

УДК 621.3

Г.И. Бабокин

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В НАСОСНЫХ СТАНЦИЯХ ВОДООТЛИВА СРЕДСТВАМИ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Семинар № 17

В системах водоотлива шахт и рудников, а также при осушении открытых горных выработок возникает задача перекачки жидкости из нижнего резервуара 1, в верхний резервуар 2 с помощью насоса 3 (рис. 1). Насос имеет нерегулируемый электропривод. Типичный алгоритм работы системы перекачки жидкости состоит в следующем [1].

Устанавливаются датчики, контролирующие верхний (ВУ) и нижний (НУ) уровни жидкости в нижнем резервуаре. Насос включается, когда уровень в нижнем резервуаре достигает верхней отметки (ВУ), и отключается когда уровень жидкости достигает нижнего уровня. Т.е. режим работы установки является циклическим. При включении насоса характеристика трубопроводной сети соответствует кривой 2, рис. 2, со статическим напором $H_{ст1}$.

При работе насоса и перекачке жидкости в верхний резервуар уровень жидкости в нижнем резервуаре уменьшается, а вместе с этим увеличивается статический напор при неизменной крутизне характеристики сети. При достижении нижнего уровня жидкости в нижнем резервуаре характеристика сети соответствует кривой 3, рис. 2, при статическом напоре $H_{ст2}$.

При перекачивании насосом жидкости рабочая точка системы «насос-трубопровод» перемещается из точки А в точку Б по характеристике насоса, т.е. насос работает с переменным напором от H_A до H_B . Перепад статического напора $\Delta H_{ст} = H_{ст2} - H_{ст1}$ определяется разностью отметок верхнего уровня (ВУ) и нижнего уровня (НУ) нижнего резервуара. В системе перекачки жидкости (рис. 2) с верхнего уровня требуется меньше затрат электрической энергии, чем с нижнего, так как $H_{ст1} < H_{ст2}$.

Поэтому в таких системах лучше применить алгоритм работы [1], при котором насос откачивает из нижнего резервуара ровно столько жидкости, сколько ее туда поступает. В этом случае уровень жидкости в резервуаре стабилизируется на верхнем уровне, а насос постоянно будет работать с пониженным статическим напором $H_{ст1}$. Это возможно при применении регулируемого ЭП насоса. При изменении частоты вращения насоса изменяется положение характеристики насоса. Напри-

Рис. 1. Схема перекачивания жидкости из нижнего резервуара в верхний резервуар:

1, 2 – нижний и верхний резервуары, 3 – насос, 4 – трубопровод

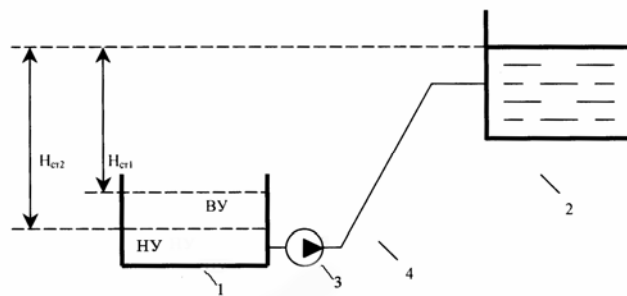


Рис. 2. Характеристики системы перекачивания жидкости рис. 1

мер, при уменьшении частоты вращения в два раза характеристика насоса соответствует кривой 4, а точка пересечения характеристик 4 и 2 соответствует рабочей точке В. В режиме перекачки жидкости рабочая точка системы перемещается по кривой трубопроводной сети от точки А до точки В.

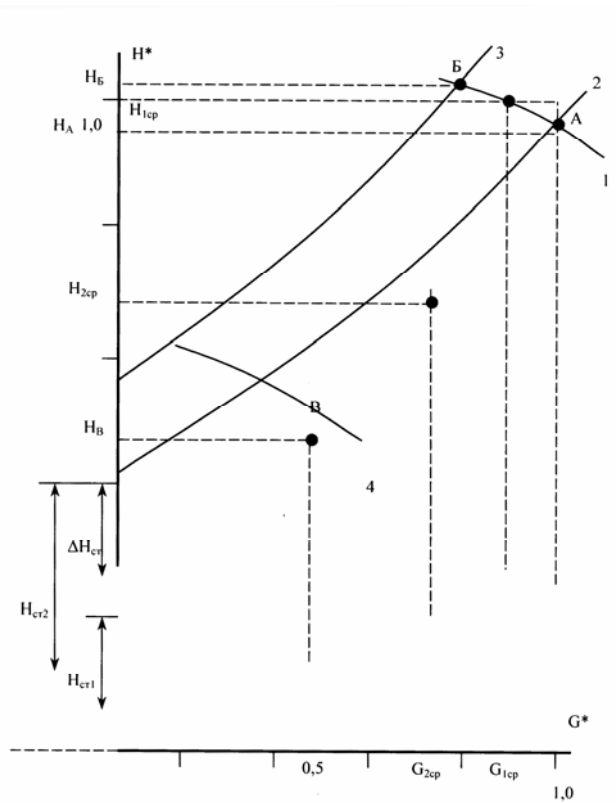
При этом режиме работы системы средний напор насоса очевидно ниже, чем в циклическом режиме и поэтому потребление ЭЭ насосной установкой будет ниже.

