

**И.И. Пельтек**

(Украина, Национальный горный университет, кафедра электропривода)

## **ДИАГНОСТИКА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ УКРАИНЫ**

Существующие системы электропривода больших промышленных механизмов проектировались и создавались несколько десятков лет назад и устарели как морально, так и физически. Массовое развитие вычислительной техники обусловило появление в последнее время огромного количества технологических новшеств, которые нашли применение, в основном, в системах электропривода малой и средней мощности. Имеющиеся на рынке предложения по системам электропривода большой мощности из-за своей дороговизны не находят спроса у отечественных промышленников. На большинстве действующих предприятий Украины эксплуатируются старые системы электроприводов, с простыми системами автоматического регулирования или без них, у которых приводной электродвигатель и приводимый во вращение технологический агрегат прошли не один капитальный ремонт и работают с параметрами, отличающимися от паспортных значений.

Для оценки эффективности работы любой системы, в том числе электро-механической, к которой относится электропривод, в основном используется обобщенный энергетический показатель - коэффициент полезного действия (КПД). Физический смысл КПД - это отношение величины полученной полезной работы к затраченной энергии, представляющей собой сумму полученной полезной работы и потерь, возникающих в электро-механической системе. Таким образом, увеличение КПД системы, а значит и повышение ее экономичности, может быть достигнуто только за счет снижения величины потерь, возникающих в процессе работы. Это и является главной задачей энергосбережения.

Основной проблемой, возникающей при оценке эффективности работы электро-механической системы, является выявление наибольших составляющих потерь и выбор рационального режима работы, позволяющего повысить величину КПД. Каждая электро-механическая система - объект энергосбережения - характеризуется индивидуальными конструктивными отличиями и особенностями системы питания и управления.

Детальное обследование электро-механических систем позволяет выявлять наиболее существенные источники потерь энергии. Владея этой информацией, мы можем смело принимать обоснованные решения о повышении экономичности работы электро-механических систем.

Рациональным является использование только таких решений, которые существенно снижают наиболее крупные составляющие потерь энергии в системе и при минимальных затратах на их реализацию значительно повышают эффективность ее работы.

Специалисты НГУ совместно с сотрудниками ООО НПП «Центр электромеханической диагностики» провели комплекс мероприятий по технической диагностике электромеханических систем крупных промышленных механизмов, включающей этапы электромагнитного обследования вращающихся электрических машин, регистрации технологических параметров, анализа эффективности работы технологического агрегата и анализа работы системы управления.

Аппаратные и программные средства, применяемые для диагностики, позволяют регистрировать с высоким разрешением мгновенные значения токов и напряжений в системе электропривода, осуществлять сбор данных для оценки эффективности работы технологических агрегатов, регистрировать электромагнитные и электромеханические переходные процессы, определять различного рода асимметрии, оценивать качество переходных процессов и работу системы управления.

Подключение датчиков диагностического комплекса не требует внесения изменений в принципиальную схему агрегата. Весь комплекс работ по технической диагностике производится без вмешательства в технологический процесс при работе агрегата в штатных режимах.

По результатам технической диагностики предоставляется заключение с выводами о состоянии агрегата и даются рекомендации по приведению его в удовлетворительное техническое состояние с указанием следующей информации:

- о показателях качества питающего напряжения;
- об эквивалентном значении мощности, тока и КПД электродвигателей;
- о моментах на валах приводных электродвигателей;
- об электрических потерях в главных приводах;
- о сопротивлении обмоток электрических машин и состоянии их корпусной изоляции;
- о качестве настройки систем автоматического регулирования главных приводов;
- о действительном значении КПД технологических агрегатов.

Как пример рассмотрим результаты диагностики систем электроприводов на промышленных предприятиях Украины за последний год.

## **1. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ К-14**

Причиной для проведения данных работ послужили частые аварии, сопровождающиеся поломкой и скручиванием валов тяговых двигателей электровозов. Цель работы - выявление причин аварий и разработка рекомендаций по повышению надежности привода.

