

УДК 621.316.726

*С.Н. Решетняк***К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ЧАСТОТНО – РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК**

Семинар № 17

**Р**азвитие горнодобывающей промышленности в России предусматривает использование шахтных подъемных установок, в которых более жесткие требования стали предъявляться к таким понятиям как надежность, быстрдействие, эффективность, повышение точности движения, удобство эксплуатации.

Ведущие позиции по вышеперечисленным требованиям занимает система преобразователь частоты – двигатель. В связи с этим, следует рассмотреть особенности применения частотно – регулируемого привода в качестве электропривода шахтных подъемных установок.

В настоящее время в качестве электроприводов шахтных подъемных установок, в большинстве случаев, используется асинхронные электродвигатели с фазным ротором. Существенный недостаток при использовании вышеуказанных электродвигателей является наличие дополнительных потерь электроэнергии на сопротивлениях в роторной цепи. Одним из способов решения этой проблемы является использование в качестве приводных двигателей шахтных подъемных установок асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, включённых по схеме преобразователь частоты – двигатель.

Лидирующие места в мире по производству промышленных преобразователей частоты для асинхронных электроприводов занимают фирмы Emotron, Siemens (Германия), ABB Industry Oy и Vaasa Control Oy (Финляндия).

В современной практике используются преобразователи трех типов: с промежуточным звеном постоянного тока и автономным инвертором напряжения (тока) (ПЧ-АИ); непосредственный преобразователь частоты (НПЧ) и преобразователь частоты с широтно-импульсной модуляцией (ПЧ-ШИМ) выпрямленного напряжения. В преобразователе (ПЧ-АИ) имеется возможность для регулирования

частоты выходного напряжения (тока) независимо от величины ее в сети питания. В преобразователе (НПЧ) диапазон регулирования частоты ограничен 3-20 Гц при частоте сети 50 Гц. В преобразователе частоты с ШИМ также регулируемая частота напряжения (тока) не ограничивается как и в ПЧ-АИ, но гармонический состав токов, потребляемых из сети, существенно лучше [1].

Однако компания АВВ в 1995 г. начала использовать так называемое прямое регулирование момента (Direct Torque Control – DTC), пришедшее на замену традиционной ШИМ.

Технология DTC является «революционным» методом управления для электроприводов переменного тока, позволяющая вести точный контроль скорости и момента двигателя без использования тахометра, начиная с нулевой скорости. В технологии DTC основными регулируемыми параметрами являются магнитный поток статора и момент. Параметры состояния двигателя обновляются 40 тысяч раз в секунду в самой совершенной программной адаптивной модели двигателя высокоскоростным процессором обработки цифровых сигналов. Постоянная коррекция текущего состояния двигателя и сравнение действительных параметров процесса с опорными значениями происходят так, что каждая коммутация в инверторе определяется отдельно [1].

При построении преобразователей частоты для асинхронных электроприводов используются современные, полностью управляемые, полупроводниковые приборы (биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT (insulated gate bipolar transistor), или тиристоры с симметричным управляющим электродом SGCT (integrated gate-commutated thyristor)). Тиристор – это самый старый коммутирующий прибор, используемый в настоящее время, однако он все же пользуется коммерческим успехом, причиной тому, потери на электропровод-

ность в нем значительно ниже, чем в SGCT тиристорах и IGBT транзисторах. В отличие от классического тиристора, SGCT тиристор можно включить или выключить в любой момент времени, что делает его электронным выключателем с большим быстродействием. Однако SGCT тиристор при включении вызывает резкие броски тока, способные повредить вспомогательные элементы, в особенности диоды. В силу этого, последовательно с такими тиристором необходимо включать защитную цепь (в сущности, RC – цепи). Чтобы исключить необходимость применения такой демпфирующей цепи, необходимо очень точно синхронизировать момент запираания (в наносекундном масштабе), что на сегодняшний день осуществить практически невозможно [2].

Биполярный транзистор с изолированным затвором, как и все транзисторы представляет собой линейный элемент, и поэтому является управляемым в любой момент времени. Благодаря этому скорость переходов между открытым и закрытым состоянием может быть резко снижена, что делает IGBT транзистор очень удобным в использовании.

Перечислим некоторые преимущества IGBT – транзистора:

- не требуется применение защитных цепей, необходимых для IGCT - тиристора;
- транзисторы IGBT без особых сложностей включаются параллельно;
- последовательное включение возможно без ограничения, однако для оптимальной работы рекомендуется включение небольших RC – фильтров параллельно с каждым прибором.

Единственный недостаток в данном полупроводниковом приборе – это то, что плотность подвижных носителей заряда в открытом состоянии несколько ниже, чем в тиристоре IGCT, следовательно, потери на проводимость несколько выше [2].

Наибольшим успехом в создании современных силовых полупроводниковых приборов достигли такие корпорации Toshiba, Mitsubishi, Hitachi, Fuji (Япония), Magconi (Англия), AEG (Германия), ABB (Финляндия), Thomson (Франция), Westinghouse, Motorola (США), АО «Электровыпрямитель» (Россия), НПО «Преобразователь» (Украина).

Необходимой составной частью высоковольтных преобразователей частоты является выходной фильтр, который позволяет получить сглаженную форму напряжений и токов статора.

Этим устраняется опасность старения изоляции обмоток двигателя, вызванная наличием крутых фронтов выходных напряжений (токов) инвертора. Следовательно, представляется возможность использования стандартных асинхронных двигателей. Отсутствие выходного фильтра приводит к изменению стандартной изоляции обмоток двигателя, что сказывается на его стоимости. Преобразователи частоты обеспечивают плавное регулирование скорости и реверсирования двигателя с возможностью рекуперативного торможения в случае применения активных выпрямителей напряжения (тока) или реверсивных тиристорных выпрямителей для питания автономных инверторов.

В качестве примера представляется, типовой статический преобразователь частоты с промежуточным контуром постоянного напряжения Simovert MasterDrives VC фирмы Seimens. Данные преобразователи выпускаются на ряд мощностей от 0,55 до 2300 кВт [3].

Особенностью преобразователей Simovert является необходимость установки трехобмоточного трансформатора для согласования напряжения сети и вентиляционной схемы выпрямителя. В качестве источников питания автономных инверторов используются неуправляемые выпрямители (диоды). Для гашения энергии, отдаваемой приводом в тормозных режимах, в схеме предусмотрен модуль рассеяния энергии. Существенным недостатком данного варианта является наличие индивидуального трехобмоточного трансформатора для каждого преобразователя частоты, а также отсутствие рекуперации при тормозных режимах работы.

Также следует отметить, что существует другой вариант исполнения преобразователя Simovert, где все преобразователи частоты получают питание от одного трехобмоточного трансформатора. В данной схеме диоды в выпрямителе, уступили место активному выпрямителю напряжения, выполненному на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT-транзисторы). Основной функцией данного выпрямителя является стабилизация напряжения в цепи постоянного тока. При таком варианте исполнения преобразователя возможна рекуперация электрической энергии в сеть. А также возможно изменение коэффициента мощности в сторону его увеличения выше нормативного.

Основные преимущества схемы преобразователь – двигатель:

- применение инвертора тока (напряжения) на полупроводниковых приборах обеспечивает высокую надежность силовой части привода;

- малое сечение кабелей, соединяющих двигатель с преобразователем частоты;

- малые потери мощности в соединительных проводах;

- возможность рекуперации энергии в сеть в тормозных режимах работы привода;

- применение однотипного оборудования, что обеспечивает высокую степень унификации;

- возможность работы преобразователя в двигательном и генераторном режимах;

- возможность работы с токоограничивающим реактором.

Наиболее существенными недостатками преобразователей частоты являются:

- обязательная установка конденсаторного фильтра на выходе преобразователя, реак-

тивная мощность которого составляет примерно 60 ÷ 80 % от полной мощности двигателя;

- сравнительно низкая несущая частота широтно-импульсной модуляции, что обусловлено свойствами используемых силовых полупроводниковых приборов;

- напряжение на общих шинах переменного напряжения превышает соответствующий номинальный уровень как минимум в три раза;

- высокая стоимость.

Анализ основных технических характеристик системы преобразователь частоты – двигатель показывает принципиальную возможность применения в качестве электропривода подъемных установок для тяжелых условий эксплуатации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковчин С.А. Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебник для вузов. - СПб.: Энергоатомиздат. Санкт – Петербургское отделение, 2000. – 496 с.

2. Штефан Линдер Силовые полупроводниковые приборы. АББ ревю 4/2003. с.27-31

3. Преобразователи частоты Seimovert// Технический каталог Seimens – 1997.

#### Коротко об авторах

Решетняк Сергей Николаевич – Московский государственный горный университет.

#### ДИССЕРТАЦИИ

#### ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
<b>МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ</b>			
ДИДЕНКО Виктор Васильевич	Совершенствование мер безопасности управления забойными машинами в условиях воздействия электромагнитного поля силовых цепей	05.26.01	к.т.н.



© И.М. Хошмухамедов, 2005

УДК 622.271.4;62-83

*И.М. Хошмухамедов*

## **ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА КОВША КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ**

Семинар № 17

Электродрифт механизма подъема ковша экскаватора ЭКГ-10 представляет собой сложную систему (рис.1), которая в процессе экскавации находится под воздействием резкопеременных динамических нагрузок, которые являются одной из причин отказов элементов системы, что приводит к простоям экскаваторов, и, как следствие, потерям производительности [1]. Кроме того, в процессе всего периода эксплуатации, для рассматриваемой системы характерно наличие постепенного (накопительного) износа ее элементов, что предполагает проведение мероприятий технического обслуживания и ремонта, несвоевременное выполнение которых способствует возникновению отказа как конкретного элемента, так и всей системы. Контроль технического состояния электропривода в процессе работы предполагает применение системы безразборной диагностики, в основе которой лежат принцип совокупности элементарных проверок и допусковых методов, характеризующихся тем, что заключение о техническом состоянии делается по результатам оценки значений сигналов в контрольных токах [2; 3]. Результаты контроля при этом сводятся к оценке вида “в допуске – не в допуске”. Поэтому для описания технического состояния системы электропривода, диагностирование которой осуществляется допусковыми методами, находят применение модели логического типа.

На основе функциональной схемы электропривода механизма подъема ковша строится структурная модель электропривода (рис. 2), являющаяся исходной формой представления диагностической модели логического типа (рис. 3).