Экономия ЭЭ при применении регулируемого ЭП насоса подсчитывается по формуле

$$\Delta W = \frac{\rho g}{1000 \eta_n \times \eta_{\text{эо}} \times \eta_c} \times (G_{1cp} \times H_{1cp} \times t_{1p} - G_{2cp} \times H_{2cp} \times t_{2p})$$

где G_{1cp} , G_{2cp} – средняя подача жидкости за время работы t_{1p} при циклическом режиме и за время работы t_{2p} в режиме с регулируемой подачей;

H_{1cp} , H_{2cp} – средний напор жидкости за время работы t_{1p} при циклическом режиме и за время работы t_{2p} .



Применение частотно-регулируемого ЭП насосных установок шахт Подмосковного угольного бассейна с предложенным алгоритмом управления позволяет уменьшить потребление ими электрической энергии на 30-40 % по сравнению с нерегулируемым ЭП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод насосных установок. М.: ИК "Ягорба" Биоинформсервис. 1998, 180с.

Коротко об авторах

Бабокин Г.И. – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Новомосковского института РХТУ им. Д.И. Менделеева.

© Ф.П. Шкрабец, П.Ю. Красовский,

УДК 621.316.9

Ф.П. Шкрабец, П.Ю. Красовский, Е.А. Вареник

ВЛИЯНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Семинар № 17

При эксплуатации элементов электрооборудования техническое состояние СЭС ухудшается из-за износа и старения вследствие влияния факторов внешней среды в условиях, которых они работают. Среди разных видов влияний внешней среды для большинства элементов СЭС наибольшее влияние оказывают климатические факторы: температура, влажность и давление воздуха, солнечная радиация, дождь, ветер, пыль (в том числе снежная), иней, резкое изменение температур, обледенение. Факторы внешнего механического влияния, специальные (активные) среды влияют только при эксплуатации электрооборудования в соответствующих условиях.

Старение и интенсивный износ элементов СЭС в большинстве случаев не только снижают их надежность, но и вызывают дополнительные потери электрической энергии. Это особенно характерно для электрооборудования, которое находится в эксплуатации продолжительное время и в случаях несвоевременного или некачественного проведения планового технического обслуживания.

В результате анализа реальных условий функционирования и эксплуатации систем электроснабжения установлены технические и эксплуатационные факторы, что приводит к изменению технического состояния и увеличению потерь электроэнергии в элементах СЭС при продолжительной эксплуатации и определяются таким способом.

- В силовых трансформаторах:

- старение изоляции трансформаторов вследствие влияния на нее электрических, тепловых и механических факторов;

- старение электротехнической стали магнитной системы трансформаторов;

- наличие третьих гармоник магнитного потока при некоторых схемах соединенный обмоток трехстержневых трансформаторов увеличивают потери холостого хода (за счет дополнительных потерь в стенках бака и других стальных деталей);

- ухудшение технических параметров трансформаторного масла в отношении содержания влаги, механических примесей и т.п.

- изменение величины и характера нагрузки трансформаторов, в особенности в случае незначительных и малых нагрузок, а также при несимметричных и нелинейных нагрузках;

- изменение отдельных электрических и энергетических параметров трансформатора после ремонтов, что требует входного контроля параметров таких трансформаторов перед их установкой для постоянной эксплуатации.

- В линиях электропередачи:

- ухудшение технического состояния изоляторов;

- изменение конфигурации отдельных участков сети и связанное с этим изменение расчетных значений эквивалентных сопротивлений R_3 и X_3 .

- В измерительных трансформаторах и приборах учета электроэнергии необходимо оценить коммерческие по-

тери электроэнергии обусловленные погрешностями измерительных трансформаторов и влияние этих погрешностей на точность счетчиков электрической энергии, а также коммерческих потерь, обусловленных наличием зоны нечувствительности приборов учета электроэнергии.

Существующим системам измерения и учета электроэнергии присущи следующие особенности:

- значительная часть парка счетчиков электроэнергии устарела и требует замены на современные многофункциональные средства учета;

- потери напряжения в измерительных цепях трансформаторов напряжения превышают нормативные значения;

- величины нагрузок вторичных цепей трансформаторов тока и трансформаторов напряжения не отвечают нормативным требованиям;

- в большинстве пунктов купли-продажи электроэнергии отсутствуют дублирующие счетчики, что противоречит действующим требованиям "Инструкции о коммерческом учете электрической энергии";

- приборы коммерческого учета электроэнергии установлены не в пунктах купли-продажи электроэнергии на оптовом рынке (не на границе балансовой принадлежности электросетей субъектов);

- данные о потерях электроэнергии формируются преимущественно расчетным методом с помощью традиционных морально и физически изношенных устройств телемеханики, которые имеют большие погрешности обработки информации;

- в измерительных схемах используются электросчетчики, трансформаторы напряжения и тока низкого класса точности, что в условиях значительного снижения мощности работают с большой зоной нечувствительности или нелинейности;

- не осуществляется оперативный и синхронизированный по времени сбор данных об изготовлении и потреблении электроэнергии;

- отсутствует метрологическая аттестация систем учета электроэнергии и, как следствие, невозможно использовать их для коммерческого учета;

- каналы связи для передачи данных от пунктов учета электрической энергии к центрам сбора и обработки информации в большинстве случаев имеют низкую скорость или они совсем отсутствуют;

- на ряде межгосударственных линий электропередач не установленный учет электрической энергии.

