
УДК 621.311

А.М. МАЛКАРОВ, Х.К. МЕНЛИБАЕВ, магистранты гр. ЭЛм-25
(СКГМИ(ГТУ))

И.А. ГАВРИН, студент гр. ЭЛб-23-2 (СКГМИ(ГТУ))

Научный руководитель О.А. ГАВРИНА, к.т.н., доцент (СКГМИ(ГТУ))
г. Владикавказ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ БАТАРЕЙ СТАТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ В УСЛОВИЯХ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Аннотация

Статья посвящена решению проблемы эксплуатации батарей статических конденсаторов в сетях с высшими гармониками. Рассмотрены методы расчета потерь мощности и перегрузочных характеристик конденсаторного оборудования. Предложены современные технические решения для защиты БСК, включая применение активных фильтров и адаптивных систем управления. Проанализированы ограничения существующих нормативных документов и представлены перспективные направления развития методов оценки остаточного ресурса оборудования на основе мониторинга активных потерь.

Ключевые слова: батареи статических конденсаторов; высшие гармоники; перегрузочные характеристики; активные потери; надежность оборудования; компенсация реактивной мощности.

Наличие высших гармонических составляющих в системах электроснабжения создает существенные ограничения для применения батарей статических конденсаторов (БСК) в качестве средства компенсации реактивной мощности. Ключевой проблемой является возникновение резонансных явлений на частотах гармоник, приводящее к перегрузке конденсаторных установок и значительному сокращению их эксплуатационного ресурса. Многочисленные документально зафиксированные случаи из практики свидетельствуют о критических перегрузках БСК не только на промышленных предприятиях, но и в сельских распределительных сетях, где были зарегистрированы превышения номинальных токов на 200%. Подобные режимы работы неизбежно приводят к деградации диэлектрических характеристик, тепловому разрушению элементов с всучиванием корпусов и даже взрывам конденсаторов.

Для достоверной оценки перегрузки БСК в условиях несинусоидального напряжения необходима комплексная методика расчета тепловых потерь в конденсаторных установках. Современный подход предполагает:

анализ спектрального состава гармонических составляющих; расчет эквивалентного сопротивления конденсаторов на различных частотах; определение дополнительных потерь активной мощности; оценку теплового режима работы оборудования [1, 5].

Современные технические решения для защиты БСК включают: установку дросселей с подстройкой на частоту наиболее опасных гармоник; применение активных фильтров гармоник (АФГ); использование гибридных компенсирующих устройств; внедрение систем адаптивного управления компенсацией

Современные стандарты и руководящие документы рекомендуют: проведение предварительного гармонического анализа сети; расчет резонансных частот для конкретной конфигурации сети%; использование коэффициента гармонической нагрузки при выборе оборудования; регулярный мониторинг состояния конденсаторных батарей

Дальнейшее развитие методов защиты БСК связано с созданием интеллектуальных систем компенсации, способных адаптироваться к изменяющимся условиям работы сети и обеспечивать надежную работу оборудования в условиях значительных гармонических искажений [2,8].

Традиционно расчет энергетических потерь в конденсаторах при наличии несинусоидального напряжения выполняется для стационарного режима работы с определенным спектральным составом высших гармоник, используя для этого соответствующую эквивалентную схему замещения электротехнического устройства.

На рисунке 1 представлена обобщенная схема замещения конденсатора, адекватно описывающая его поведение в расширенном частотном диапазоне, характерном для реальных условий эксплуатации в сетях с нелинейными нагрузками.