На электровозах К-14 установлен двухдвигательный электропривод постоянного тока с реостатным регулированием. Используются два типа приводных электродвигателей последовательного возбуждения: ДТН-45/27Б, либо ЭТ-46.

## Усилия на валу электродвигателей при проскальзывании колес

Причинами проскальзывания являются искривления рельсового пути, неравномерное зацепление колес, наличие воды на рельсовом пути и т.д. На рис. 1 и 2 показаны осциллограммы процессов в электроприводе при проскальзывании мостов и попытке выхода электровоза из режима проскальзывания.

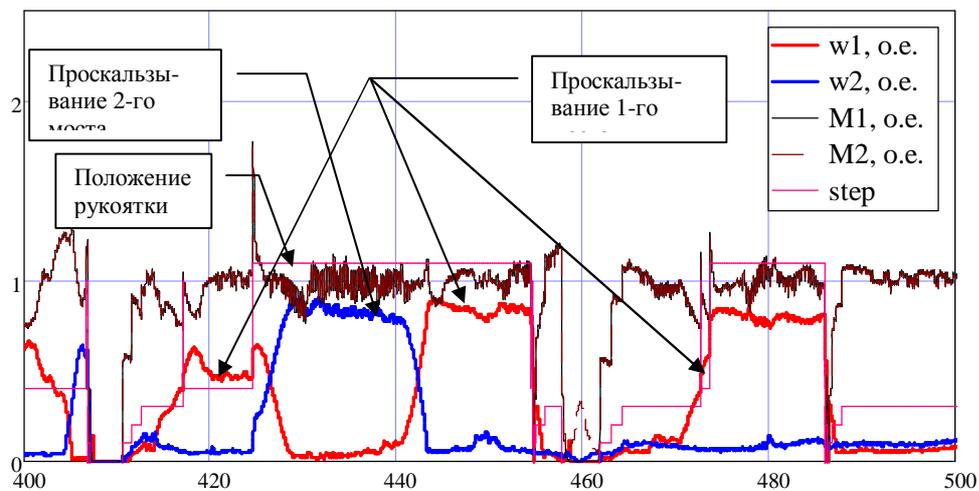


Рис. 1. Осциллограммы процессов в электроприводе при поочередном проскальзывании мостов

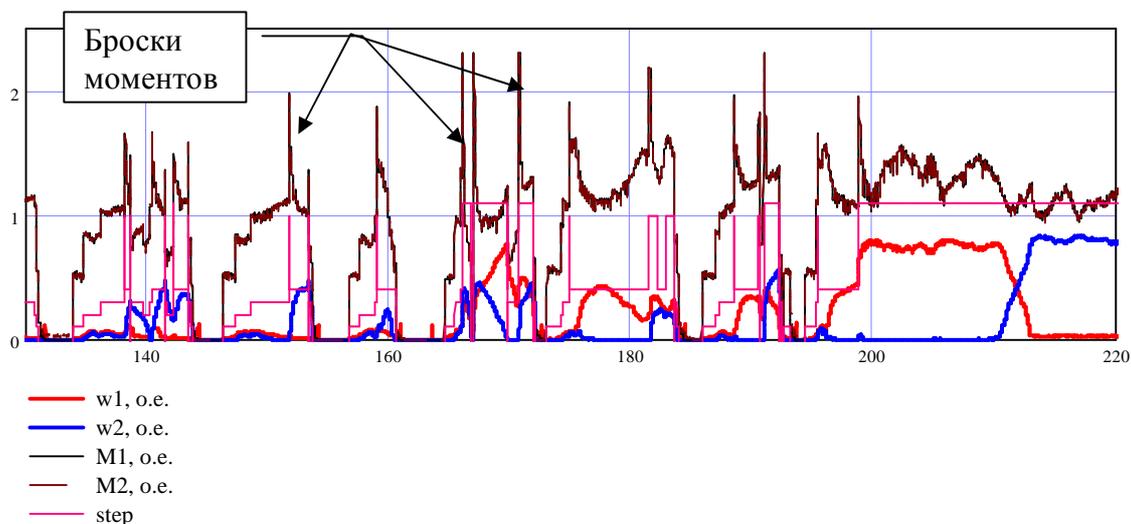


Рис. 2. Осциллограммы усилий на валах электродвигателей при попытках выхода из режима проскальзывания

