

# МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «УРАЛЬСКАЯ ГОРНАЯ ШКОЛА – РЕГИОНАМ»

---

23-24 апреля 2012 года

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 622.673.6

### МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ НАПУСКА КАНАТА ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

*РОГАЛЕВ А. Э., ЮНУСОВ Х. Б.*

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Одним из ответственных технологических объектов угольных и рудных шахт являются подъемные установки. От их работоспособности зависит не только объем добычи полезного ископаемого, но и нормальное функционирование, и безопасность работы всей шахты в целом.

Надежная и безотказная работа подъемной установки зависит от качественной наладки и правильного обслуживания электромеханического комплекса подъемной установки. Для обеспечения безопасной эксплуатации подъемных установок, своевременного обнаружения нарушений в режимах работы и принятия, необходимых мер по предупреждению аварий применяют систему защит и блокировок. Эти средства защиты появились одновременно с появлением шахтных подъемных установок (ШПУ) и совершенствовались параллельно с ними.

Рассмотрим и сравним два наиболее современных и перспективных метода контроля напуска каната. *Устройства защиты от напуска каната с контролированием момента зависания по усилию в частях отдельных элементов подъемной установки.*

Наибольшее распространение получили устройства с использованием магнитоупругих датчиков, которые устанавливаются под подшипники копровых шкивов. В основе этих датчиков лежит свойство сталей изменять свою магнитную проницаемость при изменении механической нагрузки.

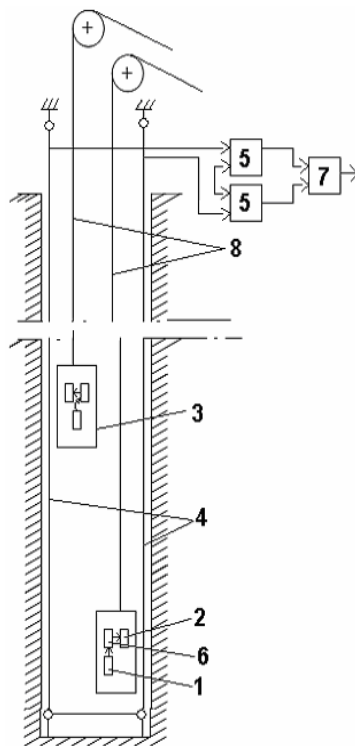
Нагрузка от концевого груза (рис. 1) каната 1 через опоры подшипников 2 шкива 3 передается на сердечник 4 магнитоупругого датчика. В зависимости от нагрузки будет меняться магнитная проницаемость сердечника, а соответственно ток и напряжение выходной цепи. При зависании сосуда в стволе нагрузка на шкив, а следовательно и на сердечник датчика, резко падает, что вызывает изменение выходного напряжения, и реле 5 подаст сигнал на включение предохранительного тормоза.

Аппаратура АКНК является универсальной, так как осуществляет функции защиты (от зависания скипов, от перегрузки канатов), управления и сигнализации (контроль разгрузки и загрузки скипов). Датчики трансформаторного типа, используемые в аппаратуре АКНК, обладают высокой чувствительностью и меньшей погрешностью. Одним из недостатков аппаратов защиты АКНК является то, что они имеют сложные электрические схемы и имеют остаточные деформации. В связи с этим для исключения погрешности и ложного срабатывания необходима периодическая настройка и отладка аппаратуры в целом. Кроме того, установка датчиков такого типа должна обеспечивать: 1) передачу значительной части реакции опоры

шкива; 2) защиту датчиков от раздавливания при чрезмерном натяжении каната; 3) независимость передачи усилия от жесткости входящих элементов.

Метод защиты шахтных подъемных установок основан на обнаружении напуска специальным датчиком с последующей передачей сигнала датчика по радиоканалу, приёма и индикации этого информационного сигнала комплектом передающего и прямо-преобразовательного устройства.