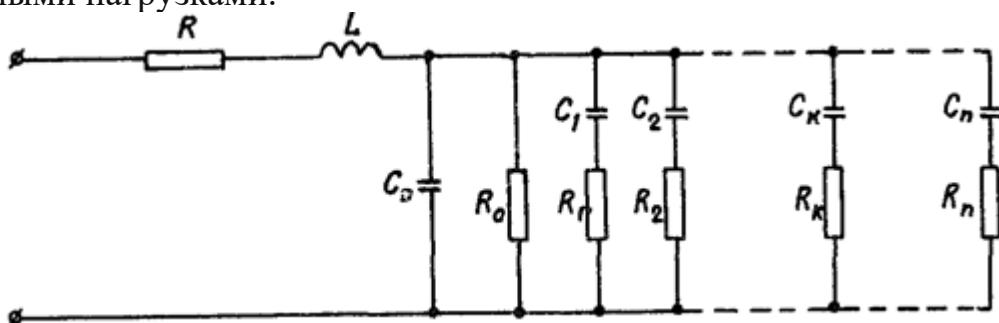


Рис. 1. Схема замещения конденсатора

Представленная схема позволяет: количественно оценить дополнительные потери от высших гармоник; оптимизировать выбор конденсаторов для конкретных условий работы; спрогнозировать тепловой режим оборудования; разработать мероприятия по защите от перегрузок.

В эквивалентной схеме конденсатора параметры R и L характеризуют потери в проводящих элементах конструкции, тогда как элементы R_0 и

C_0 отражают проводимость диэлектрика. Совокупность параллельных цепочек из сопротивлений R_k и емкостей C_k моделирует релаксационные процессы в диэлектрической среде. Поскольку проводимость диэлектрика обычно пренебрежимо мала, при практических расчетах принимается, что активная мощность, рассеиваемая в конденсаторе в форме тепловой энергии, складывается из двух основных составляющих: потерь в диэлектрике P_d и потерь в металлических компонентах P_m :

$$P_{\Sigma} = P_m + P_d. \quad (1)$$

Учитывая различную физическую природу этих видов потерь и их неодинаковое влияние на элементы конструкции, расчет каждого компонента выполняется раздельно с применением специализированных методик [3].

Современная методология предполагает: использование частотно-зависимых моделей для диэлектрических потерь; применение методов конечных элементов для анализа потерь в токоведущих частях; учет температурной зависимости параметров материалов; моделирование скин-эффекта в обкладках конденсатора

При эксплуатации конденсаторов в сетях с синусоидальным напряжением промышленной частоты 50 Гц, тепловые потери в проводящих компонентах конструкции (выводных контактах, внутренних шинах, предохранительных элементах многосекционных установок, контактных группах и токонесущих обкладках) традиционно не принимаются во внимание в связи с их незначительной величиной. Однако в условиях несинусоидального напряжения происходит существенное перераспределение токовых потоков, обусловленное комплексным воздействием поверхностного эффекта электромагнитной природы и явления взаимного влияния проводников (эффекта близости), что приводит к частотной зависимости эквивалентных сопротивлений указанных элементов схемы замещения.

Параллельно в металлоконструкциях (преимущественно в крылечных элементах) формируются вихревые токи, индуцируемые переменным магнитным полем рабочего тока конденсатора, а также наблюдаются гистерезисные явления в магнитных материалах. Эти физические процессы генерируют дополнительные энергетические потери, что эквивалентно увеличению активного сопротивления токопроводящих компонентов. Синергетический эффект усиливается за счет роста температуры внутри конденсаторной установки, вызывающего увеличение удельного сопротивления металлических элементов, что создает положительную обратную связь и дополнительно повышает уровень энергетических потерь [6,10].

Оценка работоспособности батарей статических конденсаторов в сетях с несинусоидальным напряжением традиционно осуществляется на ос-

нове анализа перегрузочных характеристик, включающих коэффициенты перегрузки по току и напряжению. Данные показатели представляют собой соотношение между действующими значениями тока и напряжения и их номинальными величинами:

$$K_I = \sqrt{\sum_{v=1}^m \left(\frac{I_v}{I_{\text{н}}}\right)^2}; \quad K_U = \sqrt{\sum_{v=1}^m \left(\frac{U_v}{U_{\text{н}}}\right)^2}. \quad (2)$$

Согласно требованиям ГОСТ, конденсаторное оборудование должно сохранять работоспособность при длительной эксплуатации с коэффициентом перегрузки по току до 1,35 и по напряжению до 1,10, независимо от спектрального состава гармонических искажений. Дополнительно, в соответствии с нормами ГОСТ, коэффициент несинусоидальности напряжения на выводах конденсаторных установок не должен превышать 5%.