Режим проскальзывания наступает, как правило, в начале движения на пониженных передачах, когда якоря приводных электродвигателей соединены последовательно и обтекаются одним током. Приводные двигатели в этом режиме развивают одинаковые моменты, как правило, в диапазоне 0,9 – 1,1 номинала. Поэтому, при проскальзывании колес, усилие, которое развивает заторможенный двигатель, недостаточно для того, чтобы стронуть электровоз.

Другая пара колес (вращающаяся), не совершает полезной работы, поскольку происходит проскальзывание. Сцепление этой пары колес тем меньше, чем больше скорость проскальзывания (эффект отрицательного вязкого тре-

ния). В итоге вся мощность, развиваемая электродвигателем проскальзывающей пары, идет на нагрев и истирание рельсовых путей и колес.

Для выхода из этого режима машинист предпринимает многочисленные попытки разгона электровоза путем перехода на повышенные передачи. При этом возникают броски моментов двигателей (рис. 2).

### Энергетика подземного транспорта

Энергетические показатели подземного транспорта определяют три фактора:

- 1) реостатный способ регулирования скорости электропривода;
- 2) способ торможения электропривода – динамическое торможение;
- 3) частый режим попеременного проскальзывания приводных колес.

При реостатном способе регулирования потери энергии пропорциональны глубине регулирования. КПД привода максимален при работе на естественной характеристике (без добавочного сопротивления в цепи якоря).

Для оценки энергетической эффективности была произведена оценка доли времени, когда привод работает на искусственных характеристиках (при введенном добавочном сопротивлении), и соотношения мощностей, рассеиваемой в виде тепла и полезной мощности.

На рис. 3 представлены диаграммы работы электровоза на различных участках. Красное поле отражает долю энергии, рассеиваемой на резисторе, синее сплошное поле отражает полезную мощность (механическую на валу). Сумма этих площадей этих полей пропорциональна мощности, потребляемой из сети.