Данная аппаратура получила условное название АПИК-2 и предназначена для защиты от недопустимого напуска каната при зависании сосуда в стволе на вертикальных шахтных подъемных установках с глубиной ствола до 2000 м. При передаче информации о срабатывании датчика каната используется радиостанция. Информация с выхода радиостанции через проводную линию поступает на УОИ. Устройство обрабатывает информацию, подает сигнал о срабатывании защит и передает данные через контроллер на исполнительный блок. К плюсам такого устройства относятся



универсальность и быстрдействие (время срабатывания защиты не более 0,2 с). Недостатком данного вида устройств защиты является то, что магнитные метки, пригодные для контроля напуска и наносимые на тяговый канат, с течением времени теряют свою магнитную индукцию вследствие рассеивания остаточного магнитного потока в тяговом канате, что снижает надежность устройства и требует повторного, очень точного, нанесения на канат новых магнитных меток (рис. 2).

Рис. 2. Функционально-технологическая схема индуктивной связи:

1 – передатчик; 2 – рамочная антенна передатчика; 3 – подъемный сосуд; 4 – провода петлевой антенны; 5 – приёмники; 6 – датчик; 7 – исполнительный блок; 8 – подъемные канаты

обеспечивает достаточную точность в работе, так как в процессе работы изменяются электрические параметры этих датчиков, что требует периодической перенастройки защиты в целом.

Недостатком устройств с дистанционной передачей сигнала при зависании сосуда является то, что источник питания передатчика, располагаемый на подъемном сосуде, требует его периодической подзарядки, замены и контроля его работоспособности, но эти недостатки окупаются простотой работы и надежностью системы.

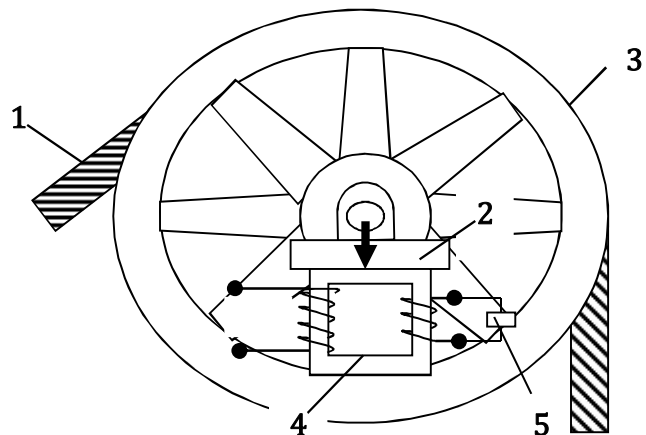


Рис. 1. Защита от напуска каната с использованием магнитоупругого датчика:

1 – подъемный канат; 2 – опора подшипника; 3 – направляющий шкив; 4 – сердечник магнитоупругого датчика; 5 – реле напряжения

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

*ГРОМКОВ А. В.*

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

В соответствии с ПУЭ, одной из мер защиты при косвенном прикосновении является защитное заземление. Эта мера является эффективной для электроустановок, подключенных к сетям с изолированной нейтралью (система IT). Для электроустановок напряжением до 1000 В, подключенных к сети с глухозаземленной нейтралью (система TN), защитное заземление неэффективно и поэтому без зануления недопустимо.

Зануление – преднамеренное электрическое соединение металлических нетоковедущих частей электроустановки, могущих оказаться под напряжением, с глухозаземленной нейтральной точкой обмотки источника тока в трехфазных сетях.

Область применения – трехфазные четырехпроводные сети до 1000 В с глухозаземленной нейтралью.

Назначение зануления – устранение опасности поражения током в случае прикосновения к корпусу электроустановки и другим металлическим нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением относительно земли вследствие замыкания на корпус и по другим причинам.

Принцип действия зануления – превращение замыкания на корпус в однофазное короткое замыкание с целью вызвать большой ток, способный обеспечить срабатывание защиты и тем самым автоматически отключить поврежденную электроустановку от питающей сети. Кроме того, поскольку зануленные корпуса (или другие нетоковедущие металлические части) заземлены через нулевой защитный проводник, то в аварийный период, т.е. с момента возникновения замыкания на корпус и до автоматического отключения поврежденной электроустановки от сети, проявляется защитное свойство этого заземления, как при защитном заземлении. Иначе говоря, заземление корпусов через нулевой проводник снижает в аварийный период их напряжение относительно земли.

