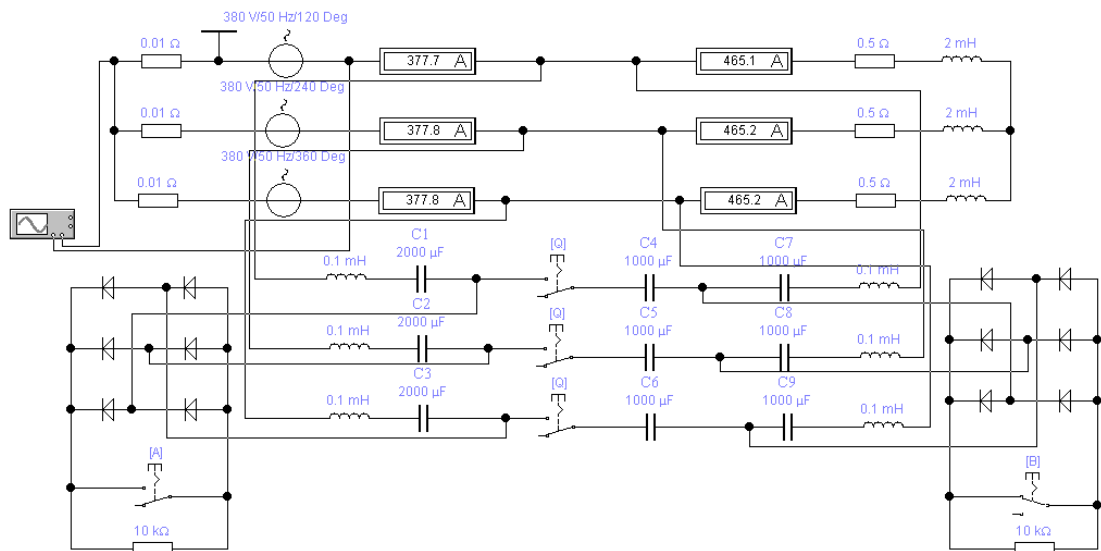


Рисунок 2.3 – Схема модели и необходимые переключения для второй ступени

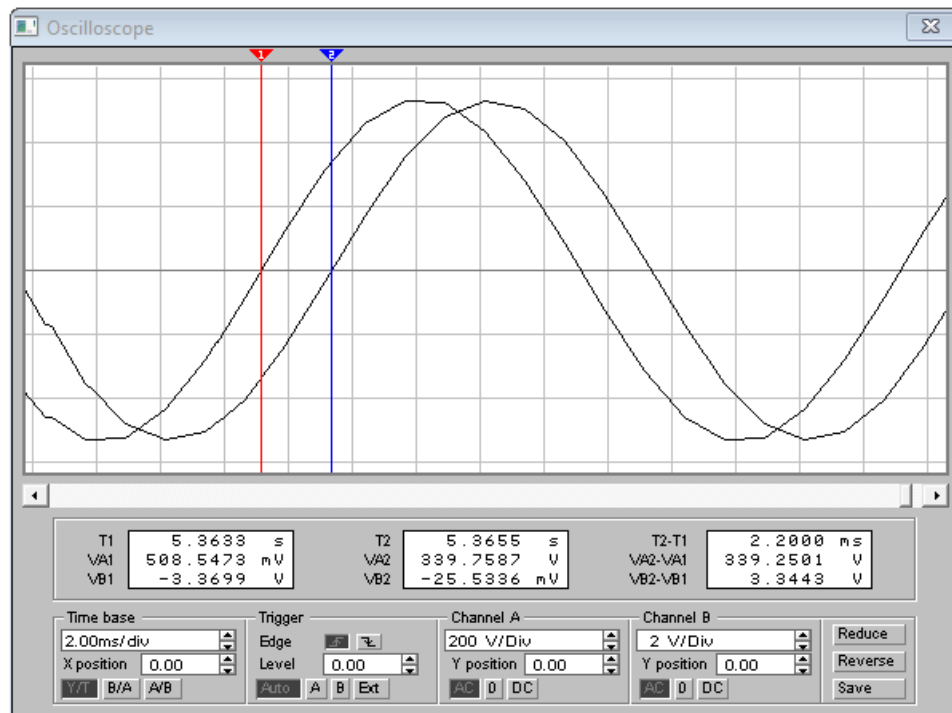


Рисунок 2.4 – Осциллограмма напряжения и тока при включении второй ступени

Третья ступень реализуется параллельным соединением в звезду конденсаторов  $C1 - C3$  и  $C7 - C9$  при переключении двух блоков мостовых преобразователей. Ступень является максимальной по емкости конденсаторов и, при заданных условиях сети, полной компенсации реактивной мощности нагрузки