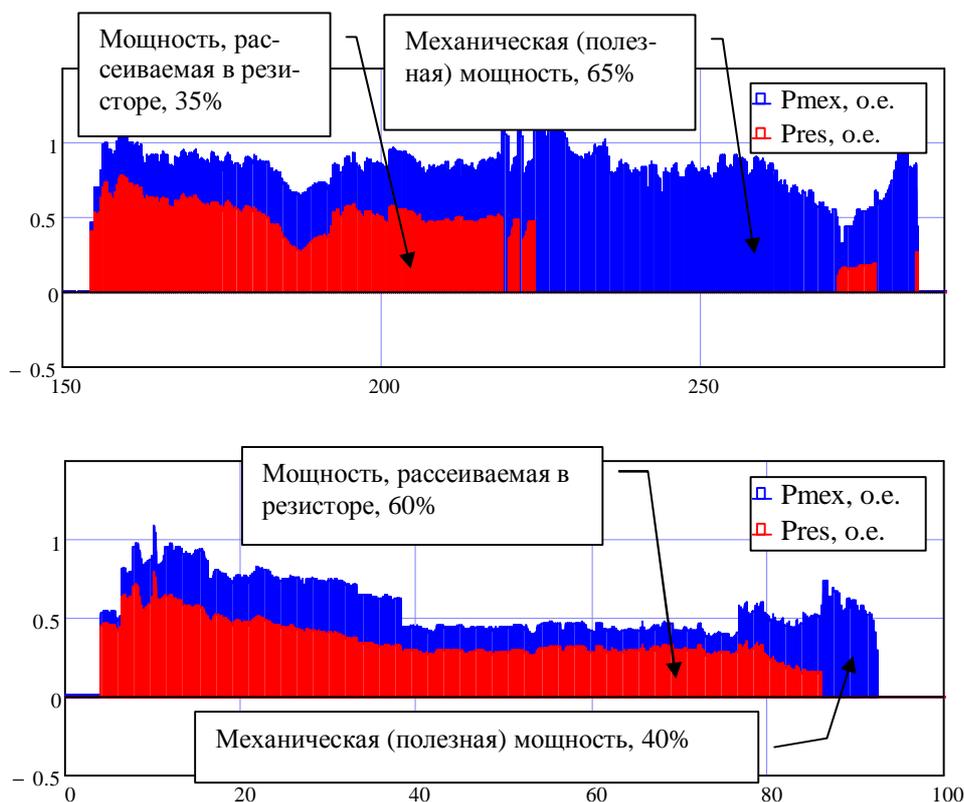


Рис. 3. Энергетические диаграммы электровоза при работе на различных участках

Вероятность возникновения режима проскальзывания существенно повышается после загрузки состава. В режиме проскальзывания практически вся

энергия, потребляемая из контактной сети, расходуется на нагрев и истирание колес и рельсов.

На рис. 4 показано соотношение мощностей при работе электровоза на различных участках.

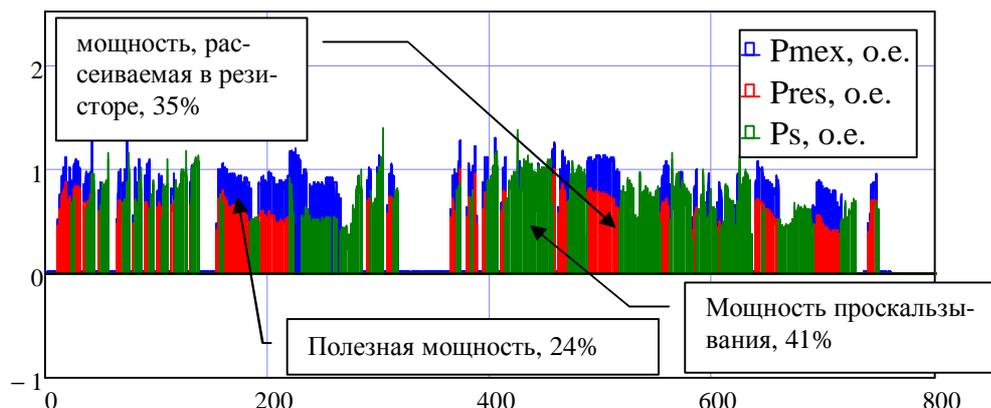


Рис. 1.4. Энергетические диаграммы электровоза при работе в режиме проскальзывания

При работе электровоза в режиме проскальзывания КПД электропривода может падать вплоть до 20%. Энергия, затрачиваемая на нагрев и трение в элементах механической передачи, на некоторых участках может составлять до 40% от общего количества энергии, потребляемой электровозом. Таким образом, проскальзывание колес является фактором, существенно влияющим на количество энергии, потребляемой подземным транспортом.

### Усредненные энергетические показатели работы электровоза К-14

На рис. 5 показана круговая диаграмма, отражающая усредненные энергетические показатели электровоза К-14.