Каждый функциональный элемент может использоваться в качестве первичного лишь в том случае, если он всегда имеет только один выходной сигнал с контролируемым на единственном выходе параметром при произвольном конечном числе входных сигналов. Кроме того, если входной или выходной сигнал характеризуется несколькими параметрами, то каждый из этих па-

раметров должен быть представлен отдельным входом (выходом) функционального элемента.

Можно выделить следующие основные группы, на которые разделяется все многообразие функциональных элементов:

1) функциональные элементы, вход и выход которых связан функциональной зависимостью

$$Z_{\text{вых.}} = f(x_1, x_2, \dots, x_k; a_1, a_2, \dots, a_n),$$

где  $Z_{\text{вых.}}$  – параметр выходного сигнала;  $x_1, x_2, \dots, x_k$  – параметры входных сигналов на имеющихся  $K$ -входах;  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – параметры, характеризующие внутренне состояние функционального элемента;

2) функциональные элементы, связь входа и выхода которых определяется функционалом

$$Z_{\text{вых.}} = \int_0^t \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k; a_1, a_2, \dots, a_n) dt$$

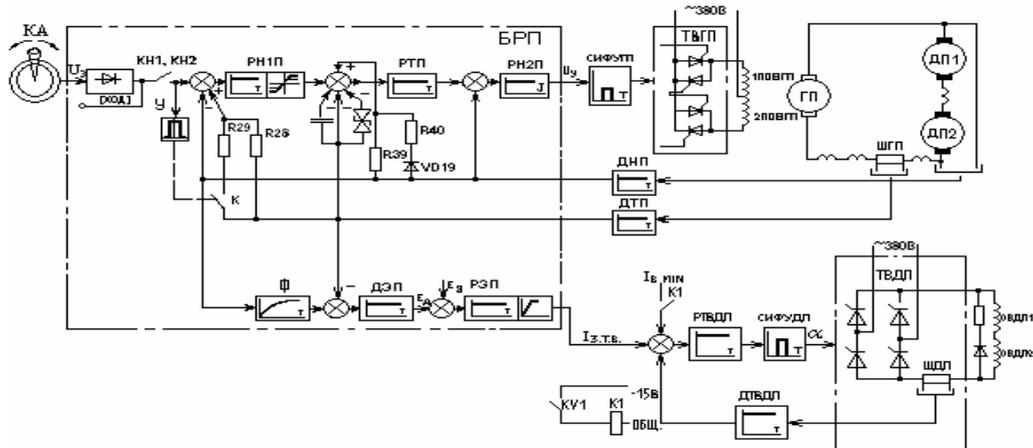
3) функциональные элементы, связь входа и выхода которых определяются оператором

$$z_{\text{вых.}i}(p) = K(p)x_i(p), i=1,2,\dots,k,$$

где  $K(p)$  – передаточная функция или оператор системы;

4) функциональные элементы, выход которых определяется только их внутренним состоянием из-за отсутствия входных сигналов.

Если для функциональных элементов 1 и 2-ой групп входные сигналы всегда имеют номинальное значение, то выходной сигнал элемента будет характеризовать его внутреннее состояние. В том случае, когда функциональный элемент находится в исправном состоянии, то он работоспособен. Исправному состоянию в идеальных условиях соответствует номинальное значение параметра выходного сигнала. В реальных условиях при небольших отклонениях параметра выходного сигнала от номинального значения, функциональный элемент еще не теряет свою работоспособность. Только после выхода параметра за пределы некоторого поля допустимых значений (поля допуска) наступает отказ.



**Рис. 1** Функциональная схема электропривода механизма подъема ковша экскаватора ЭКГ-10: КА – командоаппарат; У – усилитель; РН1П, РН2П – регуляторы напряжения двигателя подъема; Ф – фильтр; ДЭП – датчик ЭДС подъема; РТП – регулятор ЭДС подъема; СИФУГП – система импульсно-фазового управления генератора подъема; ДНП – датчик напряжения подъема; 1,2 ПОВГП – 1 и 2 полуобмотки возбуждения генератора подъема; ТВГП – тиристорный возбудитель генератора подъема; ГП – генератор подъема; ДП1,2 – 1 и 2 двигателя подъема; ШГП – шунт генератора подъема; РТВДП – регулятор тока обмоток возбуждения двигателей подъема; СИФУДП – система импульсно-фазового управления возбудителем двигателей подъема; ДТВДП – датчик тока обмоток возбуждения двигателей подъема; ТВДП – тиристорный возбудитель двигателей подъема; ШДП – шунт двигателей подъема; ОВДП1,2 – обмотки возбуждения двигателей подъема; РТП – регулятор тока двигателей подъема; ДТП – датчик тока двигателей подъема

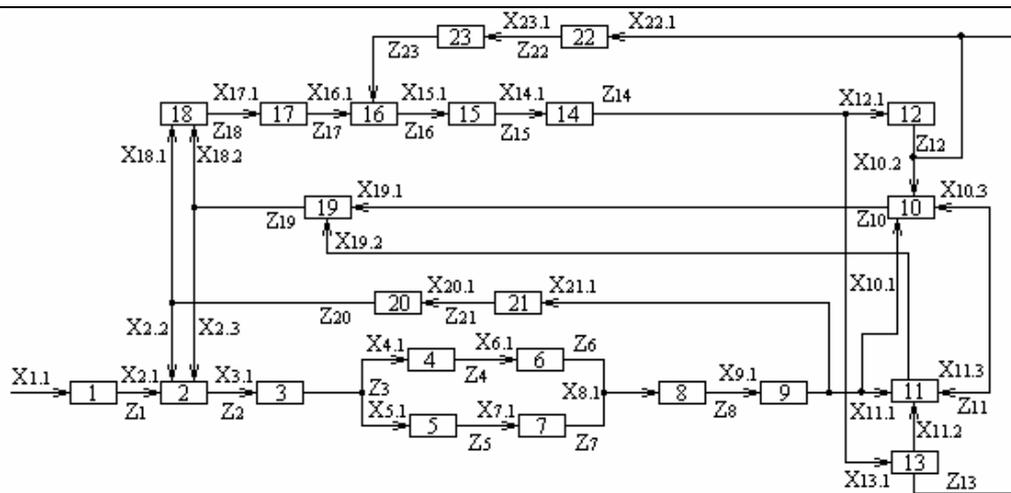
Аналогичные соображения справедливы и для объектов 4-ой группы, поскольку отсутствующие входные сигналы можно рассматривать как входные сигналы с нулевыми номинальными значениями.

Изменение состояния функционального элемента 3-ей группы определяется его передаточной функцией  $K(p)$ . При этом ее структура определяет качественную сторону вопроса, а основные параметры характеризуют количественные изменения, происходящие в функциональном элементе. Установив для него условие работоспособности, можно определить допустимые пределы изменения параметров передаточной функции. Таким образом, функциональные элементы 3-ей группы можно считать исправными, если при известной структуре передаточной функции ее основные параметры находятся в поле допуска. Выход любого параметра за пределы поля допуска, рассматриваемый как отказ, является случайным событием. Следовательно, при решении задачи оценки работоспособности функционального элемента последний можно считать заданным в этом случае, если для его каждого выходного параметра или параметра известной передаточной функции указана вероятность  $P_i$  невыхода из поля допуска, в котором он должен находиться при номинальных входных сигналах и исправном состоянии.

Построим диагностическую модель, обозначив внешние входы каждого функционального элемента  $x_{ij}$ , где первый индекс соответствует номеру функционального элемента, а второй – номеру его входа; выходы функциональных элементов, являющиеся входами других функциональных элементов (связанные или промежуточные выходы) обозначим  $u_{ij}$ , где первый индекс соответствует номеру функционального элемента, а второй – номеру его выхода; выходы, которые не используются в качестве входов других функциональных элементов (свободные выходы) обозначим  $z_{ij}$ , где первый индекс соответствует номеру функционального элемента, а второй – номеру его выхода (рис. 2).

Будем считать, что значение входа или выхода функционального элемента является допустимым, если значения всех характеризующих его сигналы параметров принадлежат областям их допустимых значений, т.е. находятся в поле допуска. Значение входа и выхода недопустимо, если значение хотя бы одного из указанных параметров выходит за пределы поля допуска. Поэтому  $x_{ij}$  можно рассматривать как логические переменные, принимающие только два возможных значения “1” и “0”. При этом значение  $x_{ij} = 1$  эквивалентно тому, что  $j$ -й вход-





**Рис. 3. Диагностическая модель электропривода механизма подъема ковша экскаватора ЭКГ-10:** 1 – Командо-аппарат управления электроприводом механизма подъема ковша (КАП); 2 – Блок регуляторов системы управления электроприводом механизма подъема ковша (БРП); 3 – Система импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем генератора механизма подъема ковша (СИФУГП); 4 – Тиристорный преобразователь питания первой полуобмотки возбуждения генератора механизма подъема ковша (1ТПГП); 5 – Тиристорный преобразователь питания второй полуобмотки возбуждения генератора механизма подъема ковша (2ТПГП); 6 – Первая полуобмотка возбуждения генератора механизма подъема ковша (1ПОВГП); 7 – Вторая полуобмотка возбуждения генератора механизма подъема ковша (2ПОВГП); 8 – Магнитная система генератора механизма подъема (МСГП); 9 – Якорная цепь электропривода механизма подъема (ЯЦП); 10 – Маховая масса и магнитная система левого электродвигателя механизма подъема (ДП); 11 – Маховая масса и магнитная система правого электродвигателя механизма подъема (ДП); 12 – Обмотка возбуждения левого электродвигателя механизма подъема (ОВДПЛ); 13 – Обмотка возбуждения правого электродвигателя механизма подъема (ОВДПП); 14 – Тиристорный возбудитель питания обмоток возбуждения электродвигателей механизма подъема (ТВДП); 15 – Система импульсно-фазового управления тиристорным возбудителем электродвигателей механизма подъема (СИФУДП); 16 – Регулятор тока возбуждения электродвигателей механизма подъема (РТВДП); 17 – Регулятор Э.Д.С. электродвигателей механизма подъема (РЭДП); 18 – Датчик Э.Д.С. электродвигателей механизма подъема (ДЭДП); 19 – Датчик напряжения якорной цепи электропривода механизма подъема (ДНЯЦП); 20 – Датчик тока якорной цепи электропривода механизма подъема (ДТЯЦП); 21 – Шунт якорной цепи электропривода механизма подъема (ШЯЦП); 22 – Шунт цепи возбуждения электродвигателей механизма подъема (ШЦВДП); 23 – Датчик тока возбуждения электродвигателей механизма подъема (ДТВДП).