Главным направлением снижения коммерческих потерь является совершенствование учета электроэнергии, что в современных условиях позволяет получить прямой и довольно быстрый эффект. В частности, по оценкам специалистов, только замена старых однофазных счетчиков класса 2,5 на новые класса 2,0 повышает соби́рание средств за переданную потребителям электроэнергию на 10-20 % за счет увеличения порога чувствительности и увеличения достоверности расчетов.

За данными московского «Энергосбыта», 33 % индукционных счетчиков уже через год работы начинают давать погрешность, которая значительно превышает их класс точности, а через два года - уже 97%! Причем они владеют «способностью» только недоучитывать потребленную энергию.

Повышение точности измерений и учета электрической энергии требует учета с одной стороны погрешностей, внесенных измерительными комплексами, а с другой - учета особенностей энергетических процессов в системах электроснабжения, в особенности при наличии погрузок, которые ухудшают форму кривой напряжения, создающих колебания напряжения, и асимметрию. В общем случае точность измерения мощ-

ности и энергии, потребляемых нагрузкой в системе электроснабжения определяется не только классом точности прибора, но и погрешностями элементов структуры измерительного устройства, то есть зависит от того, на скольких применяемых устройствах учитываются характерные свойства нагрузок (нелинейность или несимметричность, резкопеременность). В большинстве случаев свойства нагрузки обнаруживаются в появлении высших гармонических составляющих напряжения и тока, которые оказывают большое влияние на работу индукционных счетчиков, вследствие чего энергия высших гармоник учитывается с большими погрешностями. Даже низшие гармоники 3-7 порядка могут иметь погрешность до 50 %, а энергия гармоник 11-го порядка и выше практически не учитывается.

Рассмотрена работа электромагнитных измерительных трансформаторов в нормальном режиме и определены влияния первичных и вторичных напряжений и токов, величины их характера внешней нагрузки, частоты тока и других показателей назначения составных погрешностей. Установлено, что даже в нормальном режиме эксплуатации сети могут иметь место погрешности, которые превышают установленные классом точности, что связана с отклонением фактического режима работы измерительных трансформаторов от регламентированных стандартами.

Так, для большинства измерительных трансформаторов тока (ИТТ) при снижении тока первичной обмотки до значения 0,2 токовая погрешность измерения возрастает в 2-3 раза, а при увеличении первичного тока до значения $5I_{1н}$ - также возрастает в 1,3-4,5 раза. Для измерительных трансформаторов напря-

жения (ИТН) превышение мощности нагрузки вторичной обмотки в два раза увеличивает погрешность напряжения в 1,8-2,3 раза (такая нагрузка возможна при эксплуатации трансформаторов НТМИ-10 на подстанциях, когда к распределительному устройству 10 кВ подключено более 10 линий, которые отходят, оснащенные индукционными счетчиками).

Указанные значения отрицательных погрешностей приводит к экономическим потерям для электроснабжающих организаций, так как занижает показания фактически отпущенной потребителю электрической энергии.

Рассмотрена также работа измерительных трансформаторов при аномальных режимах работы эксплуатируемой сети, в частности при постоянных однофазных металлических замыканиях и замыканиях через относительно большое активное сопротивление, при перемежающихся однофазных замыканиях, которые при неправильном настраивании релейной защиты могут существовать продолжительное время (иногда часа и даже круглые сутки).

Расчетами подтверждено, что, например, при металлическом однофазном замыкании электрической сети в случае использования группы из трех однофазных измерительных трансформаторов, нейтральная точка высоковольтных обмоток которых соединена с землей, их магнитная система насыщается, что с одной стороны приводит к увеличению амплитуды токов высоковольтных обмоток и связанного с этим ускоренного износа изоляции обмоток, а с другой - к перекручиванию формы кривой исходящего сигнала, который влияет на точность работы измерительных и информационных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Держский В.Г. Экспертиза структуры потерь электроэнергии в распределительных сетях

Минтопэнерго // Энергетика и Электрификация. - 2002. - №4.-С. 18-22.

2 Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет технологических потерь электроэнергии в электрических сетях // Энергетик. - 2003. - №2. - С. 29-33.

3 Пейзель В.М., Степанов А.С. Расчет технических потерь энергии в распределительных электрических сетях с использованием информа-

Рис. 1. Кинематическая схема вращательного механизма станка СБШ – 320: 1 – электродвигатель; 2 – коробка передач; 3 – шинно-шлицевая муфта; 4 – опорный узел; 5 – штанга; 6 – долото

ции АСКУЭ и АСДУ // Электричество. - 2002. - №3. - С. 10-15.