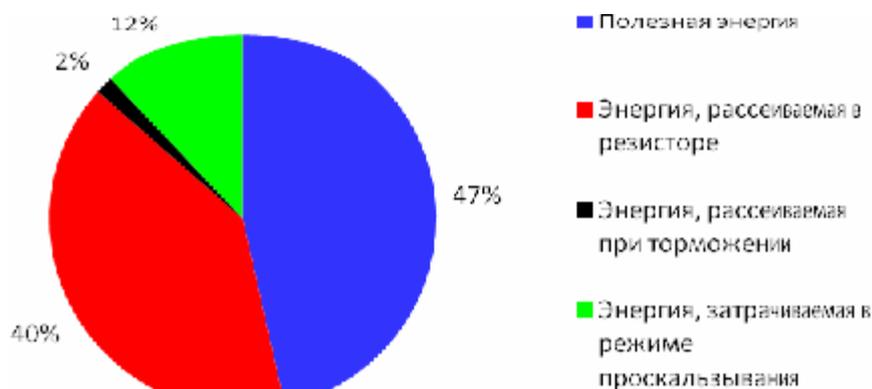


Рис. 5. Диаграмма усредненных энергетических показателей работы электровоза К-14

### Выводы

1. Более половины рабочего цикла электропривод электровоза работает на искусственных характеристиках (с добавочным сопротивлением в цепи ротора). Только на прямолинейных участках электровозу удается разогнаться и некоторое время работать на естественной характеристике.

2. В среднем, при работе привода без проскальзывания, около половины энергии расходуется на резисторе добавочного сопротивления.

3. Режим динамического торможения не является определяющим фактором энергетической эффективности подземного транспорта. Торможение состава происходит в основном за счет сил трения колес о рельсы. Доля энергии, расходуемой в режиме динамического торможения, не превышает 1-2% от суммарного количества потребляемой энергии.

4. Проскальзывание колес существенно влияет на количество энергии, потребляемой подземным транспортом - при работе электровоза в режиме проскальзывания КПД электропривода может падать вплоть до 20%.

5. Среднее значение КПД электропривода электровоза составляет 47%.

### **Состояние контактной сети и качество напряжения**

Колебания напряжения и его периодическое исчезновение (рис. 6) отрицательно сказываются на состоянии троллея и пантографа и снижают скорость электровоза. Однако существенного его отрицательного влияния на энергетические и динамические показатели подземного транспорта не выявлено.

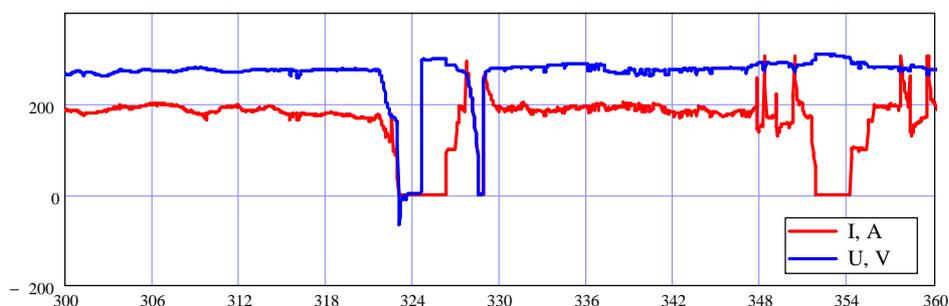


Рис. 6. Осциллограммы напряжения контактной сети и тока, потребляемого электровозом, при работе на участке в районе силовой подстанции

### **Выводы**

1. Техническое состояние контактной сети требует принятия соответствующих мер (ревизия, ремонт, замена).

2. Качество напряжения контактной сети – удовлетворительное. Зарегистрированные падения напряжения в линии и исчезновения напряжения на отдельных участках отрицательно сказываются на состоянии троллея и пантографов, снижают скорость электровозов, но не оказывают существенного отрицательного влияния на энергетические и динамические показатели подземного транспорта.

### **Проскальзывание колес при трогании состава**

Основными причинами возникновения режимов попеременного проскальзывания колес в приводе электровоза при трогании груженого состава являются:

- броски моментов при переключении ступеней добавочного сопротивления;
- искривления рельсового пути;
- неравномерное зацепление колес;
- наличие воды на рельсовом пути;
- недостаточный момент сцепленного с рельсами электродвигателя при трогании на пониженных скоростях.

Длительность режима проскальзывания зависит, главным образом, от нагрузки электровоза и геометрии пути, в меньшей мере, - от манеры вождения машиниста.