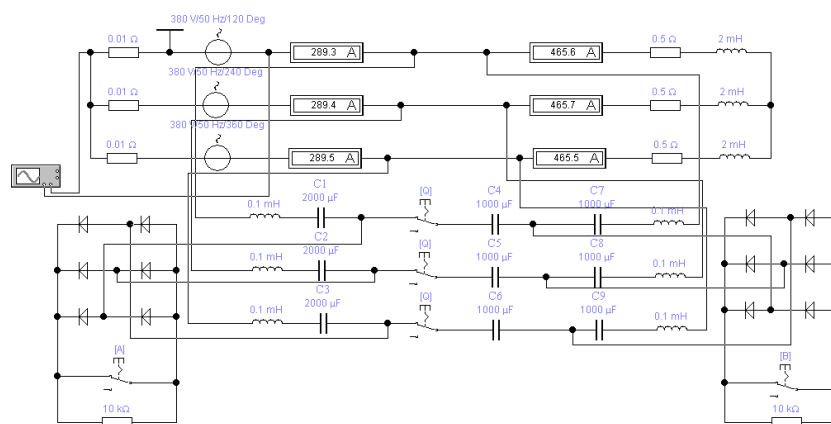


Рисунок 2.5 – Схема модели и необходимые переключения для третьей ступени

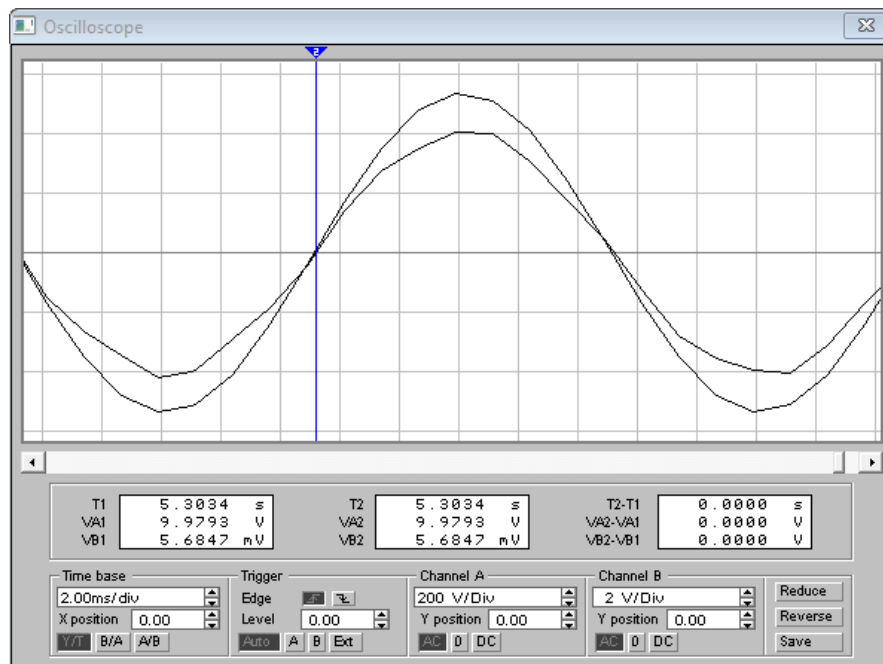


Рисунок 2.6 – Осциллограмма напряжения и тока при включении третьей ступени

Четвертая ступень реализуется при соединении конденсаторов  $C1 - C3$  в звезду, подобно первой ступени, и параллельном подключении последовательно соединенных конденсаторов  $C4 - C6$  и  $C7 - C9$