Схема зануления состоит из следующих элементов: нулевого защитного проводника, заземления нейтрали обмоток источника тока, повторного заземления нулевого защитного проводника (рис. 1).

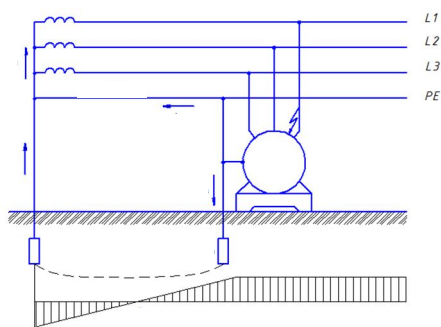


Рис 1. Схема зануления

Назначение нулевого защитного проводника в схеме зануления – обеспечить необходимое для отключения установки значение тока однофазного короткого замыкания путем создания для этого тока цепи с малым сопротивлением. При отсутствии нулевого защитного проводника ток замыкания будет незначительным и защита не скорее всего не отключит поврежденный участок цепи, кроме того напряжение на корпусе электроустановки

будет пропорционально сопротивлению заземлителей, то есть при сопротивлении обоих заземлителей 4 Ом напряжение на корпусе составит 110 В.

Назначение заземления нейтрали обмоток источника тока, питающего сеть до 1000 В – снижение напряжения зануленных корпусов (а следовательно, нулевого защитного проводника) относительно земли до безопасного значения при замыкании фазы на землю. При отсутствии заземления нейтрали и замыкании какой-либо фазы на землю напряжение на корпусах электроустановок будет примерно равно фазному.

Повторное заземление нулевого защитного проводника значительно уменьшает опасность поражения током, возникающую в результате обрыва нулевого защитного проводника и замыкания фазы на корпус за местом обрыва, но не может устранить ее полностью, т. е. не может обеспечить тех условий безопасности, которые существовали до обрыва. Назначение повторного заземления защитного проводника – снижение напряжения относительно земли зануленных конструкций в период замыкания фазы на корпус как при исправной схеме зануления, так и при обрыве нулевого проводника (рис. 2, 3).

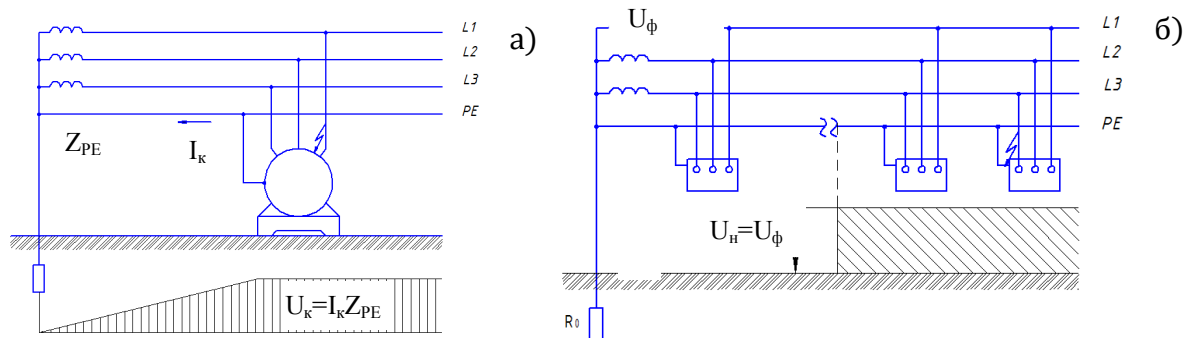


Рис 2. Схема зануления без повторного заземлителя:

а) исправная; б) при обрыве нулевого проводника

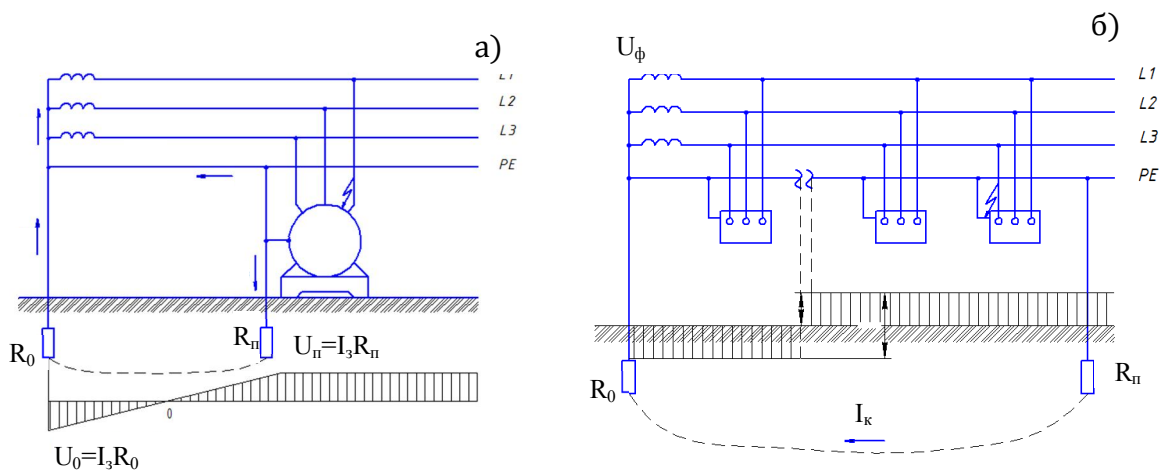


Рис 3. Схема зануления с повторным заземлителем

а) исправная; б) при обрыве нулевого проводника

Таким образом, зануление осуществляет два защитных действия – быстрое автоматическое отключение поврежденной установки от питающей сети и снижение напряжения зануленных металлических нетоковедущих частей, оказавшихся под напряжением, относительно земли.

## РАЦИОНАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЙ СЕТИ СЕВЕРНОГО КАРЬЕРА ОАО КАЧКАНАРСКИЙ ГОК «ВАНАДИЙ»

МОГУЗОВ Д. С., СТАРИКОВ В. С.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Заземление является наиболее распространенной и эффективной защитой обслуживающего персонала от поражения электрическим током при прикосновении к корпусу электроустановки, оказывающемуся под напряжением в результате пробоя или снижения сопротивления изоляции токоведущих частей.

В соответствии с ЕПБ и Инструкцией по безопасной эксплуатации электроустановок открытых горных работ общее заземляющее устройство карьера должно состоять из центрального заземлителя, магистрали заземления, заземляющих проводников и местных заземлителей.

Нормативными документами допускается работа ПКТП и ПП без местных заземлителей в следующих случаях:

– при наличии дополнительного заземлителя, аналогичного центральному, подключенного к магистрали заземления таким образом, чтобы при выходе из строя любого элемента центрального заземлителя или магистрали заземления сопротивление заземления в любой точке заземляющей сети не превышало 4 Ом;

– при условии, что самозаземление экскаваторов и буровых станков обеспечивает устойчивую работу защиты от замыканий на землю.

Для достижения обозначенных задач в настоящей работе выполнены:

– экспериментальные исследования самозаземления экскаваторов и буровых станков на всех карьерах КГОКа;

– аналитическая оценка влияния самозаземления горных машин на чувствительность существующих защит от однофазных замыканий на землю в карьерных распределительных сетях 6 кВ.

Для экспериментального исследования самозаземления горных машин использовался метод амперметра-вольтметра и комплект аппаратуры АНЧ-3.

Опорная поверхность ходовых тележек является естественным заземлителем, поэтому выбор расстояний до вспомогательных электродов производится как для контурного заземлителя, т. е. расстояние от края опорной поверхности экскаватора до токового электрода Т должно быть не менее 60 м, до потенциального электрода П – не менее 40 м. Кроме того, расстояние от экскаватора до электрода П должно быть:

$$r'_{зп} = (0,62...0,75) \cdot r'_{зт}.$$

В соответствии с этими рекомендациями токовый электрод Т устанавливался на расстоянии 100 м, потенциальный электрод П — на расстоянии 62... 75 м от горной машины.