понимаются неисправности или отказы, принимаемые в качестве элементарных, т.е. которые не могут быть представлены совокупностью нескольких других неисправностей или отказов. Как показывают исследования и практика эксплуатации, в основном возникают одиночные неисправности или отказы. Это связано с тем, что вероятность возникновения неисправности или отказа двух и, тем более, большего числа функциональных элементов равна произведению безусловных или условных вероятностей одиночных неисправностей или отказов в зависимости от того, зависимы они друг от друга или нет. Поэтому одновременные неисправности или отказы имеют меньшую вероятность появления и, следовательно, возникают реже, чем одиночные. На основании этого отметим, что при наличии неисправности или отказа  $0i \in O$ , где  $O$  – множество неис-

правностей или отказов, а  $i = 1, 2, \dots, 0$ , она находится в  $i$ -ом неисправном или отказавшем состоянии и реализует систему передаточных функций, типа:

$z^i = \psi^i(x, y_{нач}^i, t)$ , которая является математической моделью  $i$ -ой неисправной или отказавшей системы.

Диагностическая модель и ее математическое описание дают возможность установить функциональную связь между степенью работоспособности каждого элемента, параметрическую связь между входными и выходными сигналами элемента, а также связь между возникновением неисправности или отказа и поведением параметров, контролируемых сигналов. Математическое описание модели, принимаемой в качестве диагностической модели имеет вид (см. таблицу).

$$\begin{aligned}
z_1 &= U_{3П} = \varphi_{КАП} \cdot K_{КАП}; \\
z_2 &= U_{БРП} = U_{3П} \cdot K_{БРП}; \\
z_3 &= \alpha_{СИФУГП} = U_{БРП} \cdot K_{СИФУГП}; \\
z_4 &= U_{д1ТВГП} = U_0 \cdot \cos \alpha_1; \\
z_5 &= U_{д2ТВГП} = U_0 \cdot \cos \alpha_2; \\
z_6 &= T_{1ОВГП} \cdot \frac{di_{1ОВГП}}{dt} + i_{1ОВГП} = K_{1ОВГП} \cdot U_{д1ТВГП}; \\
z_7 &= T_{2ОВГП} \cdot \frac{di_{2ОВГП}}{dt} + i_{2ОВГП} = K_{2ОВГП} \cdot U_{д2ТВГП}; \\
z_8 &= e_{МСГП} = f(i_{ВГП} \cdot w_B); \\
z_9 &= T_{ЯЦП} \cdot \frac{di_{ЯЦП}}{dt} + i_{ЯЦП} = \frac{e_{ГП} - e_{ДП}}{r_{ЯЦП}}; \\
z_{10} &= \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn_{ДП2}}{dt} = c_M i_{ЯЦП} \Phi - M_C; \\
z_{11} &= \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn_{ДП1}}{dt} = c_M i_{ЯЦП} \Phi - M_C; \\
z_{12} &= T_{ОВДП} \cdot \frac{di_{ВДП2}}{dt} + i_{ВДП2} = K_{ОВДП} \cdot U_{дТВДП}; \\
z_{13} &= T_{ОВДП} \cdot \frac{di_{ВДП1}}{dt} + i_{ВДП1} = K_{ОВДП} \cdot U_{дТВДП}; \\
z_{14} &= U_{дТЦП} = U_0 \cdot \cos \alpha; \\
z_{15} &= \alpha_{СИФУДП} = K_{СИФУДП} \cdot U_{РТВДП}; \\
z_{16} &= U_{РТВДП} = U_{РЭП} \cdot K_{РТВДП}; \\
z_{17} &= U_{РЭП} = (e_{3П} - e_{ДП}) \cdot K_{РЭП}; \\
z_{18} &= e_{ДЭП} = (U_{ДЯЦП} + U_{ДНЯЦП}) \cdot K_{ДЭП}; \\
z_{19} &= U_{ДНЯЦП} = U_{ЯЦП} \cdot K_{ДНЯЦП}; \\
z_{20} &= U_{ДТЯЦП} = U_{ШЯЦП} \cdot K_{ДТЯЦП}; \\
z_{21} &= U_{ШЯЦП} = i_{ЯЦП} \cdot K_{ШЯЦП}; \\
z_{22} &= U_{ШВДП} = i_{ВДП} \cdot K_{ШВДП}; \\
z_{23} &= U_{дТВДП} = U_{ШВДП} \cdot K_{дТВДП};
\end{aligned}$$

где  $U_{3П}$  - напряжение на выходе командоаппарата электропривода механизма подъема (напряжение задания);  $\varphi_{КАП}$  - угол поворота рукоятки командоаппарата;  $K_{КАП}$  - коэффициент передачи командоаппарата;  $U_{БРП}$  - напряжение на выходе блока регуляторов электропривода подъема;  $K_{БРП}$  - коэффициент передачи блока регуляторов электропривода подъема;  $\alpha_{СИФУГП}$  - угол отпирания (управления) тиристора;  $K_{СИФУГП}$  - коэффициент передачи системы импульсно-фазового управления генератора подъема;  $U_{д1ТВГП}$  - выпрямленное напряжение тиристорного возбудителя первой полуобмотки возбуждения генератора подъема;  $U_{д2ТВГП}$  - выпрямленное напряжение тиристорного возбудителя второй полуобмотки возбуждения генератора подъема;  $U_0$  - напряжение холостого хода;  $T_{1ОВГП}$  - постоянная времени первой обмотки возбуждения генератора подъема;  $T_{2ОВГП}$  - постоянная времени второй обмотки возбуждения генератора подъема;  $i_{1ОВГП}$  - ток первой обмотки возбуждения генератора подъема;  $K_{1ОВГП}$  - коэффициент передачи первой обмотки возбуждения генератора подъема;  $i_{2ОВГП}$  - ток второй обмотки возбуждения генератора подъема;  $K_{2ОВГП}$  - коэффициент передачи второй обмотки возбуждения генератора подъема;  $e_{МСГП}$  - Э.Д.С. магнитной системы генератора подъема;  $T_{ЯЦП}$  - постоянная времени якорной цепи двигателей подъема;  $e_{ГП}$  - Э.Д.С. генератора подъема;  $r_{ЯЦП}$  - сопротивление якорной цепи двигателей подъема;  $c_M i_{ЯЦП}$  - постоянная по моменту якорной цепи двигателя подъема;  $\Phi$  - магнитный поток;  $M_C$  - статический момент на валу двигателя подъема;  $i_{ВДП1}$  - ток возбуждения левого двигателя подъема;  $K_{ОВДП1}$  - коэффициент передачи обмотки возбуждения первого двигателя подъема;  $U_{дТВДП1}$  - напряжение тиристорного возбудителя левого двигателя подъема;  $i_{ВДП2}$  - ток возбуждения правого двигателя подъема;  $T_{ОВДП2}$  - постоянная времени обмотки возбуждения левого двигателя подъема;  $T_{ОВДП1}$  - постоянная времени обмотки возбуждения правого двигателя подъема;  $K_{ОВДП2}$  - коэффициент передачи обмотки возбуждения правого двигателя подъема;  $U_{дТВДП2}$  - напряжение тиристорного возбудителя правого двигателя подъема;  $\alpha_{СИФУДП}$  - выходной сигнал системы импульсно-фазового управления двигателя подъема;  $K_{СИФУДП}$  - коэффициент передачи системы импульсно-фазового управления двигателя подъема;  $U_{РТВДП}$  - напряжение регулятора тока возбуждения двигателя подъема;  $U_{РЭП}$  - напряжение регулятора Э.Д.С.;  $K_{РТВДП}$  - коэффициент передачи регулятора тока возбуждения двигателей подъема;  $e_{3П}$  - Э.Д.С. задатчика электропривода подъема;  $e_{ДП}$  - Э.Д.С. двигателей подъема;

$K_{рЭП}$  - коэффициент передачи регулятора ЭДС.;  $e_{дЭП}$  - ЭДС. двигателя подъема;  $U_{дтЯЦП}$  - напряжение датчика тока якорной цепи двигателя подъема;  $U_{днЯЦП}$  - напряжение датчика напряжения якорной цепи двигателя подъема;  $K_{дЭП}$  - коэффициент передачи датчика ЭДС. двигателя подъема;  $U_{яЦП}$  - напряжение якорной цепи двигателя подъема;  $K_{днЯЦП}$  - коэффициент передачи датчика напряжения якорной цепи двигателей подъема;  $U_{шЯЦП}$  - напряжение шунта якорной цепи двигателей подъема;  $K_{дтЯЦП}$  - коэффициент передачи датчика тока якорной цепи двигателей подъема;  $i_{яЦП}$  - ток якорной цепи двигателей подъема;  $K_{шЯЦП}$  - коэффициент передачи шунта якорной цепи двигателей подъема;  $U_{шцвдп}$  - напряжение шунта цепи возбуждения двигателей подъема;  $i_{вдп}$  - ток возбуждения двигателей подъема;  $K_{шцвдп}$  - коэффициент передачи шунта цепи возбуждения двигателей подъема;  $U_{дтвдп}$  - напряжение датчика тока цепи возбуждения двигателей подъема;  $K_{дтвдп}$  - коэффициент передачи датчика тока цепи возбуждения двигателей подъема.

Таким образом, математическая модель диагностируемого объекта, являющаяся математическим аналогом закономерности переходов объекта, является основой для исследований по техническому диагностированию, и, в свою очередь, определяет содержание диагностической модели в целом, в качестве которой используется логическая модель объекта. Основная задача на этом этапе заключается в формировании аналитических зависимостей, устанавливающих объективные соотношения между различными признаками при диагностировании состояний, имеющих в своем проявлении какое-либо сходство.

Для определения неисправностей или отказов элементов объекта, охваченных обратными связями, при представлении его логической моделью, необходимо на время поиска неисправностей или отказов разорвать обратные связи, что возможно реализовать при помощи коммутирующих элементов, реализующих заданную функцию.

Для логической модели необходимо выполнение следующих положений:

- в каждом элементе модели известны допустимые значения входных и выходных сигналов, а также их функциональная зависимость;

- функциональный элемент модели неисправен. Если при нормальных входных сигналах он выдает выходной сигнал, находящийся за пределами допустимых значений;

- выход за пределы допустимых значений хотя бы одного из входных сигналов или параметра внутреннего состояния приводит к появлению выходного сигнала, отличающегося от номинального;

- если выходной сигнал к-го элемента является входным для j-го элемента, то номинальные значения этих сигналов совпадают;

- неисправности или отказы реальных связей учитываются, если эти связи включаются в логическую модель в качестве самостоятельных элементов;

- в некоторых случаях возможно допущение, что цепи связей между элементами модели абсолютно надежны (т.е. наличие связей наипростейшего вида).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кох П.И. Надежность и долговечность одноковшовых экскаваторов, – М.: Машиностроение, 1966, 183 с.
2. Карибский В.В., Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Техническая диагностика объектов контроля. – М.: Энергия, 1967, 80 с.