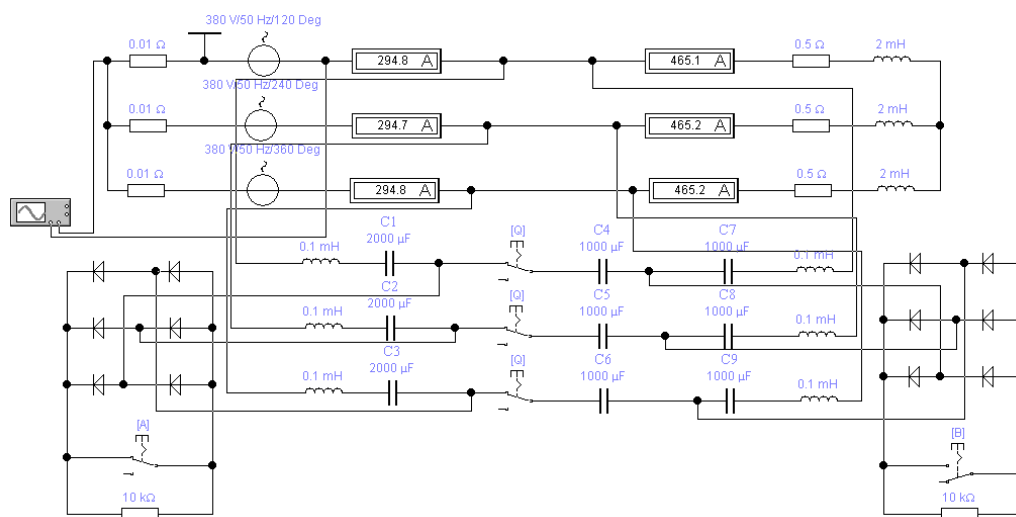


Рисунок 2.7 – Схема модели и необходимые переключения для четвертой ступени

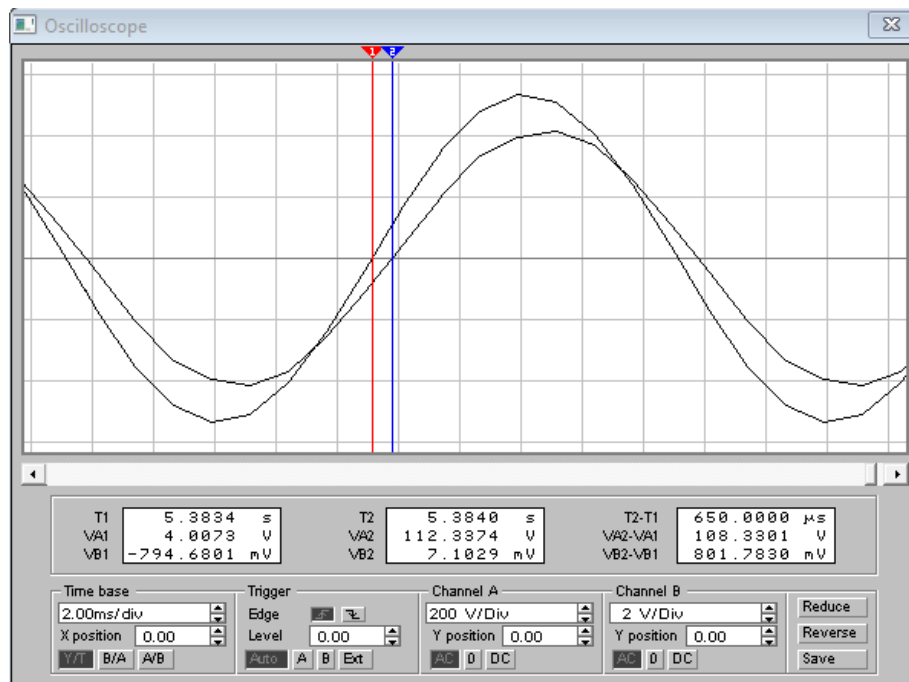


Рисунок 2.8 – Осциллограмма напряжения и тока при включении четвертой ступени

Пятая ступень зеркальна четвертой и включается при соединении конденсаторов  $C7 - C9$  в звезду, и параллельно конденсаторам  $C1 - C3$  и  $C4 - C6$  соединенным уже последовательно.

