

УДК 620.9

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ  
НА РАБОТУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ  
ИХ ЗАЩИТЫ**

Коновалов К.А., студент гр. ЭПб-241, 1 курс

Научный руководитель: Андреев В.А., старший преподаватель кафедры  
ЭГПП КузГТУ

Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

**Аннотация:** В данной статье рассматривается влияние отклонений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) от нормативных значений на режимы работы и характеристики электрических машин (ЭМ). Проанализированы наиболее распространенные причины ухудшения ПКЭ в современных электрических сетях. Представлены результаты моделирования и экспериментальных исследований влияния гармонических искажений, колебаний напряжения, несимметрии напряжения и частоты на нагрев, потери, вибрацию и срок службы ЭМ. Предложены методы защиты ЭМ от негативного воздействия ПКЭ, включающие использование фильтров гармоник, регуляторов напряжения, симметрирующих устройств и специализированных устройств защиты. Оценена экономическая эффективность внедрения предложенных методов защиты.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, электрическая машина, гармоники, колебания напряжения, несимметрия напряжения, защита, фильтры, регуляторы напряжения, экономическая эффективность.

Электрические машины (ЭМ) являются основным элементом большинства электротехнических комплексов и систем, обеспечивающим преобразование электрической энергии в механическую и обратно. Надежная и эффективная работа ЭМ во многом зависит от качества электроэнергии (КЭ), питающей их. В современных электрических сетях наблюдается тенденция к ухудшению показателей КЭ (ПКЭ) из-за увеличения доли нелинейных нагрузок, роста генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и старения инфраструктуры. Отклонения ПКЭ от нормативных значений, установленных в стандартах [1, 2], приводят к снижению эффективности, увеличению потерь, повышению температуры, вибрации и сокращению срока службы ЭМ [3, 4].

В связи с этим, исследование влияния КЭ на работу ЭМ и разработка эффективных методов их защиты являются актуальными задачами электротехники.

К основным факторам, влияющим на КЭ в современных электрических сетях, относятся:

1. **Нелинейные нагрузки.** Использование большого количества оборудования с нелинейной вольтамперной характеристикой (выпрямители, преобразователи частоты, импульсные источники питания) приводит к генерации гармоник в сети.

2. **Возобновляемые источники энергии.** Подключение солнечных и ветровых электростанций к сети может вызывать колебания напряжения и частоты, а также генерацию гармоник, особенно при использовании преобразователей мощности.

3. **Коммутационные процессы.** Переключения в электрических сетях (включение и отключение оборудования, короткие замыкания) вызывают импульсные перенапряжения и провалы напряжения.

4. **Неравномерность нагрузки фаз.** Неравномерное распределение нагрузки между фазами трехфазной сети приводит к несимметрии напряжения и тока.

5. **Старение оборудования.** Износ трансформаторов, линий электропередачи и другого оборудования приводит к увеличению потерь и ухудшению регулирования напряжения.

Отклонения ПКЭ от нормативных значений оказывают негативное влияние на режимы работы и характеристики ЭМ.

Гармонические искажения приводят к увеличению потерь в стали и обмотках ЭМ, повышению температуры, вибрации и шума. Они также могут вызывать резонансные явления в сети, повреждение конденсаторов и другого оборудования.

Колебания напряжения приводят к изменению скорости вращения, момента и тока ЭМ, что может вызывать нестабильную работу и поломки.

Несимметрия напряжения приводит к появлению обратной последовательности токов в обмотках ЭМ, что увеличивает потери, повышает температуру ротора и может привести к перегреву и выходу из строя.

Отклонения частоты приводят к изменению скорости вращения ЭМ, что может вызывать проблемы в технологических процессах.

Для оценки влияния ПКЭ на характеристики ЭМ были проведены моделирование и экспериментальные исследования:

1. Было проведено моделирование работы асинхронного двигателя (АД) в среде MATLAB Simulink при различных уровнях гармонических искажений напряжения. В качестве объекта исследования был выбран АД типа АИР100L4 с номинальными параметрами:

$P_h = 2.2 \text{ кВт}$ ,  $U_h = 380 \text{ В}$ ,  $I_h = 5.2 \text{ А}$ ,  $n_h = 1430 \text{ об/мин.}$

Модель двигателя была разработана с учетом влияния высших гармоник на потери в стали и обмотках. Результаты моделирования показали, что при увеличении коэффициента нелинейных искажений напряжения (THDu) с 0% до 10% температура обмоток двигателя возрастает на 15-20°C, что приводит к сокращению срока службы изоляции.