3. Глазунов Л.П., Смирнов А.И. Проектирование технических систем диагностирования, – Лен. Отд.: Энергия, 1982, 168 с.

### Коротко об авторах

Хошмухамедов И.М. – Московский государственный горный университет.

© А.В. Ляхомский, А.В. Скоробогатов,

УДК 622.7:622.341:621.31

*А.В. Ляхомский, А.В. Скоробогатов, В.В. Евсеенко***ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕДЕЛОВ ПО ОБРАБОТКЕ  
АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ  
ФАБРИК ЗАО “АЛРОСА”**

Семинар № 17

Устойчивое развитие алмазодобывающей промышленности в достаточной мере зависит от повышения конкуренции за счет снижения издержек производства. В этой связи особую актуальность имеет снижение затрат на энергоресурсы (электроэнергию, теплоэнергию, топливо), которые составляют значительную (свыше 25 %) часть себестоимости продукции. Снижения затрат на энергоресурсы напрямую связано с повышением энергоэффективности производства.

Структурный (по переделам) баланс потребления электроэнергии на фабриках представляет базу для планирования (распределения) затрат на электроэнергию между различными технологическими участками. Эксперимент проводился в период с января по октябрь 2004 года. Для составления указанного баланса были использованы статистические данные оперативной отчетности о сменных и суточных расходах электроэнергии на фабриках.

Формирования статистического массива данных по показателям оперативной отчетности выполняются в следующем порядке:

1. По имеющейся технологической схеме предприятия для определения объема статистического материала определялись существующие технологические переделы производства и их процентное соотношение по электропотреблению;

2. Была составлена схема сбора данных и выполнен ее анализ, определено расположение приборов контроля и сбора электротехнологических показателей на предприятии. Это позволило оценить полноту сведений необходимых для формирования базы данных, при этом основной акцент делался на принцип

сбора данных на предприятии (оперативная отчетность в виде очередных записей в журналах или действующая система АСУ);

3. Из существующей схемы были выделены основные (существенные) показатели, такие как, потребление электроэнергии переделом за установленный промежуток времени, переработка руды за тот же период, состав руды и т.д.;

4. В соответствии с вышеизложенным, была произведена выборка необходимых показателей из существующего массива статистических данных предприятия, применены методы конвертации полученных данных в формат удобный для их последующей обработки и анализа.

Созданная таким образом база данных оперативной отчетности состоит из основных показателей электропотребления по технологическим переделам предприятия, что позволяет структурировать и провести анализ распределения уровней электропотребления предприятия в целом, а также дать рекомендации по нормированию потребления электроэнергии по технологическим переделам (участкам).

База данных для анализа режимов электропотребления производственных комплексов включает в себя данные измерений проведенных исследований и статистические данные

Таблица 1

*Характеристика массива экспериментальных данных*

Наименование предприятия	Кол-во технологических переделов	Кол-во измерений по всем переделам
Фабрика №12	7	7671
Фабрика №8	7	5114
Фабрика №14	7	7671
Итого:	21	20456

оперативной отчетности предприятий.

Таблица 2  
**Статистические характеристики распределений суточной обработки  
 руды (т) и электропотребления (кВт\*ч) фабрики №12**

Показатели обработки и электропотребления	Кол-во знач.	Среднее	Медиана	Мода	Ассиметрия	Эксцесс	С.К.О.
Руда	255	29035,5	32944	Multiple	-2	1,94	10910,9
Фабрика	255	528641	589060	Multiple	-2	2,46	177523
Участок рудоподготовки	255	367897	413336	Multiple	-2	2,05	132384
Мельницы самоизмельчения	255	295064	337933	Multiple	-2	1,68	111360
Участок обогащения	255	105986	117518	74775	-2	2,84	34238,5
Прочие потребители	255	54757,7	55813	52849	-1	0,74	16708,3

Таблица 3  
**Статистические характеристики распределений суточной обработки  
 руды (т) и электропотребления (кВт\*ч) фабрики №14**

Показатели	Кол-во знач.	Среднее	Медиана	Мода	Ассиметрия	Эксцесс	С.К.О.
Руда	305	30	32	32	-1,42	1,74	5,44
Рудоподготовка	305	175643	174690	168810	-0,04	1,17	40477,7
Обогащение	305	27151	27756	29826	-0,68	0,64	4750,71
Доводка	305	15769	15984	Multiple	-1,08	2,11	1785,77
Насосное отделение	305	145851	152711	Multiple	-1,19	1,23	27792,9
УХХ	305	118677	121070	137016	-1,37	2,05	17817,6
Общезаводские	305	516185	532655	Multiple	-1,33	2,08	80354,3
Прочие потребители	305	42231	40518	34206	0,09	-1,38	8618,73

Таблица 4  
**Законы распределения суточной обработки руды и электропотребления  
 структурными подразделениями фабрики №12**

№	Показатель, структурное подразделение	Закон распределения
1	Руда	$f(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 10910} e^{-\frac{(Q-29035)^2}{2*10910^2}}$
2	Фабрика	$f(\Phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 177520} e^{-\frac{(\Phi-528640)^2}{2*177520^2}}$
3	Участок рудоподготовки	$f(\Phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 132380} e^{-\frac{(\Phi-367900)^2}{2*132380^2}}$
4	Мельницы самоизмельчения	$f(\Phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 111360} e^{-\frac{(\Phi-295060)^2}{2*111360^2}}$
5	Участок обогащения	$f(\Phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 34238} e^{-\frac{(\Phi-105990)^2}{2*34238^2}}$
6	Прочие потребители	$f(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 16708} e^{-\frac{(P-54757)^2}{2*16708^2}}$

Массив данных по показателям включает статистические данные оперативной отчетности систем АСУ Фабрики №12, №14, №8. Данные содержат информацию по электропотреблению технологических переделов и переработки руды за аналогичный период.

Данные табл. 1. были дополнены данными сменной отчетности по Фабрике №14, №12.

Данные о режимах электропотребления, о параметрах технологических процессов, взятые из оперативной отчетности отделов АСУ и журналов оперативной отчетности подразделе-

ний предприятий составляют в объеме свыше 40 тысяч значений.

Принятые к анализу объемы проведенных экспериментальных исследований и объемы информации оперативной отчетности позволяют получить достаточно достоверные результаты.

Структурный (по переделам) баланс потребления электроэнергии на фабриках представляет базу для планирования (распределения) затрат на электроэнергию между различными технологическими участками.

Для составления указанного баланса были использованы статистические данные оперативной отчетности о сменных и суточных расходах электроэнергии на фабриках. При этом пришлось выполнить трансформацию имеющейся информации о электропотреблении отдельных фидеров электроприемников, в сгруппированную по технологическим переделам, подходящую для составления балансов. Данные в таблицах приведены в виде совмещенных с количеством обработанной руды вариационных рядов. Для анализа были приняты данные за январь – октябрь 2004 г.

Статистические характеристики рассматриваемых распределений обработки руды и электропотребления технологическими переделами приведены в табл. 2, 3.

Анализ вида гистограмм распределений обработки руды и электропотребления технологическими переделами, а также статистических характеристик этих распределений показывает, что часть распределений одномодальна, а другая часть полимодальна. Это, очевидно отражает ту неоднородность режимов электропотребления, которая была выявлена при исследовании электропотребления основными технологическими электроприемниками.

Для описания режимов электропотребления отдельными структурными единицами (технологическими переделами и др.) как случайных величин необходимо установить их законы распределения. В соответствии с этим с помощью критерия Колмагорова (при доверительной вероятности 0.95) были проверены гипотезы о принадлежности рассматриваемых распределений к законам: нормальному, экспоненциальному, бета, гамма, Вейбула, логарифмически нормальному.

Проверка статистических гипотез показала, что рассматриваемые распределения достаточно надежно описываются нормальным законом, согласно выражению (1).

$$f(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * \sigma} e^{-\frac{(P-\mu)^2}{2*\sigma^2}} \quad (1)$$

Законы распределения суточной обработки

Таблица 5  
Законы распределения суточной обработки руды и электропотребления структурными подразделениями фабрики №14

№	Показатель, структурное подразделение	Закон распределения
1	Руда, т.т.	$f(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 5,44} e^{-\frac{(Q-30,32)^2}{2*5,44^2}}$
2	Рудоподготовка	$f(\varnothing) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 40477} e^{-\frac{(\varnothing-175640)^2}{2*40477^2}}$
3	Обогащение	$f(\varnothing) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 4750} e^{-\frac{(\varnothing-4750)^2}{2*4750^2}}$
4	Доводка	$f(\varnothing) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 1785} e^{-\frac{(\varnothing-15769)^2}{2*1785^2}}$
5	Насосное отделение	$f(\varnothing) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 27792} e^{-\frac{(\varnothing-145850)^2}{2*27792^2}}$
6	УХХ	$f(\varnothing) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 17817} e^{-\frac{(\varnothing-118680)^2}{2*17817^2}}$
7	Общезаводские	$f(\varnothing) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 80354} e^{-\frac{(\varnothing-516180)^2}{2*80354^2}}$
8	Прочие потребители	$f(\varnothing) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 8618} e^{-\frac{(\varnothing-42230)^2}{2*8618^2}}$

руды и суточного электропотребления структурными подразделениями фабрик приведены в табл. 4, 5.

Выполненный анализ позволил определить распределение электропотребления по технологическим переделам, узнать процентное соотношение по электропотреблению фабрик, установить зависимости электропотребления.

Получены статистические характеристики электропотребления, а также характеристики переработки руды.

Найденные характеристики и зависимости позволили определить законы распределения потребления электрической энергии технологическими переделами при обработке алмаза содержащей руды на обогатительных фабриках компании.

Полученные законы распределений и их статистические характеристики позволяют составлять структурные балансы электропотребления, планировать и структурировать затраты на электропотребление.

#### **Коротко об авторах**

*Ляхомский А.В., Скоробогатов А.В.* – Московский государственный горный университет,  
*Евсеев В.В.* – ЗАО «АЛРОСА».