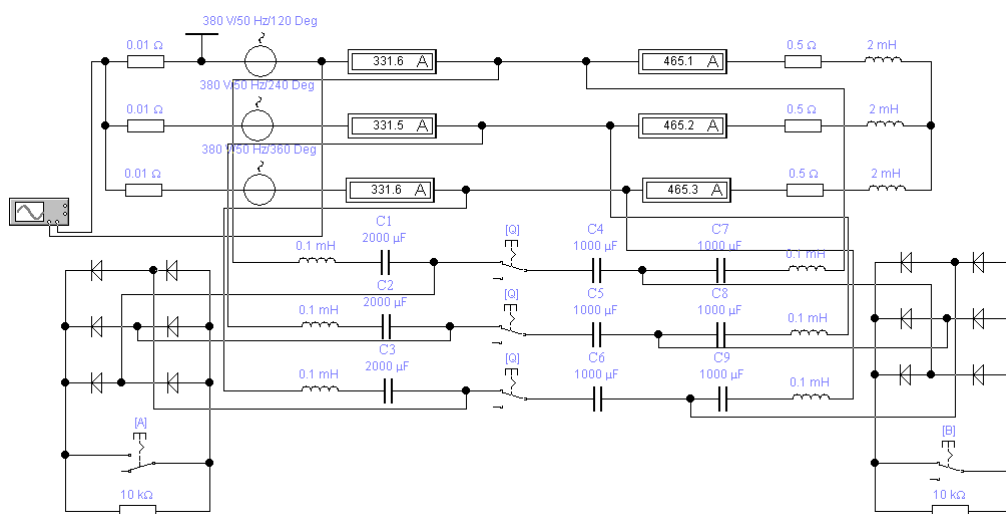


Рисунок 2.9 – Схема модели и необходимые переключения для пятой ступени

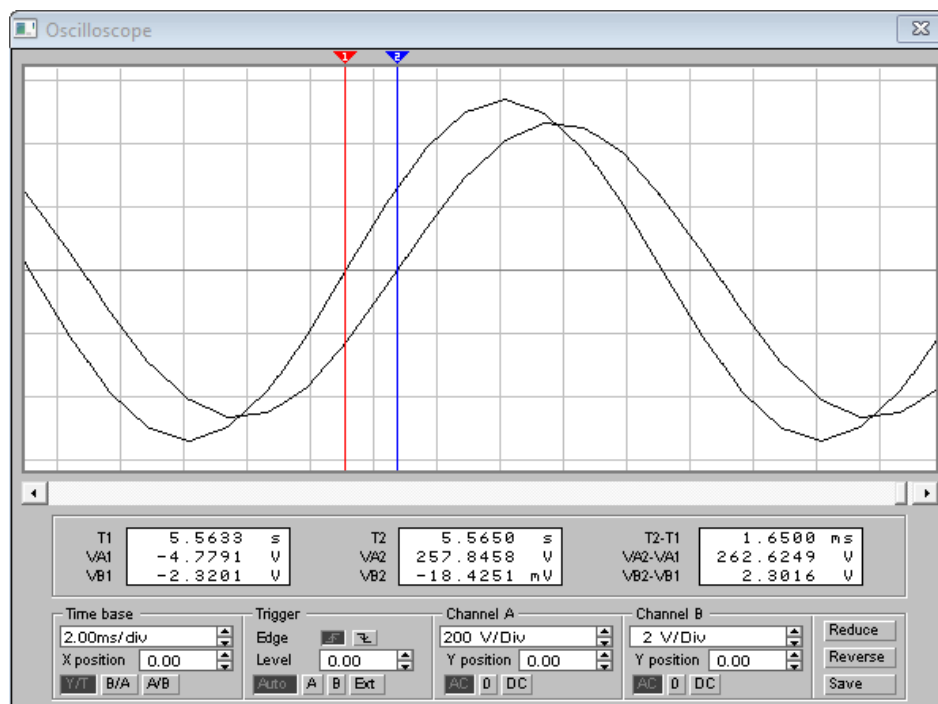


Рисунок 2.10 – Осциллограмма напряжения и тока при включении пятой ступени

Шестая ступень реализуется при отключении блоков мостовых преобразователей и последовательном соединении всех конденсаторов