Несмотря на формальное соответствие указанным нормативам, практика эксплуатации демонстрирует многочисленные случаи преждевременного выхода из строя БСК. Зафиксированы ситуации, когда катастрофические отказы оборудования происходили в относительно короткие сроки при соблюдении всех регламентированных перегрузочных характеристик. Это свидетельствует о недостаточности традиционных критериев оценки для комплексного прогнозирования надежности конденсаторного оборудования в реальных условиях работы [4].

На рисунке 2 представлены перегрузочные характеристики конденсаторов в функции срока службы.

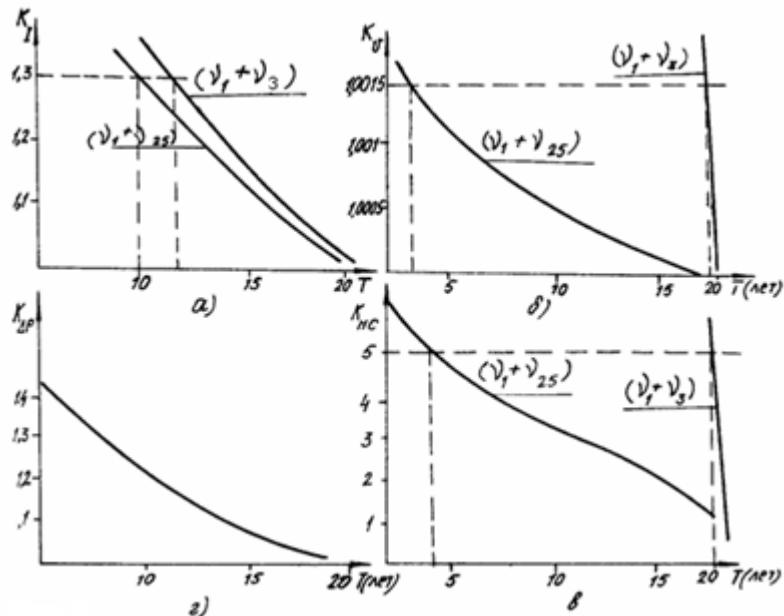


Рис. 2. Перегрузочные характеристики конденсаторов в функции срока службы: а) $K_I = f(T)$; б) $K_U = f(T)$; в) $K_{\text{NC}} = f(T)$; г) $K_{\Delta P} = f(T)$

Существует однозначная корреляционная зависимость между продолжительностью эксплуатационного ресурса конденсаторов и величиной активных потерь мощности в них, выражаемая функцией $P = f(T_{сл})$. Данная зависимость обуславливает необходимость оценки работоспособности батарей статических конденсаторов в условиях несинусоидального напряжения через анализ уровня активных энергетических потерь. Такой подход позволяет перейти от традиционных методов контроля к предиктивной оценке остаточного ресурса оборудования [7,9].

Выводы:

1. Существующие нормативные документы не обеспечивают достаточный уровень надежности БСК при работе в условиях несинусоидального напряжения, что подтверждается многочисленными случаями преждевременных отказов оборудования.
2. Предложенная методика расчета потерь мощности на основе эквивалентной схемы замещения позволяет более точно оценивать тепловые режимы работы конденсаторов и прогнозировать их остаточный ресурс.
3. Установлено, что дополнительные потери в токоведущих частях конденсаторов при несинусоидальном напряжении могут достигать 200% от номинальных значений, что требует применения специальных защитных мероприятий.
4. Современные системы защиты БСК должны включать фильтро-компенсирующие устройства с возможностью адаптации к изменяющемуся спектру гармоник и системам предиктивной аналитики.
5. Дальнейшее развитие методов оценки надежности БСК связано с созданием цифровых двойников, позволяющих моделировать поведение оборудования в реальных условиях эксплуатации.
6. Переход от контроля перегрузочных характеристик к мониторингу активных потерь мощности позволяет осуществлять проактивное управление техническим состоянием компенсирующих устройств.