### **Выводы**

1. Наибольшее усилие, зарегистрированное на валах электродвигателей привода электровоза К-14, равно трехкратному номинальному значению (976 Н·м) и является допустимым для тяговых электродвигателей.

2. Наиболее вероятной причиной аварий тяговых электродвигателей электровозов К-14 является усталостное разрушение валов вследствие частых пусков и переходов на повышенные передачи без выдержки времени, обусловленных необходимостью выхода из режима проскальзывания.

3. Энергетика подземного транспорта определяется двумя основными факторами - реостатным регулированием скорости и частой работой привода с проскальзыванием. КПД электропривода при работе без проскальзывания составляет порядка 50-75%, и может снижаться вплоть до 20% на участках, где наиболее часто возникает проскальзывание.

4. В среднем доля электроэнергии, расходуемой в режимах проскальзывания, составляет 12% от общего количества потребленной электроэнергии.

5. Среднее значение КПД электропривода электровоза составляет 47%.

## **2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАСОСОВ И КОМПРЕССОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ**

Комплексная техническая диагностика 11 электродвигателей насосов и компрессоров технологических агрегатов проводится для определения текущего технического состояния корпусной изоляции электродвигателей, оценки эффективности работы электродвигателей в штатных режимах, параметров процесса прямого пуска электродвигателей от сети и качества настройки тиристорных возбуждателей, обоснования необходимости ремонта оборудования или его замены. В данной части будут рассмотрены методы и представлены результаты электромагнитной диагностики.

## Анализ показателей качества питающего напряжения

На рис. 7 и 8 показаны осциллограммы линейных напряжений и годограф линейного напряжения одной из пяти подстанций.

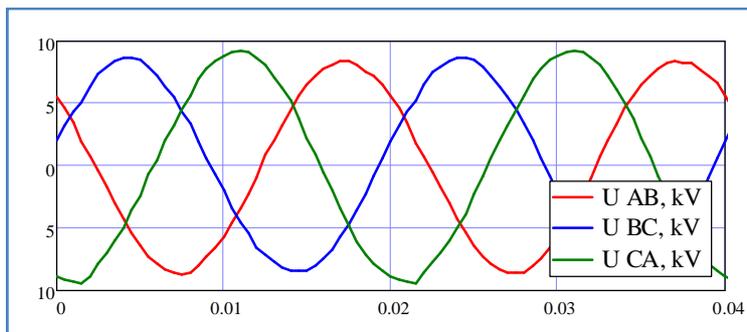


Рис. 7. Осциллограммы линейных напряжений подстанции цеха №2

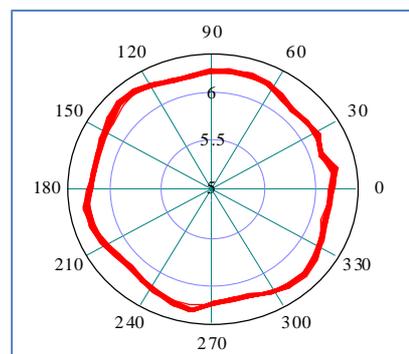


Рис. 8. Годограф линейного напряжения подстанции цеха №2

## Выводы

Показатели качества питающего напряжения исследованных пяти подстанций не соответствуют требованиям ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения». Наблюдается превышение допустимого уровня установившегося отклонения напряжения от номинального значения, а также нарушение симметричности питающего напряжения и искажение синусоидальности.

## Измерение сопротивления обмоток статора и ротора

Сопротивления обмоток статора и ротора электродвигателей измерялись методом вольтметра и амперметра в соответствии с требованиями ГОСТ 11828-86 «Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытания».

Приведенные к одинаковой температуре измеренные значения сопротивлений различных фаз обмоток 6 электродвигателей не отличаются друг от друга более чем на 2% (требование ПУЭ). У 5 электродвигателей зарегистрированные отклонения лежат в пределах от 2,4 до 8,1%.