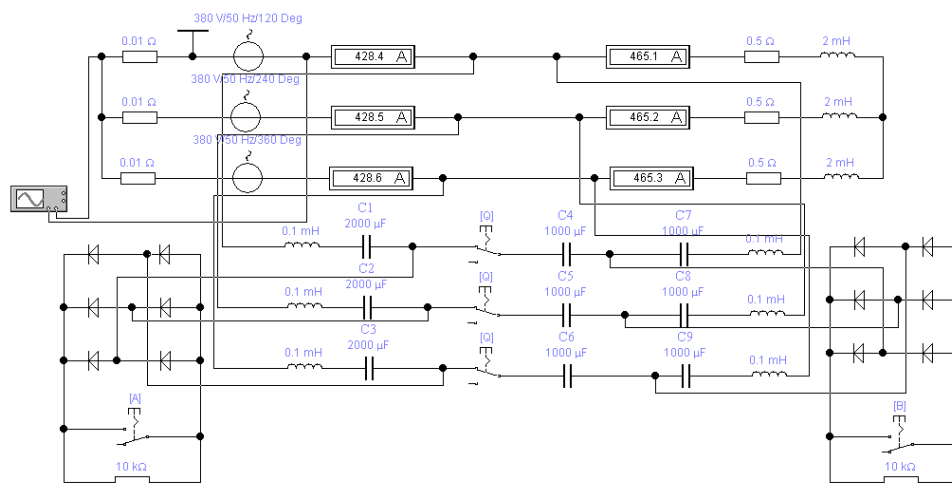


Рисунок 2.11 – Схема модели и необходимые переключения для шестой ступени

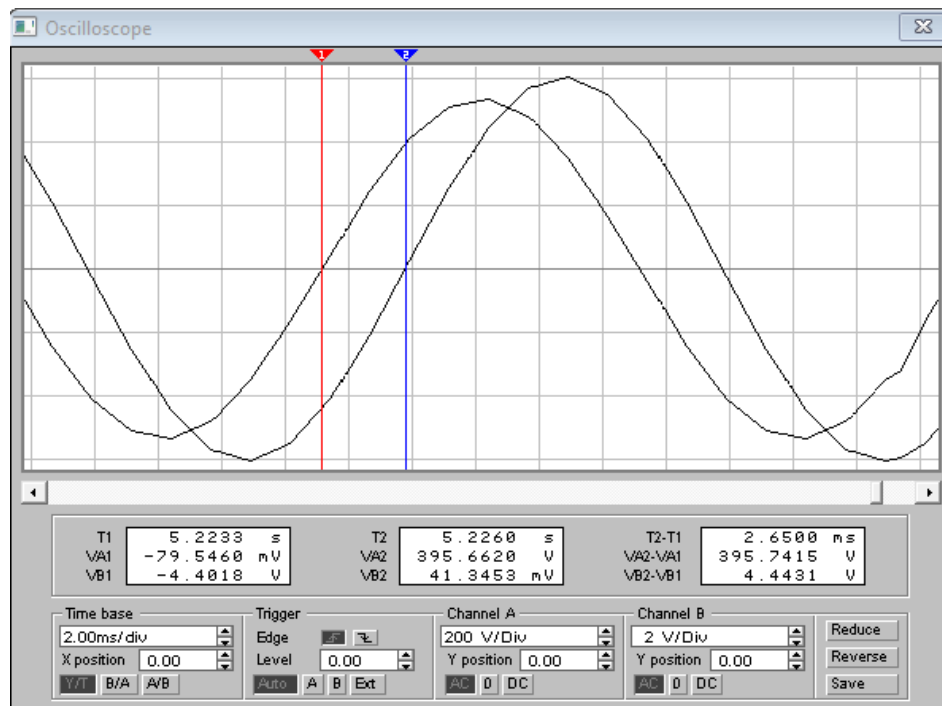


Рисунок 2.12 – Осциллограмма напряжения и тока при включении шестой ступени

Основной причиной эффективности использования предложенной схемы является наличие шести ступеней регулирования реактивной мощности при использовании только трех конденсационных установок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были проанализированы различные используемые устройства как способов компенсации реактивной мощности.

Цель работы – анализ разработанных систем компенсации реактивной мощности в электрической сети.

Проведен расчет внедрения устройств компенсации реактивной мощности и влияние повышения коэффициента мощности на энергетическую и экономическую эффективность системы электроснабжения.

Была построена модель шестиступенчатого компенсатора реактивной мощности и проанализирована эффективность подобных систем.

Рассмотренная система позволяет увеличить количество ступеней регулирования реактивной мощности, несмотря на ограниченное количество конденсаторных батарей, которые имеются в распоряжении

### **Литературы**

1 Кочкин, В.И. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. / М.: НЦ ЭНАС, 2002.

2 Раимова, А.Т. Особенности компенсации реактивной мощности в электрических сетях / А.Т. Раимова // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы.– 2016.– С. 93-97.