Коротко об авторах

Шкрабец Ф.П., Красовский П.Ю. – Национальный горный университет, г. Днепропетровск,
Вареник Е.А. – кандидат технических наук, УкрНИИВЭ, г. Донецк.



© С.В. Кузнецов, 2005

УДК 621.333.019.3

С.В. Кузнецов

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ГОРНЫХ МАШИН

Семинар № 17

Совершенствование технологического процесса предприятий предъявляет высокие требования к качеству функционирования электромеханических систем, являющихся главным звеном в обеспечении рабочего процесса конкретных машин и механизмов, входящих в единую технологическую структуру.

Одним из главных требований качества функционирования электромеханических систем является обеспечение их надежности в процессе эксплуатации, следствием чего является снижение времени простоев по причине возникновения неисправности или отказов.

В настоящее время при эксплуатации и техническом обслуживании оборудования

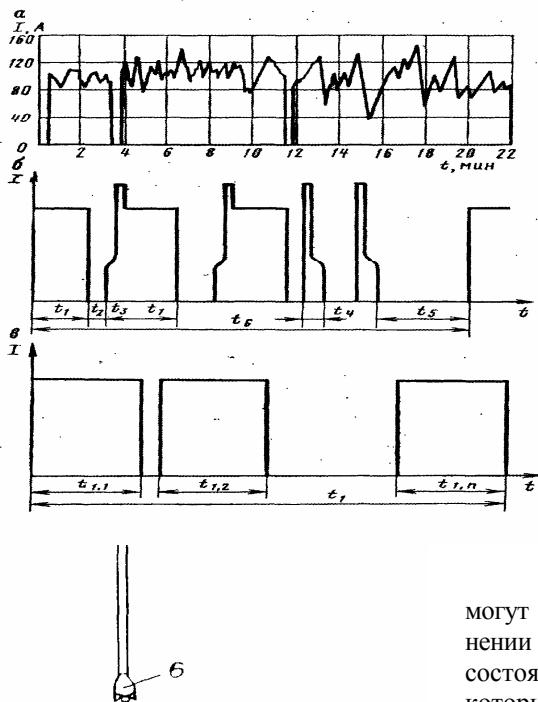
существуют два метода контроля и поддержания технического состояния электромеханических систем:

1. метод - эксплуатация по заданному ресурсу;

2. метод - эксплуатация по состоянию.

Метод эксплуатации по заданному ресурсу эффективен при гарантированном качестве элементов и постоянстве режимов эксплуатации (режимов нагружения).

Данный метод наиболее эффективен в том случае, когда входящие в систему элементы одного иерархического уровня (например, механические передачи, гидро- и электроприводы и т.д.)



обладают высокой и примерно одинаковой надежностью и долговечностью, т.е. при соблюдении так называемого «принципа равной прочности». Однако принцип равной прочности далеко не всегда удается реализовать на практике. Это обусловлено отсутствием единых требований по надежности как к главным элементам системы, так и к составным элементам. Кроме того, электромеханические системы одного и того же исполнения эксплуатируются в различных условиях, испытывая при этом различные нагрузки на элементы, различное воздействие окружающей среды, что особенно проявляется при эксплуатации горных машин. И, наконец, сказываются различия в технологии изготовления элементов.

Метод эксплуатации электромеханических систем по состоянию предполагает два способа проведения работ по техническому обслуживанию:

- регулярное техническое обслуживание элементов системы через заданные

промежутки времени (планово-предупредительный ремонт (ППР));

- измерение необходимых параметров оборудования или

диагностирование состояния элементов, изменяющегося в результате воздействия внешних факторов и старения.

На основании полученных данных решается вопрос о проведении того или иного вида работ по техническому обслуживанию и ремонту.

Но эффективность и экономичность данного метода по сравнению с методом эксплуатации по заданному ресурсу могут быть обеспечены только при применении систем безразборной диагностики состояния электромеханических систем, которые позволяют осуществлять контроль технического состояния по входным и выходным параметрам, а также передаточным функциям каждого элемента электромеханических систем не прерывая рабочего процесса. Этот метод является наиболее прогрессивным методом обслуживания оборудования, так как основан на использовании глубокой количественной информации о техническом состоянии оборудования по сравнению с информацией только о моментах отказов. Эти два метода можно считать методами управления надежностью, но они не позволяют влиять на состояние электромеханической системы, а только констатировать факты неисправностей.

В основе факторов влияющих на надежность каждого элемента системы, рис. 1, лежат динамические воздействия, являющиеся следствием взаимодействия исполнительного органа с забоем рис. 2. В основе оценки динамики нагружения электромеханической системы лежит математическая модель:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 = M_y - M_c(t) \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 = M_{\partial\partial} - M_y \\ 1 - \frac{\ddot{\varphi}_2}{\omega_0} = \nu(M_{\partial\partial} - T_{\partial} \dot{M}_{\partial\partial}) \\ M_y = K(\varphi_2 - \varphi_1) \end{cases}$$

где $M_{\text{дв}}$ – момент двигателя; электродвигателя; M_y – момент упругий трансмиссии ИО; $M_c(t)$ – момент сопротивления породы резанию; J_1 – момент инерции ИО; J_2 – момент инерции электродвигателя; φ_1 – угловая координата ИО; φ_2 – угловая координата вала электродвигателя; ω_0 – угловая скорость идеального холостого хода электродвигателя.

