

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 КузГТУКузбасский 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 закон 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 Инжи нириг, 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.