На время измерений экскаватор или буровой станок отключались от сети, а их корпуса отсоединялись от ПП и ПКТП и от магистрали заземления.

Измерения выполнялись на всех карьерах Качканарского ГОКа и на отвалах № 1 и № 4. На каждом карьере измерения проводились на 4 экскаваторах, находящихся на разных горизонтах (см. таблицу).

Данные таблицы показывают, что в горно-геологических условиях Северного карьера сопротивление самозаземления горных машин относится к одной совокупности, характеризующейся размером 28...38 Ом.

В соответствии с нормативными документами (ЕПБ и Инструкцией по безопасной эксплуатации электроустановок в горнорудной промышленности) все линии напряжением 6-35 кВ, питающие электроустановки карьеров, должны быть оснащены исправно действующими на отключение устройствами защиты от однофазных замыканий на землю. Коэффициент чувствительности для минимального режима работы при однофазных замыканиях на землю должен быть не менее 1,5.

Результаты экспериментальных исследований сопротивления самозаземления горных машин на карьере «Северный»

№	Горизонт, ярус	Тип горной машины и ее номер	Сопротивление самозаземления, Ом	Номер КРП
1	Гор. 295, Южный борт	ЭКГ 8И № 44	28	КРП-9
2	Гор. 280	ЭКГ 8И № 50	37	КРП-10
3	Гор. 235, Южный борт	ЭКГ 8И № 60	34	КРП-8
4	Гор. 235, Северный борт	ЭКГ 8И № 43	38	КРП-10

Коэффициент чувствительности определяется отношением тока замыкания к току срабатывания защиты, т. е.:

$$K_{\text{ч}} = I_{\text{с мин}} / I_{\text{ср}} \quad (1)$$

При неполном замыкании на землю через переходное сопротивление  $R_{\text{пер}}$  ток замыкания на землю уменьшается:

$$I_{\text{с пер}} = \beta \cdot I_{\text{с}}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент полноты замыкания;  $I_{\text{с}}$  – емкостной ток однофазного полного замыкания на землю.

Коэффициент  $\beta$  определяется:

$$\beta = \left( \sqrt{356 \cdot f^2 \cdot R_{\text{пер}}^2 \cdot C^2 + 1} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $f$  – частота сети, Гц;  $C$  – суммарная емкость элементов сети относительно земли, мкФ/фазу.

При замыкании через переходное сопротивление  $R_{\text{пер}}$  ток срабатывания защиты  $I_{\text{ср}}$  должен отвечать условию:

$$I_{\text{ср}} \leq I_{\text{с пер}} \cdot K_{\text{ч}}^{-1} \quad \text{или} \quad I_{\text{ср}} \leq \beta \cdot I_{\text{с}} \cdot K_{\text{ч}}^{-1}. \quad (4)$$

После преобразований приведенных формул получаем выражение относительно  $R_{\text{пер}}$ :

$$R_{\text{пер}} \leq \frac{U_{\text{ф}}}{I_{\text{с}}} \sqrt{\frac{I_{\text{с}} - K_{\text{ч}} \cdot I_{\text{ср}}}{K_{\text{ч}} \cdot I_{\text{ср}}}}. \quad (5)$$

Это выражение отражает зависимость максимально допустимого переходного сопротивления  $R_{\text{пер}}$  от параметров электрической сети и параметров защиты.

Ток однофазного полного замыкания на землю в КРС 6 кВ для условий Северного карьера Качканарского ГОКа составляет 3,0...6,0 А, что подтверждается протоколами проверки защит. Первичный ток срабатывания защит первой ступени составляет 0,9 ... 1,5 А, второй ступени – 1,4 ... 1,5 А.

По выражению (5) для различных токов  $I_{\text{с}}$  строятся зависимости  $R_{\text{пер}} = f(I_{\text{с}})$ , соответствующие требуемому коэффициенту чувствительности  $K_{\text{ч}} = 1,5$ .