Данная математическая модель, построена на базе динамической рис. 3 и расчетной эквивалентной моделей привода исполнительного органа рис. 4.

Как показывает практика эксплуатации, в основе причин возникновения неисправности и отказов лежат как внешние факторы, к которым относятся факторы нагружения и окружающей среды, так и внутренние факторы к которым можно отнести физические и структурные параметры электромеханических систем.

В процессе разрушения горной породы, электромеханическая система подвергается воздействию двух основных видов динамических колебаний:

- собственных;
- вынужденных.

Рис. 3. Эквивалентная динамическая модель вращателя станка СБШ – 320

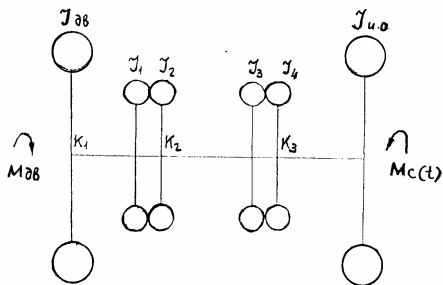


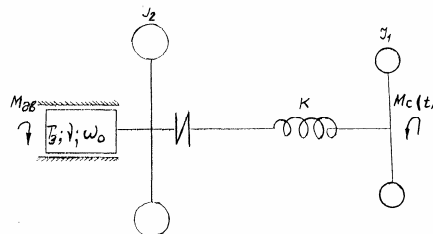
Рис. 2. Нагрузка и режим работы электродвигателя механизма вращателя бурового станка: а - осциллограмма нагрузки двигателя вращателя; б - диаграмма цикла работы станка; в - операция бурения станка с нижним расположением механизма вращателя

Если собственные колебания в основном зависят от характеристик самой электромеханической системы, то на характер вынужденных, оказывают влияние как характеристики разрушаемой горной породы, так и вид и качество рабочего инструмента.

Как показывают данные многих исследователей (Шадрин А.И., Махно Д.Е., Кантович Л.И. Фащиленко В.Н., Хошмухамедов И.М.), диапазон собственных частот изменяется в пределах 3÷6 Гц; а диапазон вынужденных частот зависит от условий эксплуатации и крепости породы и лежит в пределах 1,5÷3 Гц. Взаимодействие указанных выше частот влияет на динамические свойства электромеханической системы, что в свою очередь определяет показатели надежности как отдельных элементов, так и всей системы в целом.

Имея динамические схемы электромеханической системы и построив структурно-функциональные модели надежности этой системы, промоделировав все связи между элементами системы и изучив

Рис. 4. Расчетная эквивалентная динамическая модель вращателя станка СБШ – 320



влияние крепости породы на динамические процессы в системе, возможно определить основные частоты собственных и вынужденных колебаний.

Основываясь на работах авторов Идиятуллина Р.Г., Труханова В.М. в качестве закона распределения вероятности безотказной работы электромеханической системы принят экспоненциальный закон, «Р»- вероятность безотказной работы определяется:

$$P(t) = \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t).$$

где λ_i - интенсивность отказов i -го элемента системы; t – время работы системы.

Имея возможность изменять частоту колебаний электромеханической системы, по методу предложенному Фащиленко В.Н., тем самым, улучшая разрушение горной породы, мы можем улучшить условия функционирования каждого элемента системы, снижая динамические нагрузки.

В силу того что каждый элемент электромеханической системы подвержен накопительному износу, изменяя « f »- частоту колебаний системы (снижая динамические нагрузки) мы можем оказывать активное влияние на показатели надежности системы, что можно выразить через показатель интенсивности износа:

$$\mu = F(M; f_{cb}; f_{вн}).$$

где μ - интенсивность износа; M - момент двигателя; f_{cb} - собственные динамические колебания; $f_{вн}$ - вынужденные динамические колебания.

Основной задачей разработки метода непосредственного управления надежностью - износом элементов электромеханических систем, опираясь на результаты исследований в области управления резонансными частотами Фащиленко В.Н., является определение возможности влияния на частоту нагружения этих элементов, следствием чего влияние на режимы работы и на их надежность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махно Д.Е., Шадрин А.И. Надежность карьерных экскаваторов и станков шарошечного бурения в условиях севера. – М.: Недра, 1976, 168 с.
2. Подэрни Р.Ю., Хромой М.Р. Станки вращательного бурения шарошечными долотами. – М: МГИ, 1990, 20 с.
3. Труханов В.М. Методы обеспечения надежности изделий машиностроения, – М.: Машиностроение, 1995, 304 с.;
4. Фащиленко В.Н. дис. «Структурный анализ и синтез систем управления электромеханическими системами горных машин». – М.: МГТУ, 2004.

Коротко об авторах

Кузнецов С.В. – кафедра электрификации и энергоэффективности горных предприятий, Московский государственный горный университет.