## Результаты электромагнитной диагностики электродвигателей

На рис. 9 – 14 показаны характеристики электродвигателей со щеточной (Д7) и бесщеточной системами (Д4) возбуждения.

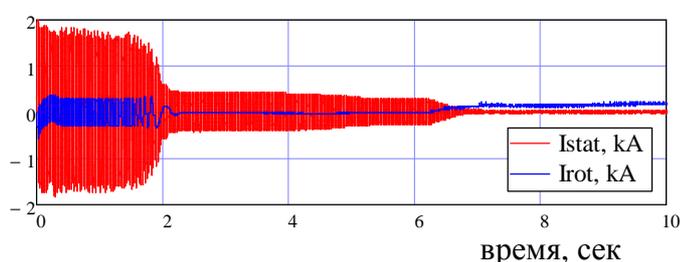


Рис. 9. Осциллограмма пуска двигателя Д7

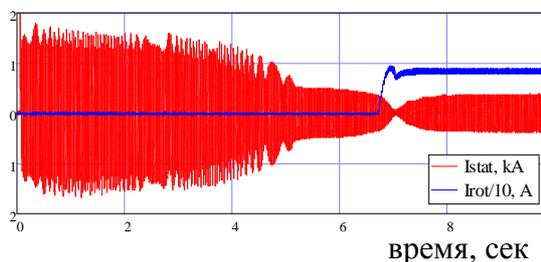


Рис. 10. Осциллограмма пуска двигателя Д4

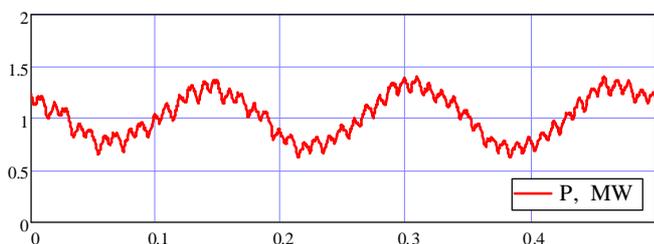


Рис. 11. Кривая мгновенной мощности электродвигателя Д7

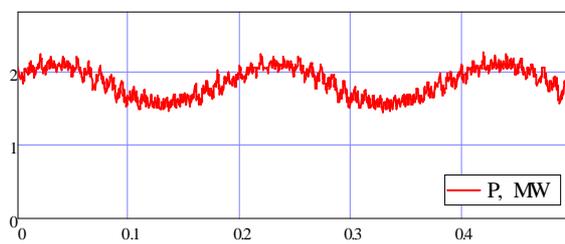


Рис. 12. Кривая мгновенной мощности электродвигателя Д4

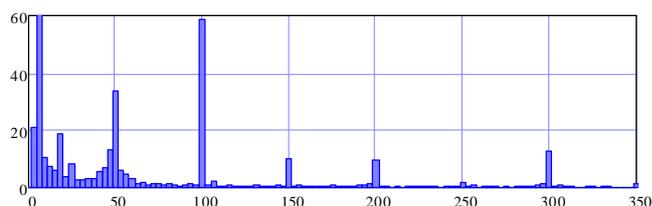


Рис. 13. Спектр мгновенной мощности электродвигателя Д7

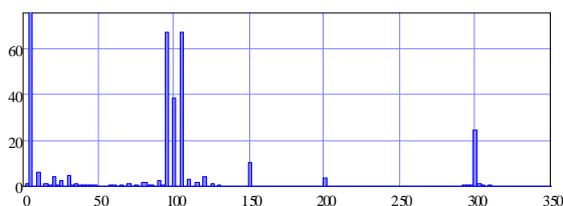


Рис. 14. Спектр мгновенной мощности электродвигателя Д4

## Выводы

Прямой пуск электродвигателей от сети со щеточной и бесщеточной системами возбуждения осуществляется в штатном режиме. Пусковые токи лежат в пределах 3,4 - 5,6-Истатора ном. На момент исследований все электродвигатели, в основном, недогружены, работают с относительно низкими значениями КПД и завышенными потерями.