© Н.Г. Пейль, 2005

УДК 622

**Н.Г. Пейль**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ ЭМС С ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ**

Семинар № 17

**В** различных областях науки и техники достаточно часто используются резонансные явления. Применительно к электромеханическим системам явление резонанса можно использовать для процессов резания горных пород, в том числе и для станков шарошечного бурения. При этом необходимо установление оптимального процесса резания посредством активного управления электроприводом этих механизмов. Возвратно-вращательное воздействие в резонансном режиме на горный массив повышает эффективность разрушения полезных ископаемых или горных пород. Это позволяет снизить удельные энергозатраты, повысить производительность машин и установок за

счет выбора оптимального режима резания, обеспечить экономию режущего инструмента [2].

Основной задачей управляемого резонансного режима является обеспечение таких нагрузок в кинематических цепях механизма вращателя, чтобы они не превышали предельно возможных.

Для получения резонансного режима в электромеханической системе вращателя бурового станка принят канал статического возмущения в зоне резания, обусловленного состоянием горного массива и особенностями режущего инструмента.

В случае статического возмущающего воздействия  $\mu_c = f(\omega t)$ , ее частота  $\omega$  является неуправляемой величиной. Следовательно, кроме ограничения амплитуды вынужденных колебаний, необходимо решать задачу по выбору структуры управления, которая позволяла бы изменять частоту собственных колебаний системы. Диапазон изменения частот собственных колебаний должен быть таким, чтобы обеспечить их совпадение с частотой возмущающего воздействия.

Исследование резонансных режимов с замкнутой системой управления позволило выявить влияние различных обратных связей на поведение системы в целом, а так же решить две основные задачи: возможность активного воздействия на величину амплитуды колебаний в резонансном режиме и возможность настройки на резонанс с помощью обратной связи при статическом возмущающем воздействии.

Энергетические свойства электропривода по критерию минимального потребления электроэнергии определяются коэффициентом динамичности тока якоря. Соотношение между мощностью приводного электродвигателя механизма вращения бурового станка и коэффициентом динамичности тока якоря имеет вид обратно пропорциональной зависимости, т.е. чем больше коэффициент динамичности тока якоря, тем меньше требуется электроэнергии на процесс резания.

В данной работе приводятся результаты анализа работы электромеханической системы (ЭМС) вращателя бурового станка типа СБШ с двигателем постоянного тока ДПВ-52У2, управляемого тиристорным преобразователем.

1. Анализ резонансных режимов ЭМС вращателя с гибкой обратной связью по току.

Главным свойством гибкой обратной связи по току двигателя является возможность настройки на резонансную частоту возмущающих воздействий, т.к. угловая частота собственных колебаний системы является функцией параметра гибкой обратной связи по току якоря двигателя  $T_2 = \kappa_y \kappa_n \kappa_a \kappa_{om} T_{om}$ , где  $\kappa_y$ ,  $\kappa_n$ ,  $\kappa_a$  - статические коэффициенты передачи, соответственно, суммирующего усилителя, тиристорного преобразователя, якорной цепи двигателя;  $\kappa_{от}$  - коэффициент обратной связи по току,  $T_{от}$  -

постоянная времени контура гибкой обратной связи по току.

Такая обратная связь также влияет на коэффициент динамичности, т.е. на амплитуду и сдвиг фазы вынужденных колебаний [3].

Введем обозначение  $\Omega^2 / (1 + 2nT_2) = \nu^2$  - квадрат угловой частоты собственных колебаний системы вследствие влияния гибкой обратной связи по току двигателя [3], где  $\Omega = \sqrt{1/T_y T_m}$  - угловая частота собственных колебаний системы в отсутствие трения;  $T_y$  - электромагнитная постоянная времени якорной цепи;  $T_m$  - электромеханическая постоянная времени привода,  $n = 1/2T_a$  - коэффициент затухания.

Настройка системы на резонансную частоту при изменении частоты возмущающего воздействия осуществляется изменением параметра гибкой обратной связи по току  $T_2$  путём регулирования коэффициента  $\kappa_{отT_{от}}$ .

В системах с малым затуханием, когда коэффициент затухания  $n \ll \Omega$ , можно считать, что резонанс имеет место при  $\omega = \Omega$ , где  $\omega$  - частота статических возмущающих воздействий [1].

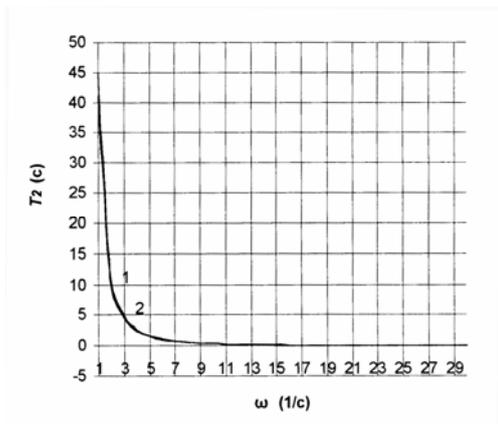
Произведём анализ работы ЭМС при разных значениях  $T_2$  - параметра гибкой обратной связи по току. Для этого определяем параметр гибкой обратной связи по току якоря  $T_2$  в резонансном режиме из соотношения [3]

$$T_2 = \frac{\Omega^2 - \omega^2}{2n\omega^2}. \quad (1)$$

Задавая значениями  $\omega = \nu$  ( $\omega$  - резонансная частота), получим значения  $T_{2res}$ , соответствующие резонансному режиму.

Находим зависимости  $f = T_2(\omega)$  отдельно для значений  $\Omega = 28,75 \text{ c}^{-1}$  и  $\Omega_0 = 27,27 \text{ c}^{-1}$  для рассматриваемой электромеханической системы бурстанка, где  $\Omega_0 = \sqrt{\Omega^2 - n^2}$  - угловая частота собственных затухающих колебаний.

На рис. 1 представлены графики зависимостей  $T_2(\omega)$ , рассчитанные в диапазоне частот  $\omega = (1, \dots, 30) \text{ c}^{-1}$ ,  $T_{2res}(\omega)$  - при  $\Omega = 28,75 \text{ c}^{-1}$ ,  $T_{2ores}(\omega)$  - при  $\Omega_0 = 27,27 \text{ c}^{-1}$ .



Характеристики показывают, что если  $\Omega > \omega$ , то, для достижения резонансного режима, необходимо применять гибкую отрицательную обратную связь по току, причём резонанс на малых частотах достигается значительным увеличением параметра  $T_{2res}$ ; с увеличением частоты возмущающих воздействий  $T_{2res}$  уменьшается, и на частотах, превышающих частоту собственных колебаний ЭМС, т.е. при  $\Omega < \omega$  резонансный режим создаётся гибкой положительной обратной связью, а параметр  $T_2$  переходит в область отрицательных значений.

Исследование работы ЭМС с положительной гибкой обратной связью по току показало значительную её неустойчивость в определённом диапазоне частот, для устранения которой необходимо вводить корректирующие звенья. Однако, в резонансном режиме осуществить это достаточно сложно. Поэтому предметом нашего анализа в основном является отрицательная гибкая обратная связь по току.

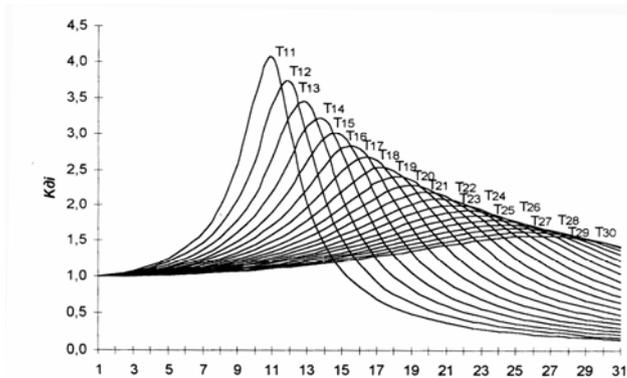


Рис. 1. Зависимость параметра  $T_2$  от частоты возмущающих воздействий  $\omega$  в резонансном режиме (1-  $T_{2res}(\omega)$ ; 2-  $T_{2res}(\omega)$ )

Дальнейшие исследования проводились в отношении функциональных зависимостей коэффициента динамичности по току от частоты возмущающих воздействий при постоянных резонансных значениях параметра  $T_2$  из ряда, полученного по формуле (1), т.е.  $K_{di}(\omega)$  при  $T_2 = \text{const}$ . Коэффициент динамичности для данного случая [3]

$$K_{di} = \frac{\Omega^2}{\sqrt{(v^2 - \omega^2)^2 + \frac{4n^2\omega^2}{(1 + 2nT_2)^2}}}$$

Приведённые на рис. 2 кривые обладают явно выраженными максимумами, соответствующими резонансу ЭМС. Это доказывает возникновение резонансного режима в системе с гибкой обратной связью по току при изменении параметра  $T_2$ .

На рис. 3 показана зависимость максимальных значений коэффициента динамичности  $K_{di}$  от частоты возмущающих воздействий  $\omega$  в резонансном режиме для диапазона частот  $\omega = (1, \dots, 50) \text{ c}^{-1}$ . Так как технически обоснованные значения  $K_{di} = 1, 1 \dots 1,4$ , то из данного графика видно, что для его оптимизации необходимо применение дополнительных обратных связей.

Данные характеристики рассчитаны для  $\Omega = 28,75 \text{ c}^{-1}$ .

2. Анализ резонансных режимов ЭМС при совместном действии гибкой обратной связи по току (ГОСТ) и жёсткой обратной связи по скорости (ЖОСС).

Основная задача гибкой обратной связи по току – изменение частоты собственных колебаний ЭМС для создания резонансного режима. Жёсткие обратные связи должны изменять амплитуду вынужденных колебаний тока или коэффициент динамичности  $K_{di}$  при резонансе в соответствии с заданными требованиями.

Коэффициент динамичности

по току  $K_{di}$  в резонансном режиме

Рис. 2. Зависимость коэффициента динамичности  $K_{di}$  от частоты возмущающих воздействий при значениях  $T_2$  для резонансных частот  $\omega = (11, \dots, 30) \text{ c}^{-1}$ .