2005

УДК 622.625-83(06)

Д.В. Волков, Ю.П. Сташинов

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА НА РУДНИЧНОМ ЭЛЕКТРОВОЗЕ

Семинар № 17

Улучшение экономических показателей работы локомотивного транспорта возможно за счет снижения удельного расхода электроэнергии средствами электропривода. Одним из перспективных направлений решения этой задачи является оборудование рудничных электровозов асинхронным частотно-регулируемым приводом.

Для применения такого привода на рудничном электровозе требуется решить следующие технические задачи:

- формирование рациональной тяговой характеристики локомотива;
- равномерное распределение нагрузки между ведущими осями локомотива, а при работе по системе многих единиц – также и между локомотивами.

Вопрос о рациональном виде тяговой характеристики является неоднозначным. На протяжении длительного времени применения на шахтных электровозах двигателей постоянного тока последовательного возбуждения он был фактически предрешен. Тяговая характеристика локомотива, оборудованного двигателями постоянного тока последовательного возбуждения, наряду с положительными свойствами, имеет существенные недостатки.

Во-первых, в области малых нагрузок скорость локомотива резко возрастает, что затрудняет управление и создает повышенную опасность. Во-вторых, затруднен перевод привода в тормозной режим (требуется внешнее управляющее воздействие, меняющее форму тяговой характеристики). В третьих, мягкая характеристика привода в области номинальных нагрузок способствует снижению потенциальной производительности откатки. В асинхронном приводе путем соответствующего

программирования системы управления можно получить тяговую характеристику практически любой формы.

Наиболее известна для таких случаев тяговая характеристика, состоящая из трех участков: жесткого участка в области малых и отрицательных нагрузок, участка постоянной мощности в области средних и больших нагрузок и участка ограничения момента в области нагрузок, близких к предельным по условию сцепления (рис. 1).

В этом случае обеспечивается стабильная работа в области малых нагрузок и простота перехода в тормозной режим; регулируемое ограничение максимального момента. Такая характеристика считается рациональной для целей электротяги, что подтверждается ее применением на магистральных электровозах с бесколлекторными тяговыми двигателями [1]. При использовании указанной тяговой характеристики на рудничном электровозе требуется решение задачи оптимизации ее формы, касающейся, в основном, размеров участка постоянной мощности. С одной стороны, расширение этого участка позволяет применить двигатель меньшей мощности, а также лучше использовать энергию, запасенную в инерционных массах состава. С другой стороны, расширение этого участка вызывает снижение производительности электровоза.

Вопрос оптимальной жесткости тяговой характеристики актуален и для жесткого участка с точки зрения использования инерционных масс состава. Решение задачи оптимизации представляется многовариантным и, очевидно, требующим введения дополнительных критериев.

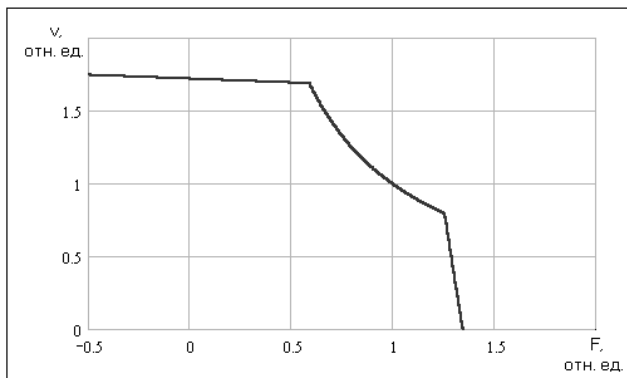


Рис. 1. Тяговая характеристика электровоза

с асинхронным приводом, может отличаться в 3 и более раз при допуске ПБ износе бандажей. Такое положение приводит к значительному недоиспользованию сцепного веса. Более того, при неблагоприятных обстоятельствах возможен переход одного из двигателей в тормозной режим (с противодействием другому двигателю).

Равномерное распределение нагрузки между ведущими осями необходимо для получения максимального возможного тягового усилия. Как известно, тяговое усилие локомотива определяется суммой тяговых усилий, создаваемых его ведущими осями, которые, в свою очередь, ограничены произведением коэффициента сцепления на часть сцепного веса локомотива, приходящуюся на данную ось. Следовательно, максимальное тяговое усилие локомотива соответствует условию, когда распределение тяговых усилий осей аналогично распределению сцепного веса по $Oся \cdot m$. Так как при проектировании механической части электровозов добиваются равномерного распределения сцепного веса по осям, условию максимального тягового усилия соответствует равномерное распределение тяговых усилий по осям.

С точки зрения привода равномерное распределение тяговых усилий трудно реализуемо, так как непосредственное измерение тягового усилия ведущей оси затруднено. Более удобно реализовать условие равномерного распределения вращающих моментов ведущих осей. При этом возникает некоторая неравномерность тяговых усилий, вызванная неодинаковым износом бандажей, однако ее влияние на использование сцепного веса сравнительно невелико (неравномерность порядка 3 %).