3 Подтынников, Н.А. Компенсация реактивной мощности на промышленных предприятиях / Н.А. Подтынников, Т.Л. Сазонова, С.А. Горемыкин // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники. Инженерные идеи XXI века, 2013.– С. 140-143.

4 Манусов, В.З. Глубокая компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения производства / В.З. Манусов, Е.С. Третьякова // Энергобезопасность и энергосбережение.– 2017.– С. 33-40.

5 Кучеренко, Д.Е. Компенсация реактивной мощности асинхронного двигателя / Д.Е. Кучеренко, Р.Е. Кучеренко // Научно-технические системы.– 2017.– С. 24-27.

### **Literature**

1 Kochkin, V.I. Application of static reactive power compensators in electrical networks of power systems and enterprises. / M.: NC ENAS, 2002.

2 Raimova, A.T. Features of reactive power compensation in electrical networks / A.T. Raimova // Power Engineering: State, Problems, Prospects.– 2016. – Pp. 93-97.

3 Podtynnikov, N.A. Compensation of Reactive Power at Industrial Enterprises / N.A. Podtynnikov, T.L. Sazonova, S.A. Goremykin // Applied

Problems of Electromechanics, Power Engineering, and Electronics. Engineering Ideas of the 21st Century, 2013.– P. 140-143.

4 Manusov, V.Z. Deep Compensation of Reactive Power in Production Power Supply Systems / V.Z. Manusov, E.S. Tretyakova // Energy Safety and Energy Saving.– 2017.– P. 33-40.

5 Kucherenko, D.E. Compensation of reactive power of an asynchronous motor / D.E. Kucherenko, R.E. Kucherenko // Science-intensive technologies and intelligent systems.– 2017.– P. 24-27.