Гистограммы на рис. 15, 16 иллюстрируют ключевые энергетические параметры электродвигателей – относительный уровень потерь, относительный уровень пульсаций потребляемой мощности и понижение прогнозируемого КПД от паспортного значения.

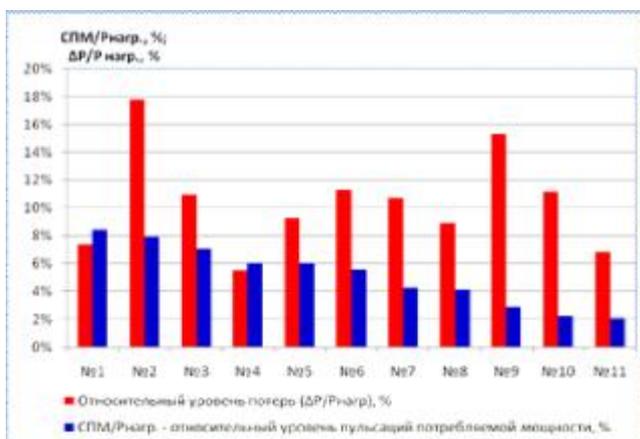


Рис. 15. Гистограммы относительного уровня пульсаций мощности исследуемых двигателей и относительного уровня потерь

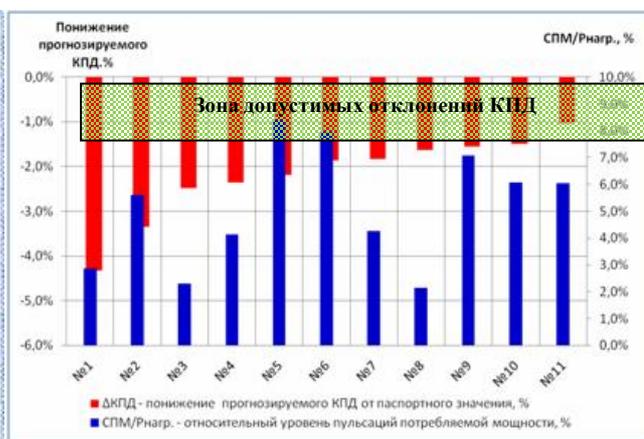


Рис. 16. Гистограммы понижения прогнозируемого КПД от паспортного значения и относительного уровня пульсаций потребляемой мощности

В настоящее время не существует норм, позволяющих оценить степень влияния уровня пульсаций потребляемой мощности на техническое состояние электродвигателя, в целом, и его корпусной изоляции, в частности. Но, при оценке технического состояния электродвигателей одинакового габарита, эксплуатирующихся в одинаковых условиях, этот параметр должен учитываться, потому что мощность этих пульсаций, достигающая значений порядка 100 кВт при номинальной нагрузке, проявляется в тангенциальной вибрации статора. Пульсации усилий в электрической машине и связанная с ними тангенциальная вибрация статора отрицательно сказываются на состоянии корпусной изоляции стержней обмотки статора – интенсивные колебания приводят к ее истиранию.

При комплексной оценке технического состояния электрических машин рассматриваются только три главных фактора – техническое состояние корпусной изоляции, величина понижения прогнозируемого КПД от паспортного значения и относительный уровень пульсаций потребляемой мощности. Техническое состояние корпусной изоляции характеризует степень надежности электрической машины и уровень возможных затрат при внезапном ее отказе. Величина понижения прогнозируемого КПД от паспортного значения характеризует степень эффективности работы электрической машины и указывает на уровень прямых затрат при ее эксплуатации в таком техническом состоянии. Относительный уровень пульсаций потребляемой мощности не влияет на затраты, но непосредственно влияет на техническое состояние изоляции.

*Рекомендовано до друку: профессором Куваевим Ю.В.*