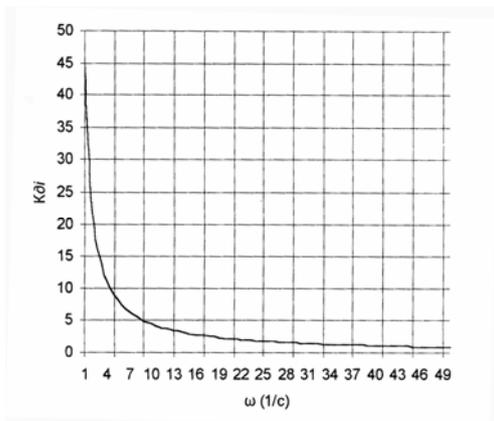


Рис. 3. Зависимость коэффициента динамичности  $K_{дi}$  от частоты возмущающих воздействий  $\omega$  в резонансном режиме

определяется [3]:

в разомкнутой системе

$$K_{дiрез} = \frac{1}{2\xi} = \frac{\Omega}{2n};$$

в системе с ЖООС

$$K_{дiрез} = \frac{k_1 \Omega}{\sqrt{(k_1 - 1)^2 \Omega^2 + 4n^2}};$$

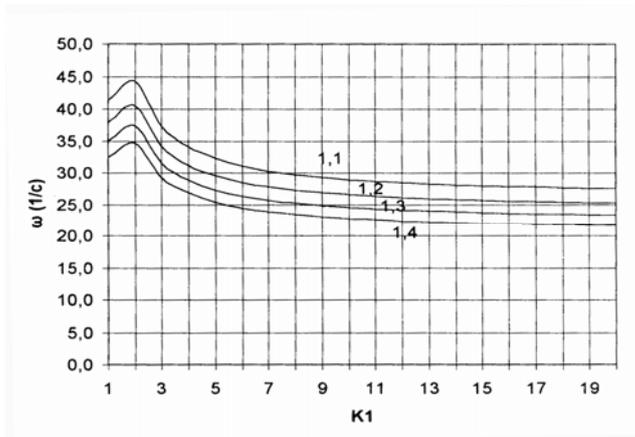
в системе с ГОСТ

$$K_{дiрез} = \frac{\sqrt{1 + 2nT_2}}{2\xi} = \frac{\Omega \sqrt{1 + 2nT_2}}{2n};$$

при совместном действии ГОСТ и ЖООС

$$K_{дiрез} = \frac{k_1 \Omega \sqrt{1 + 2nT_2}}{\sqrt{(k_1 - 1)^2 \Omega^2 + 4n^2}} = m, \quad (2)$$

где  $\xi = n/\Omega$  – относительный коэффициент затухания,  $k_1 = 1 + k_y k_n k_c k_{oc}$  – параметр жёсткой обратной связи по скорости двигателя,  $k_{oc}$  – коэффициент жесткой обратной связи по скорости двигателя,  $m$  – параметр, соответствующий оптимальным значениям коэффициента



динамичности.

Из формулы (2) получаем зависимость параметра  $T_2$  от параметра  $k_1$  при резонансе:

$$T_2 = \frac{m^2 [(k_1 - 1)^2 \Omega^2 + 4n^2]}{2nk_1^2 \Omega^2} - \frac{1}{2n}. \quad (3)$$

Приравнявая уравнения (1) и (3) определяем функциональную зависимость параметра  $k_1$  от частоты возмущающих воздействия  $\omega$  в резонансном режиме:

$$\omega = \frac{k_1 \Omega^2}{m \sqrt{(k_1 - 1)^2 \Omega^2 + 4n^2}} \quad (4)$$

Экономический эффект будет иметь место при значениях коэффициента  $m$  в пределах от 1,1 до 1,4. На рис. 4 представлены графики зависимостей  $k_1(\omega)$  при постоянных значениях коэффициента динамичности в резонансном режиме, полученные по формуле (4) для гибкой отрицательной обратной связи по току (ГООСТ) и жёсткой отрицательной обратной связи по скорости (ЖООСС). Из графиков видно, что ЖООСС при совместном действии с ГООСТ поддерживает требуемые значения коэффициента динамичности при статическом возмущении в диапазоне частот  $\omega = 20 \dots 45 \text{ с}^{-1}$  (3,3...7,5 Гц), что не всегда удовлетворяет рабочим частотам. На более низких частотах необходимо применение жёсткой положительной обратной связи по скорости. Однако, её использование не рекомендуется из-за малого запаса устойчивости..

3. Анализ резонансных режимов ЭМС при совместном действии гибкой обратной связи по току и жёсткой обратной связи по току (ЖОСТ).

Коэффициент динамичности по току  $K_{дi}$  в резонансном режиме определяется:

Рис.4. Зависимость параметра  $k_1$  от частоты возмущающих воздействий  $\omega$  в резонансном режиме при значениях  $m=1,1;1,2;1,3;1,4$ .

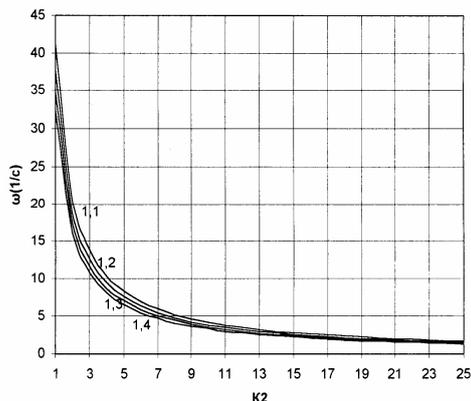


Рис. 5. Зависимость параметра жёсткой обратной связи по току  $\kappa_2$  от частоты возмущающих воздействий  $\omega$  в резонансном режиме при значениях  $m=1,1;1,2;1,3;1,4$ .

в системе с ЖОСТ

$$\kappa_{\text{дирез}} = \frac{\Omega}{2n\kappa_2};$$

при совместном действии ГОСТ и ЖООСТ

$$\kappa_{\text{дирез}} = \frac{\Omega\sqrt{1+2nT_2}}{2n\kappa_2} = m, \quad (5)$$

где  $\kappa_2=1+\kappa_y \kappa_n \kappa_{\text{от}}$ -параметр жёсткой обратной связи по току,  $\kappa_{\text{от}}$ - коэффициент жёсткой обратной связи по току двигателя.

Тогда из формулы (5) находим зависимость параметра  $T_2$  от параметра жёсткой обратной связи по току  $\kappa_2$  в резонансном режиме:

$$T_2 = \frac{4m^2 n^2 \kappa_2^2 - \Omega^2}{2\Omega^{2n}} \quad (6)$$

Из уравнений (1) и (6) определяем функциональную зависимость параметра  $\kappa_2$  от частоты возмущающих воздействий  $\omega$

$$\kappa_2 = \frac{\Omega^2}{2m\omega} \quad (7)$$

На рис. 5 представлены кривые функциональной зависимости  $\kappa_2(\omega)$  при постоянных значениях коэффициента динамичности  $m$  в резонансном режиме, полученные по формуле (7).

Из графиков видно, что ЖООСТ при совместном действии с ГООСТ поддерживает требуемые значения коэффициента динамичности при статическом возмущении в диапазоне частот  $\omega = 1 \dots 42 \text{ с}^{-1}$  (0,1...7 Гц), что практически соответствует рабочим частотам (2...8 Гц).

Выводы.

1. Структура ЭМС в управляемом резонансном режиме зависит от частоты возмущающих воздействий.

2. Для получения в ЭМС резонансного режима в диапазоне частот  $\omega = 1 \dots 42 \text{ с}^{-1}$  с технически обоснованными значениями коэффициента динамичности по току в пределах 1,1...1,4 при статическом возмущении наиболее целесообразно применение гибкой обратной связи по току при совместном действии с жёсткой отрицательной обратной связью по току.

На частотах свыше  $25 \text{ с}^{-1}$  может быть рекомендовано совместное действие гибкой обратной связи по току и жёсткой обратной связи по скорости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обморшев А.Н. Введение в теорию колебаний. – М.: Наука, 1965. – 276 с.  
2. Фащилко В.Н., Хапаев А.Б. Резонансный режим электромеханической системы. /Отдельные статьи

горного информационно-аналитического бюллетеня. – М.: Изд-во МГГУ, 2003. №8 с.3–10.

3. Хапаев А.Б. Разработка электропривода вращателя бурового станка по энергосберегающей технологии: Дис. ... канд.техн.наук: 05.09.03 / Моск. горный ун-т. – М., 2004.–192 с.

## Коротко об авторах

Пейль Н.Г. – доцент кафедры «Электрификация и энергоэффективность горных предприятий», Московский государственный горный университет.

УДК 622.012.2:622.861

*Г.М. Петров, В.В. Дедов***СОВМЕСТНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ РЕЖИМАМИ НЕЙТРАЛИ**

Семинар № 17

**Ш**ирокое использование электроэнергии при ведении открытых горных работ, дальнейший рост энергооборуженности производства, перевод электропотребителей на более высокие рабочие напряжения – с 6 кВ на 10 кВ и выше – определяют необходимость глубокого и всестороннего изучения работы электроустановок в свете обеспечения условий безопасности и бесперебойности электроснабжения потребителей.

Предприятия по открытой разработке месторождений полезных ископаемых относятся к той отрасли горнодобывающей промышленности, в которой вопросы электробезопасности стоят особенно остро и актуально. Специфические условия эксплуатации электрохозяйства открытых горных разработок – наличие временной, разветвленной кабельно-воздушной электрической сети, значительное влияние окружающей среды на состояние изоляции сети, высокая вероятность повреждения сети при ведении буровзрывных и погрузочно-разгрузочных работ, изменение параметров сети в процессе эксплуатации и, наконец, относительно низкий уровень эксплуатации электроустановок, – все это является причиной возникновения повышенной опасности поражения людей электрическим током и выхода из строя электрооборудования.

Несмотря на профилактические мероприятия, направленные на повышение электробезопасности на карьерах, травматизм от поражения электрическим током на открытых горных разработках остается высоким. Статистические данные электротравматизма в железорудной промышленности, обобщенные за несколько лет, показывают, что более половины несчастных случаев произошло в электроустановках выше 1 кВ [1]. Устойчивый высокий уровень электротравматизма при ведении открытых горных работ свидетельствует о том, что проблема обеспечения электробезопасности в горнодобы-

вающей промышленности в настоящее время остается одной из первоочередных и важнейших задач, стоящих перед горной наукой.

Одним из основных факторов, определяющих условия электробезопасности и уровень травматизма при ведении открытых горных работ, является продолжительность существования состояния однофазного замыкания на землю в карьерных электрических сетях напряжением 3-10 кВ. При замыкании одной из фаз сети на корпус электрооборудования или заземляющую экранирующую оболочку кабеля происходит вынос потенциала на всю заземляющую сеть карьера. Как известно, величина выносимого потенциала пропорциональна величине тока однофазного замыкания на землю и величине сопротивления заземляющего контура. Длительное существование этого потенциала обуславливает реальную возможность поражения людей при прикосновении к частям электрооборудования, нормально не находящегося под напряжением. Кроме того, длительное существование однофазного замыкания на землю в сети приводит к повторным коротким замыканиям на землю и тем самым, к еще более значительному ухудшению условий электробезопасности.