Условие равномерности распределения тяговых усилий может быть нарушено различными факторами, основным из которых является неравномерный износ бандажей ведущих колес, приводящий к неравенству полного передаточного отношения (радиуса приведения) от вала приводного двигателя к ободу колеса. В этом случае одинаковым линейным скоростям бандажей колес (при отсутствии проскальзывания) соответствуют различные угловые скорости приводных двигателей. Анализ показывает, что без принятия специальных мер по выравниванию нагрузки сила тяги, развиваемая колесными парами

целесообразно выполнять электрическим способом, соответствующим воздействием на преобразователи, питающие тяговые двигатели. В пользу данного решения говорят следующие аргументы:

- получение равных вращающих

моментов у двух и более асинхронных двигателей путем их специального соединения усложняет силовую схему электровоза, а также приводит к нежелательным последствиям, таким как неустойчивость работы привода при наличии проскальзывания колес;

- равномерное распределения нагрузки между локомотивами, работающими по системе многих единиц, путем свя-

звания двигателей по силовым цепям существенно усложняет как их конструкцию, так и процесс сцепки;

- применение индивидуально управляемых преобразователей позволяет реализовать специальные законы управления, например, компенсировать значительную разность износа бандажей и, тем самым, получить максимально возможное тяговое усилие.

Как известно, существуют различные способы индивидуального регулирования момента асинхронного двигателя путем воздействия на параметры его источника питания. Выбор того или иного метода определяется особенностями его реализации в конкретном применении. В данном случае возможны два основных варианта:

- питание тяговых двигателей от индивидуальных преобразователей частоты, выходное напряжение и частота которых управляются независимо (коррекция по частоте);

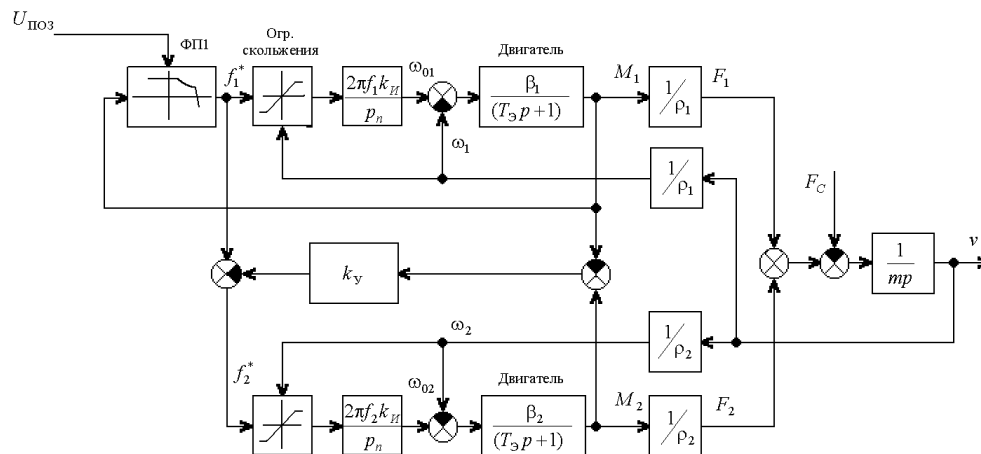
- питание тяговых двигателей от общего преобразователя частоты с выравниванием момента путем индивидуально регулирования напряжения на двигателях с помощью дополнительного силового аппарата (коррекция по напряжению).

В настоящее время прогресс в области силовой электроники позволяет строить преобразователи частоты, имеющие срав-

нительно небольшие размеры и стоимость, что дает возможность применить индивидуальные преобразователи для питания каждого тягового двигателя. Поэтому при построении силовой схемы рудничного электровоза следует ориентироваться именно этот вариант, позволяющий реализовать как коррекцию по частоте, так и коррекцию по напряжению, которая, как показано в [2], лучше с энергетической точки зрения. Данное построение имеет дополнительные преимущества, такие как повышение надежности привода - в случае выхода из строя привода одной из ведущих осей имеется возможность продолжения движения электровоза.

Для решения вышеуказанных задач с использованием асинхронного частотно-регулируемого привода требуется применение специальной системы управления (регулирования). В функции этой системы входит формирование механической характеристики требуемой формы и равномерное распределение нагрузок между тяговыми двигателями (создание условий для получения равных вращающих моментов). Реализация указанных функций может быть обеспечена введением обратных связей по вращающим моментам тя-

Рис. 2. Структурная схема системы регулирования



говых двигателей. Упрощенная структура такой системы показана на рис. 2. На данной схеме условно показаны только два тяговых двигателя (случай управления одним электровозом).

Суммарная сила тяги складывается из сил тяги двух ведущих осей F_1 и F_2 , равных произведению моментов двигателей на коэффициенты, равные величинам, обратным соответствующим радиусам приведения ρ_1 и ρ_2 . Последние в общем случае не равны. Двигатели представлены упрощенно как апериодические звенья, охваченные внутренней обратной связью по скорости. Входным воздействием для указанных звеньев является разность синхронной и реальной угловых скоростей вращения ротора, то есть, фактически, скольжение. Величина синхронной угловой частоты вращения ротора зависит от величины выходной частоты инвертора f , при этом предполагается, что его выходное напряжение регулируется так, что величина критического момента двигателя поддерживается постоянной.