Список литературы:

1. Клюев, Р.В., Гаврина, О.А., Цомаев, С.М., Чехоев, З.Р. Расчет дистанционной защиты воздушных линий напряжением 110 кВ // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, 2016. – С. 295-298.
2. Клюев, Р.В., Голик, В.И., Босиков, И.И., Гаврина, О.А. Обеспечение электробезопасности высокогорного карьера за счет выбора селектив-

ной релейной защиты в электрических сетях напряжением выше 1 кВ // Безопасность труда в промышленности, 2021. – № 9. – С. 31-37.

3. Джиникаев, А.О., Икаев, А.Э., Цакоев, М.Т., Клюев, Р.В., Гаврина, О.А., Берко, И.А. Оценка влияния климатических факторов на работу воздушных линий напряжением 110 кВ // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений. Министерство образования и науки Российской Федерации, УрФУ, 2017. – С. 159-163.

4. Гаврина, О.А., Плиева, М.Т., Киргуев, Д.А., Шамаев, О.В. Анализ видов защит синхронных двигателей в электрических сетях напряжением выше 1 кВ // Труды СКГМИ (ГТУ), 2020. – № 27. – С. 53-59.

5. Гаврина, О.А., Плиева, М.Т., Кабисов, А.А., Гудиев, Т.Т. Разработка эффективной системы диагностики повреждений воздушных линий электропередач // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. Материалы IV Международной научно-практической конференции, 2019. – С. 366-371.

6. Клюев, Р.В., Босиков, И.И., Гаврина, О.А., Голик, В.И. Повышение качества электроэнергии на промышленных предприятиях за счет применения активного фильтра гармоник // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле, 2022. – № 2. – С. 313-324.

7. Голоев, Д.Т., Силаев, В.И., Клюев, Р.В., Гаврина, О.А. Информационные технологии в энергетике: использование серверного оборудования в энергетике // Современные тенденции развития информационных технологий в научных исследованиях и прикладных областях. Сборник докладов III Международной научно-практической конференции, 2022. – С. 125-129.

8. Гаврина, О.А., Клюев, Р.В., Уртаев, Г.О. Результаты проведения комплексного энергоаудита на руднике // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы. Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ответственный редактор Д.А. Погонышев, – 2019. – С. 660-663.

9. Klyuev, R.V., Gavrina, O.A., Madaeva, M.Z. The electrical loads modeling based on the application of the probabilistic calculation methods in industry // Lecture Notes in Electrical Engineering, 2021. – Т. 729 LNEE. С. 903-911.

10. Клюев, Р.В., Гаврина, О.А., Мадаева, М.З., Абаев, Г.Я. Ранговый анализ высших гармонических составляющих по напряжению на предприятиях цветной металлургии // Энергоэффективность. Ценология. Экология и Энергобезопасность. Материалы научной конференции. Под научной редакцией Л.Х. Зайнутдиновой, М.Г. Тягунова, – 2020. – С. 179-184.

**VIII Международная молодежная научно-практическая
конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

227-7

21-22 ноября 2025 г.

Информация об авторах:

Малкаров Аскер Михайлович, студент гр. ЭЛм-25-1, СКГМИ(ГТУ), 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44.

Менлибаев Хасылбек Казбек углы, студент гр. ЭЛм-25-1, СКГМИ(ГТУ), 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44.

Гаврин Игорь Александрович, студент гр. ЭЛб-23-1, СКГМИ(ГТУ), 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44.

Гаврина Оксана Александровна, к.т.н., доцент СКГМИ(ГТУ), 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44, Gavrina-Oksana@yandex.ru.