Еще большая актуальность возникает при совместной эксплуатации электрических сетей с различными режимами нейтрали источника тока и с различными типами систем заземления. Так в электрических сетях Лебединского горно-обогатительного комбината для питания экскаваторов и другого карьерного оборудования эксплуатируется трехфазная электрическая сеть напряжением 6 кВ с изолированной нейтралью, а в электрических сетях питания железнодорожного транспорта – однофазная электрическая сеть напряжением 10 кВ с глухозаземленной нейтралью.

В настоящее время на карьерах Российской Федерации заземляющие устройства сооруже-

ются по нормативам "Единых правил безопасности при разработке полезных ископаемых открытым способом" [2] и "Инструкцией по безопасной эксплуатации электроустановок открытых горных работ" [3]. По этим нормативам заземление карьерных экскаваторов, работающих на погрузке горной массы в думпкары электрифицированного железнодорожного транспорта производится на общее заземляющее устройство исходя из опасности потенциалов на корпусах экскаваторов, вызванных токами однофазных замыканий на землю в сети 6 кВ, которая относится к электроустановкам с малыми токами замыкания на землю. Токи однофазного замыкания карьерных сетей 6 кВ трехфазного тока находятся в пределах 10 А. Однако, на корпуса экскаваторов, работающих на погрузке горной массы в думпкары железнодорожного транспорта, возможно короткое замыкание контактной сети однофазной электрической сети напряжением 10 кВ, которая относится к электроустановкам с большими токами замыкания на землю (до 10000 А).

В ЕПБ и указанной инструкции нет прямых указаний на заземление экскаваторов, работающих на погрузке горной массы вблизи контактного провода исходя из того, что на их корпуса возможно короткое замыкание в контактной сети. По условиям ограничения последствий таких коротких замыканий

производят заземление оборудования на рельсы, как это требует § 455 ЕПБ. В Инструкции же имеется прямой запрет (п. 7.12) на заземление нетягового оборудования на рельсы.

В случае касания ковшом контактного провода заземление при существующей схеме не только не обеспечивает безопасность людей вблизи коснувшегося экскаватора, но и вносит дополнительные опасности:

- увеличивает коэффициент прикосновения к корпусу экскаватора;
- создает напряжение прикосновения на всем оборудовании карьера за счет выноса потенциала по заземляющим проводам ЛЭП и кабелей 6 кВ;
- создает перенапряжение в низковольтной аппаратуре СЦБ и связи, приводящие к пробое изоляции и последующему ее выходу из строя.

Используя заземляющее устройство, выполненное по нормативам ЕПБ и указанной Инструкции, обеспечить безопасность людей и неповреждение оборудования при касаниях ковшом контактного провода не представляется возможным.

При дальнейших исследованиях следует рассмотреть влияние токов однофазного замыкания на землю в карьерной электрической сети и электрической сети железнодорожного транспорта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрификация открытых горных работ: Учебник для вузов / С.А. Волотковский, В.И. Щуцкий В.И., Н.И. Чеботаев Н.И. и др. – М.: Недра, 1987.
2. Единые правила безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. – М.: НПО ОБТ, 1992.
3. Инструкция по безопасной эксплуатации электроустановок открытых горных работ. – М.: НПО ОБТ, 1996.

#### Коротко об авторах

Петров Г.М., Дедов В.В. – Московский государственный горный университет.



© А.В. Пичуев, 2005

*А.В. Пичуев***АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО  
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ  
ЗАЩИТЫ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ  
НАПРЯЖЕНИЕМ 6-10 кВ**

Семинар № 17

**С**истема релейной защиты высоковольтного силового оборудования является наиболее эффективным средством обеспечения надежной и безопасной работы электроустановок, особенно в специфических условиях горнодобывающих предприятий, имеющих в своем составе значительное количество потребителей первой второй категории по надежности.

Правильное построение и эксплуатация системы релейной защиты позволяет существенно снизить вероятность поражения персонала, обслуживающего электроустановки электрическим током за счет ограничения длительности существования опасных режимов короткого замыкания, которые в свою очередь могут привести к развитию тяжелых аварий и катастроф, сопровождающихся выходом из строя дорогостоящего оборудования, расстройством технологического процесса, массовым срыву поставок продукции, серьезному материальному ущербу и т.д.

В связи с этим разработка мероприятий, направленных на повышение функциональной и эксплуатационной надежности защит, на основе анализа причин возникновения аварийных отключений, отказов электрооборудования и неселективных срабатываний устройств релейной защиты, а также разработка рекомендаций по оперативному восстановлению системы электроснабжения предприятий является актуальной научной и производственно-технической задачей.

Анализ функциональной и эксплуатационной надежности защит при аварийных отключениях в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ показал, что повышение надежности функционирования релейной защиты может быть достигнуто за счет выполнения комплекса организационных мероприятий и внедрения новых технических средств диагностирования и контроля, построенных на базе предлагаемой автоматизированной системы

технического диагностирования устройств релейной защиты (АСТДК-РЗ).

Для достижения поставленной цели был выполнен следующий комплекс исследований: анализ системы электроснабжения и структуры распределительных сетей напряжением 6-10 кВ; статистический анализ аварийных отключений, отказов и повреждений в распределительных сетях; обоснование основных принципов оценки надежности и эффективности функционирования защит и расчет ущерба от селективного действия защит; обоснование основных принципов построения АСТДК-РЗ. Такие исследования были проведены в 1996-97 гг. для карьеров Удачинского и Айхальского ГОКов и в 1999-2001 гг. для газотранспортных предприятий НПО «Электрогазмаш».

Требования к защитами в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ изложены в ПУЭ, ПЭЭП и ПТБ, действующих ГОСТах СССР и ГОСТах РФ, Ведомственных НТД.

Для оценки состояния комплектов релейной защиты в настоящее время используются: паспорта-протоколы; принципиальные схемы включаемых устройств; рабочие уставки; комплект исполнительных, принципиальных и монтажных схем; инструкции по обслуживанию устройств защиты для оперативного персонала.

В объем частичных проверок устройств защиты входят осмотр состояния аппаратуры и коммутации и опробование действия. В объем полных проверок защит входят: испытания изоляции вторичных цепей; внешний осмотр состояния аппаратуры защиты; проверка уставок и времени их срабатывания; опробование действия.

Испытание защит проводится в соответствии с планами испытаний, рекомендованными ГОСТ 27.503-81. Сопоставление результатов определительных испытаний проводится в соответствии с ГОСТ 27.502-83.

Все формы учета информации о надежности подразделяются на три вида: первичные (донесе-

ние об отказе), формы-накопители (сводные таблицы) и формы записи количественной оценки надежности.

Дополнительными источниками информации об отказах, повреждениях и восстановлениях электрооборудования являются: ремонтные и эксплуатационные документы; акты расследования аварий; акты рекламаций; материалы диспетчерских журналов результаты экспертных опросов работников энергомеханических служб.

Требования по проверке и наладке устройств релейной защиты и вторичных цепей измерительных устройств изложены в НТД [1, 2, 3]. Основные требования и принципы для построения автоматизированной системы технического диагностирования устройств релейной защиты в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ разработаны кафедрой «Электрификация горных предприятий» Московского государственного горного университета.

Автоматизированная система технического диагностирования и контроля релейной защиты (АСТДК-РЗ) может выполняться как в стационарном, так и мобильном (передвижном) исполнении. Последнее удобно для релейной службы при обслуживании удаленных электроустановок.

На рисунке приведена структурная схема АСТДК-РЗ, в состав которой входят: вторичные цепи измерительных устройств (трансформаторы тока, трансформаторы напряжения и тока нулевой последовательности); восьмиканальный адаптер (А), в состав которого входят комплексное согласующее устройство (КСУ) и коммутатор (К); контроллер (АЦП); микропроцессорное согласующее системное устройство (МПСУ); интерфейс, устройство ввода-вывода, внешнее оперативное запоминающее устройство (ВОЗУ).

Для спектрального анализа высших гармонических составляющих тока к адаптеру может автономно подключаться спектроанализатор (например производства АОЗТ НТЦ ВиКонг) или его аналог.

Основными элементами согласующего устройства являются измерительные преобразователи тока и напряжения которые предназначены для преобразования входных сигналов со вторичных обмоток измерительных приборов до величин, удобных для введения в АЦП. Для защиты АЦП от высокочастотных наводок, могущих проникать в цепи вторичных коммутаций между

Структурная схема АСТДК-РЗ

первичной и вторичными обмотками измерительных преобразователей устанавливается специальный экран, представляющий собой однослойную обмотку, соединенную с нулевой шиной.

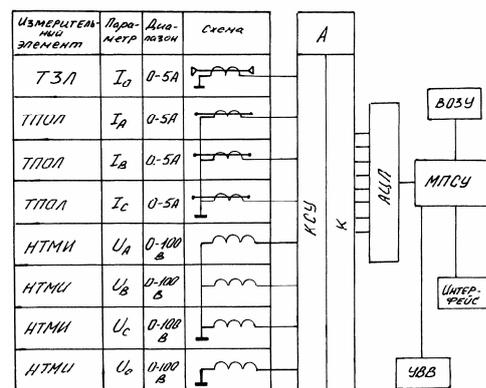
Нагрузкой измерительных преобразователей служат соответственно подобранные резисторы. Падение напряжения, снимаемое с резистора, используется в качестве управляющего для узла формирования. Наиболее приемлемые схемы преобразователей приведены в [4]. Техническая характеристика устройств сбора, обработки и ввода в ПЭВМ аналоговой и цифровой информации которые могут быть применены в системе контроля параметров устройств релейной защиты, приведена в таблице.

Анализ технических характеристик АЦП показывает, что для определения условий функционирования устройств релейной защиты наиболее соответствуют контроллеры ЛА-2, ЛА-3, ЛА-2105, обладающие необходимой скоростью преобразования сигналов (2-3 мкс) и достаточным количеством каналов.

Приведенные выше данные позволяют определить область применения, назначение, комплектацию и технические требования, предъявляемые к автоматизированной системе технического диагностирования и контроля релейной защиты (АСТДК-РЗ) на базе АЦП типа ЛА для сбора, обработки и ввода аналоговой и цифровой информации в ПЭВМ РС/XT/AT/EISA.

Система АСТДК-РЗ предназначена для применения в распределительных устройствах подстанций, обеспечивающих питание стационарных или передвижных электроустановок напряжением 6-10 кВ.