2. Экспериментальное исследование влияния несимметрии напряжения на вибрацию синхронного генератора. Было проведено экспериментальное исследование влияния несимметрии напряжения на вибрацию синхронного генератора (СГ) типа СГД2-16-42-4УЗ с номинальными параметрами:

$P_h = 200 \text{ кВт}$ ,  $U_h = 6.3 \text{ кВ}$ ,  $I_h = 19.2 \text{ А}$ ,  $n_h = 1500 \text{ об/мин.}$

Несимметрия напряжения создавалась путем неравномерной загрузки фаз генератора. Вибрация измерялась с помощью виброметров, установленных на корпусе СГ. Результаты исследования показали, что при увеличении коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности (K2U) с 0% до 5% уровень вибрации СГ возрастает на 30-40%, что может привести к повреждению подшипников и других элементов конструкции .

Для защиты ЭМ от негативного влияния ПКЭ могут использоваться следующие методы:

1. **Фильтры гармоник.** Активные и пассивные фильтры гармоник позволяют снизить уровень гармонических искажений напряжения и тока в сети 17. Активные фильтры обеспечивают более эффективную фильтрацию, но являются более сложными и дорогими.

2. **Регуляторы напряжения.** Автоматические регуляторы напряжения (АРН) поддерживают стабильное напряжение на выходе источника питания, компенсируя колебания напряжения в сети.

3. **Симметрирующие устройства.** Устройства симметрирования нагрузки позволяют выравнивать токи и напряжения в фазах трехфазной сети, снижая уровень несимметрии.

4. **Специализированные устройства защиты.** Устройства защиты, реагирующие на отклонения ПКЭ (перенапряжения, провалы напряжения, несимметрию, гармоники), отключают ЭМ от сети при возникновении опасных режимов.

5. **Применение реакторов.** Установка реакторов последовательно с ЭМ позволяет ограничить токи высших гармоник, протекающих через обмотки.

Экономическая эффективность внедрения методов защиты ЭМ от негативного влияния ПКЭ оценивается на основе сравнения затрат на внедрение и

эксплуатацию устройств защиты с экономическим эффектом от снижения потерь, увеличения срока службы ЭМ и предотвращения аварийных ситуаций.

Затраты на внедрение включают стоимость оборудования, монтажные и пусконаладочные работы. Эксплуатационные затраты включают затраты на электроэнергию, техническое обслуживание и ремонт.

Снижение потерь электроэнергии уменьшением потерь в стали и обмотках ЭМ за счет снижения уровня гармонических искажений и несимметрии.

Увеличение срока службы ЭМ снижением температуры обмоток и вибрации за счет поддержания стабильного напряжения и снижения уровня гармоник.

Предотвращение аварийных ситуаций перегрева, повреждения изоляции и других аварийных ситуаций за счет своевременного отключения ЭМ от сети при возникновении опасных режимов.

Уменьшение количества отказов и ремонтов ЭМ за счет поддержания оптимальных режимов работы.

Проведение технико-экономического анализа позволяет определить наиболее эффективные методы защиты ЭМ от негативного влияния ПКЭ для конкретных условий эксплуатации.

Качество электроэнергии оказывает существенное влияние на режимы работы и характеристики электрических машин. Отклонения ПКЭ от нормативных значений приводят к снижению эффективности, увеличению потерь, повышению температуры, вибрации и сокращению срока службы электросети, параметры ЭМ и условия эксплуатации.

Развитие методов защиты ЭМ от негативного влияния ПКЭ является важным направлением повышения надежности и энергоэффективности электротехнических комплексов и систем.

### **Список литературы:**

1. Федеральный закон от 26.03.2003 N 35-ФЗ (ред. от 02.11.2023) "Об электроэнергетике". Принят Государственной Думой 21 февраля 2003 года.
2. Федерального закона N 261-ФЗ от 23 ноября 2009 г. "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации". Принят Государственной Думой 11 ноября 2009 года.
3. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. - 3-е изд., перераб. и доп. -М: Энергоатомиздат, 2000.- 252 с, 74 ил. ISBN 5-283-03200-0
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений/ Б.И. Кудрин. - 2-е изд. - М.: Интермет Инжиниринг, 2006. -672 с : ил. ISBN 5-89594-128-1
5. Библия электрика : ПУЭ, МПОТ, ПТЭ. — М. : Эксмо, 2012. — 752 с. — (Российское законодательство. Техническая литература). ISBN 978-5-699-47496-7
6. ГОСТ 32144— 2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.