Система состоит из двух каналов (ведущего и ведомого) и подсистемы выравнивания нагрузок. Задающим воздействием для системы является сигнал задания скорости холостого хода привода в относительных единицах $U_{\text{Поз}}$. Синтез механической характеристики осуществляется в ведущем канале с помощью нелинейного звена ФП1, статическая характеристика которого аналогична по виду требуемой тяговой характеристике локомотива. При этом формируется сигнал управления частотой напряжения питания двигателя ведущего канала. Для выравнивания вращающих моментов тяговых двигателей в систему введен регулятор момента, изменяющий требуемым образом сигнал задания частоты инвертора ведомого канала,

то есть производится коррекция по частоте. Аналогично можно реализовать и коррекцию по напряжению.

По предложенной структуре была составлена математическая модель, с использованием которой исследовалось по-

ведение системы в различных переходных режимах. В качестве примера на рис. 3 приведены графики изменения во времени скорости движения в км/ч (верхний график), тягового усилия электровоза в Н (средний график) и разности тяговых усилий ведущих осей при запуске привода ненагруженного электровоза (без состава). При моделировании был имитирован износ бандажей колес одной из ведущих осей на величину, максимально допустимую по ПБ.

Результаты моделирования позволяют, что:

- предложенная структура системы электропривода работоспособна и обеспечивает формирование требуемой механической характеристики;
- подсистема выравнивания тяговых усилий обеспечивает примерно равномерное их распределение между ведущими осями. При отсутствии указанной подсистемы неравномерность распределения тяговых усилий при разнице диаметров бандажей колесных пар в 20 мм превышает 50 % общего тягового усилия электровоза.

С учетом изложенного, при проектировании асинхронного частотно-регулируемого привода рудничного электровоза можно руководствоваться следующими положениями:

- Тяговая характеристика локомотива должна иметь форму, содержащую три характерных участка (рис. 1).

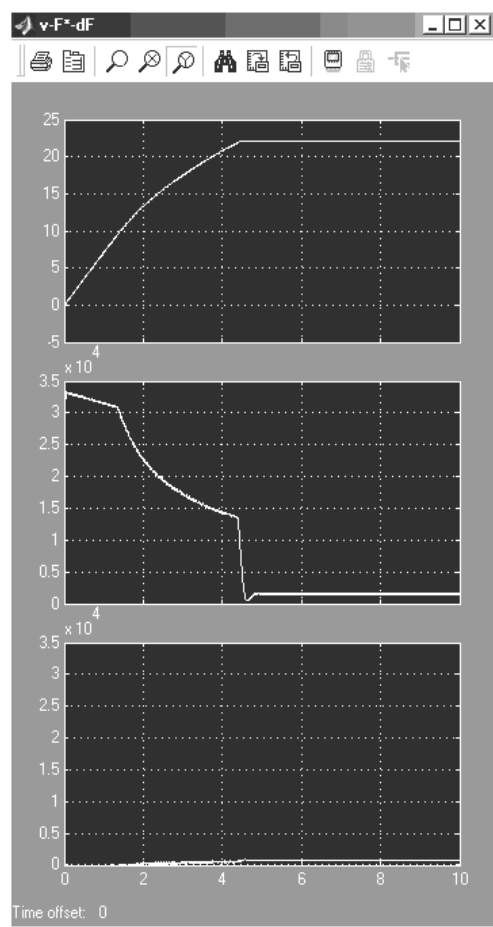


Рис. 3. Кривые скорости, тягового усилия и разности тяговых усилий ведущих осей при разгоне незагруженного электровоза с изношенным бандажом на одной из колесных пар

- Схему питания тяговых двигателей целесообразно строить с использованием индивидуальных управляемых преобразователей (инверторов) для каждого двигателя.
- Для реализации максимально возможного тягового усилия обязательно применение специальных мер по равномерному распределению тягового усилия между ведущими осями.
- Формирование тяговой характеристики целесообразно производить общим формирующим устройством для всех двигателей, производя коррекцию частоты или (и) напряжения питания отдельных двигателей для равномерного распределения тягового усилия между ведущими осями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янов В.П., Лозановский А.Л., Сушлова К.Н., Штепенко П.К. Магистральный электровоз постоянного тока с асинхронным приводом и улучшенными тягово-энергетическими характеристиками// Электровозостроение: Сб. науч. тр. ОАО «Всерос. н.-и. и проектно-конструкт. ин-

т электровозостроения» (ОАО «ВЭЛНИИ»).- Новочеркасск, 1998.-Т. 40.-345 с.
 2. Конашинский А.Ю. Влияние электрических видов коррекции электромеханических характеристик асинхронных тяговых двигателей на их энергетические показатели. // Электровозостроение: Сб. науч. тр. ОАО «Всерос. н.-и. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения» (ОАО «ВЭЛНИИ»).- Новочеркасск, 2000.-Т. 42.-324 с.

Коротко об авторах

Волков Д.В. – аспирант,
 Сташинов Ю.П. – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра «Электрификация и автоматизация производства», Шахтинский институт Южно-Российского государственного технического университета (НПИ), г. Шахты.