Система способна обеспечить выполнение следующих функций: анализ диаграммы пускового тока электропривода машин и механизмов (насосы, экскаваторы буровые станки и т. д.);



**Техническая характеристика АЦП**

АЦП	ЛА-70	ЛА-8	ЛА-3	ЛА-2	ЛА-2105
Интерфейс с компьютером	ISA-8	ISA-16	ISA-16	ISA-16	ISA-8
Количество каналов	16 одн 8 дифф.	16 одн	16 одн 8 дифф.	16 одн 8 дифф.	16 одн 8 дифф.
Время преобразования	70 мкс	8 мкс	3 мкс	2 мкс	3 мкс
Разрядность АЦП	12	12	1	12	12
Входной диапазон АЦП	±5	0-4 В ±2,5	±5	±5 ±10	±5... 10
Коэффициент усиления	1;2;5;10	1	1;2 ..16 10; ..160	1;10;100	1;2;4 10...160
Цифровые линии ввода/вывода	16 вв/выв		8 8	8/8	8/8
Счетчик/таймер	-	1		3	3
Особенности		4кВ гальв.р.			Встроен. Функции ВПФ

спектральный анализ высших гармонических составляющих тока, возникающих в сети при однофазном замыкании на землю, измерение активной и емкостной составляющих тока в переходном процессе при к з.

На основании анализа полученных данных разрабатываются рекомендации по выбору уставок релейной защиты (максимальная, токовая отсечка, земляная).

В соответствии с техническими требованиями АСТДК-РЗ включает в себя:

- первичные преобразователи сигналов (датчики аналоговых сигналов (ДАС): трансформаторы напряжения НТМИ-6(10)/0,1кВ (ЗНОМ) трансформаторы тока \*/5 А или \*/1 А, трансформаторы тока нулевой последовательности ТТНТ);
- спектроанализатор;
- передающее устройство;
- адаптер к контроллеру ЛА-2;
- контроллер ЛА-2;
- компьютер ПЭВМ AMD-2500;
- программное обеспечение.

Требования безопасности в отношении электропитания системы и условий подключения соответствуют требованиям ПУЭ, ПЭЭП и ПТБ.

Анализ надежности функционирования систем релейной защиты показал, что наряду с дальнейшим совершенствованием аппаратной части реле наиболее актуальным, с точки зрения эксплуатации, является разработка и внедрение автоматизированных систем технического диагностирования и контроля (АСТДК). Разработка и внедрение новейших комплектов релейной защиты выполненных на интегральных микросхемах сопровождается не только ростом объемов проверок но требует специальных навыков для специалистов релейных служб. Применение таких систем диагностики позволит не только упростить процедуру проверок комплектов релейной защиты, выбрать оптимальные установки и т. д., но и на основе анализа эксплуатационных и аварийных режимов оперативно корректировать стратегию технического обслуживания и ремонта электрооборудования.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сборник директивных материалов по эксплуатации энергосистем (Электротехническая часть) Минэнерго СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
2. Общая инструкция по проверке устройств релейной защиты, автоматики и вторичных цепей. – М.: Энергия, 1975.
3. Инструкция по проверке и наладке реле тока и напряжения серии ЭТ, РТ, ЭН, РН. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1970.
4. *Линт Г.Э.* Серийные реле защиты, выполненные на интегральных микросхемах. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

**Коротко об авторах**

*Пичуев А.В.* – Московский государственный горный университет.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ

Семинар № 17

**П**овышение производительности и эффективного использования грузоподъемных кранов может быть достигнуто с помощью реализации стабильных доводочных скоростей и повышения общего диапазона регулирования не только для специальных кранов со скоростями передвижения  $1,6-2,0 \text{ м/с}$ , но и для массовых кранов со скоростями передвижения до  $1,0 \text{ м/с}$ . В настоящее время стабильное регулирование скорости передвижения крана обеспечивается посредством применения системы импульсно-ключевого или фазо-импульсного регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с фазным ротором [1, 2].

Импульсно-ключевой или фазо-импульсный способ регулирования частоты вращения асинхронного двигателя в сочетании с режимом электродинамического торможения позволяет получить достаточно жесткие механические характеристики как в двигательном, так и тормозном режимах. Механические характеристики 1, 2 электропривода, работающего в этих режимах, приведены на рис. 1. Наличие таких характеристик позволяет осуществлять передвижение крана с постоянной скоростью, как в двигательном, так и тормозном режимах. Это необходимо, так как кран обладает парусностью и момент сопротивления на валу двигателя может менять направление своего действия в зависимости от направления ветра. При встречном ветре момент сопротивления – реактивный, а при попутном – активный.

В существующих электроприводах переход из двигательного режима в тормозной и наоборот с целью поддержания скорости передвижения крана производится машинистом, что усложняет управление краном. При попутном ветре момент сопротивления на валу двигателя

снижается и при малой его величине частота вращения двигателя, согласно его механической характеристике, резко возрастает, а с ней и скорость передвижения крана. Для предотвращения возрастания скорости машинист переводит двигатель в тормозной режим, а с уменьшением скорости вновь переключает его в двигательный режим и таким образом поддерживается постоянство скорости. Всякий переход из одного режима в другой сопровождается бросками тока, а следовательно, и момента, что отрицательно сказывается на механической части привода и крана, а также приводит к раскачиванию груза.

Исключить режим раскачивания груза можно путём плавного перехода из одного режима в другой, реализацией системы автоматического перехода из двигательного режима в тормозной и наоборот при изменении направления действия момента сопротивления без участия машиниста.

На рис. 2 приведена электрическая схема электропривода механизма передвижения с импульсным регулированием и электродинамическим торможением с самовозбуждением [3]. Рассмотрим работу схемы. При подготовке схемы к работе рукоятка командоконтроллера находится в нулевой позиции. При этом включается реле  $KO$ , которое замыкает свой контакт  $KO$ , подключающее цепь управления к источнику питания, а замыканием другого контакта  $KO$  оно ставится на самопитание. Получает питание также катушка контактора динамического торможения  $KM_{д2}$  и его включение приводит к замыканию контакт  $KM_{д2}$ , шунтирующего часть резистора  $R_{д}$ .

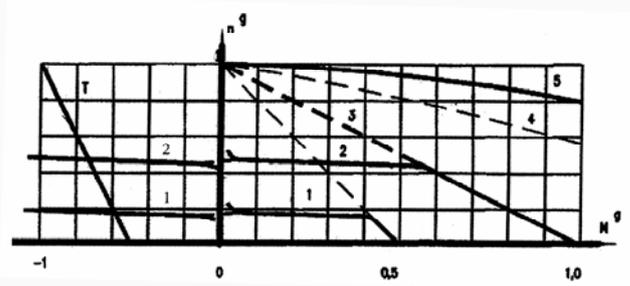


Рис. 1. Механические характеристики



чиванию, так как он зашунтирован оптосимистором  $VS2$ .

В случае снижения нагрузки на валу двигателя (попутный ветер) его момент снижается, а с ним уменьшается и ток ротора. При токе ротора  $I_2 = 0,1 \cdot I_{2ном}$  (где  $I_{2ном}$  - номинальный ток ротора) падение напряжения, снимаемого с не отключаемой части резистора  $R$ , становится меньше. Разность напряжений на компараторе  $U1$  становится отрицательной и транзистор  $VT1$  запирается, а вместе с ним размыкается цепь питания промежуточного реле  $K1$ . Якорь реле  $K1$  отпадает, его контакт  $KT1.2$  размыкается и двигатель отключается от сети. Одновременно с этим замыкается контакт  $KT1.1$  и контактор динамического торможения  $KM_д$  получает питание, срабатывает и замыкает свои контакты  $KM_д$ , подключая трёхфазный мостовой выпрямитель  $UZ1$  к двум обмоткам статора двигателя  $M1$ . Электролитический конденсатор  $C1$  разряжается на эти обмотки, создавая неподвижное в пространстве магнитное поле, которое во вращающемся роторе наводит ЭДС. Эта ЭДС создаёт ток, а следовательно, и момент. Двигатель переходит в режим электродинамического торможения с самовозбуждением без участия машиниста. Электропривод при этом работает тормозом, согласно механической характеристике  $1'$ , изображённой во втором квадранте (рис. 1).

Выпрямленный ток ротора, протекающий по обмотке реле тока  $KA1$ , вызывает его включение и размыкание контакта  $KA1$  в цепи питания промежуточного реле  $K1$ . С отключением двигателя обесточиваются катушки реле времени  $KT1$  и  $KT2$ , которые переводят свои контакты в исходное положение. Замыкание контакта  $KT2$  не восстанавливает

цепь питания промежуточного реле  $K1$ , так как контакты  $KA1$  и  $KM3.2$  - разомкнуты.

В случае, когда момент сопротивления вновь становится реактивным, ток, протекающий через обмотку реле тока  $KA1$ , снижается и вызывает отпадение его якоря. Это приводит к замыканию контакта  $KA1$  и к подключению катушки промежуточного реле  $K1$  к источнику питания. Его контакты возвращаются в положение соответствующее двигательному режиму, т.е. контактор динамического торможения  $KM_д$  отключается, а линейный контактор  $KM1$  или  $KM2$  включается и электропривод вновь переходит в двигательный режим и начинает работать согласно механической характеристике 1, расположенной в первом квадранте (рис. 1).

При переводе рукоятки командоконтроллера в позицию 2 включается контактор  $KM4$ , замыканием контактов которого шунтируется первая ступень пускового резистора  $R$  и двигатель переходит на новую механическую характеристику 2. При этом размыкается блок-контакт  $KM4.2$  и катушка контактора динамического торможения  $KM_д2$  обесточивается, а его контакт  $KM_д2$  размыкается, вводя в цепь выпрямленного тока ротора резистор  $R_д$ . При переходе двигателя в режим электродинамического торможения его механическая характеристика  $2'$  изображается во втором квадранте (рис. 1).

#### Выводы

Разработанная электрическая схема автоматического управления электроприводом механизма передвижения грузоподъёмных кранов позволяет обеспечить постоянство скорости передвижения независимо от направления действия момента сопротивления без участия машиниста.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 344 с.
2. Яуре А.Г., Боев В.С., Голев С.П., Певзнер Е.М. О применении электроприводов с импульсно-ключевым

- регулированием для крановых механизмов передвижения – М.: ВНИИТМаш, 1986. – с.43-50.
3. Заявка на изобретение за №2005101938, приоритет от 27.01.2005 г.

#### Коротко об авторах

Малиновский Анатолий Кузьмич – профессор, доктор технических наук,  
Ткаченко Павел Викторович – аспирант,  
Московский государственный горный университет.