Из этих зависимостей следует, что даже при самом неблагоприятном сочетании — минимальном токе однофазного замыкания на землю  $I_{\text{с}} = 3,0$  А и максимальном токе срабатывания защиты  $I_{\text{ср}} = 1,5$  А требуемая чувствительность защиты будет обеспечиваться при переходном сопротивлении в месте замыкания не более 667 Ом. Эта максимально допустимая величина переходного сопротивления более чем в 3,5 раз превышает максимальное сопротивление самозаземления горных машин, для условий карьеров Качканарского ГОКа.

## СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ ОТ НАПУСКА КАНАТА

*ГИЗАТУЛЛИН А. Х., САФИН Н. Р.*

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Одним из ответственных технологических объектов угольных и рудных шахт являются подъемные установки. От их работоспособности зависит не только объем добычи полезного ископаемого, но и нормальное функционирование, и безопасность работы всей шахты в целом.

Одной из наиболее часто встречающихся аварий является зависание опускающегося сосуда в стволе шахты и, как следствие, при дальнейшем вращении барабана и сматывании каната на сосуд – напуск каната. Эта авария опасна тем, что при внезапном освобождении зависшего сосуда резко выбирается образовавшийся напуск каната, что может привести к его обрыву, т. е. к аварии, простою подъема, а на людских подъемах и к гибели людей. Если даже зависший сосуд и не сорвется, то продолжающийся сматываться канат может попасть в отделение соседнего сосуда, и появляется опасность его обрыва поднимающимся сосудом.

Причинами зависания сосуда в стволе могут быть: неудовлетворительное состояние направляющих устройств, нарушение армировки ствола, обмерзание разгрузочных кривых и устья ствола шахты, попадание элементов крепления горных выработок в транспортируемый груз, ложное срабатывание парашюта.

Применяемые в настоящее время устройства защиты от напуска каната:

1. Устройства защиты и контроля провисания струны каната.
2. Устройства защиты от напуска каната с контролированием момента зависания по усилию в частях отдельных элементов подъемной установки.
3. Способы и устройства защиты шахтных подъемных установок от напуска канатов с контролированием положения подъемного сосуда.
4. Устройства защиты от напуска каната, основанные на сравнении скоростей вращения (движения) отдельных элементов подъемной установки.
5. Устройства защиты от напуска каната по изменению тока якоря приводного двигателя подъемной машины.

Рассмотрев все способы, можно сформулировать следующие основные недостатки:

Устройства с контролированием прогиба струны имеют ограничение применения по глубине ствола и низкое быстроедействие.

Установка под подшипником копрового шкива магнитоупругих и тензометрических датчиков не обеспечивает достаточную точность в работе, так как в процессе работы изменяются электрические параметры этих датчиков, что требует периодической перенастройки защиты в целом.

Не являются также надежными устройства, в которых по тяговому канату передаются акустические или электромагнитные колебания. С одной стороны, это связано с тем, что волны, передаваемые по тяговым канатам, склонны к деформации под действием концевых нагрузок, вследствие чего вносится ошибка в принимаемую частоту. С другой стороны, эксплуатационную сложность представляет передача и прием самих колебаний, так как при движении тяговый канат истирает скользящие контакты приемников, а впоследствии теряет потерю чувствительности и требует корректировки.

Не оправдали себя и устройства защиты с нанесением на тяговый канат магнитных меток, так как они с течением времени теряют свою магнитную индукцию вследствие рассеивания остаточного магнитного потока в тяговом канате, что снижает надежность устройства и требует повторного, очень точного нанесения на канат новых магнитных меток.

Недостатком устройств с дистанционной передачей сигнала при зависании сосуда является то, что источник питания передатчика, располагаемый на подъемном сосуде, требует его периодической подзарядки, замены и контроля его работоспособности.

Наиболее перспективными признаны устройства с использованием тока двигателя. Построение устройств с контроллером по току в настоящее время является вполне реальным и

эффективным. Данный вид защиты основан на том, что в момент зависания сосуда в стволе, резко нарушается уравниваемость поднимающейся и опускающейся ветвей каната, что вызывает увеличение момента, а соответственно и тока якоря двигателя.

Развитие микроэлектроники привело к созданию микроконтроллеров, с помощью которых можно сначала записывать реальные характеристики и потом на их основе реализовывать различные программы работы. Так, для шахтного двухконцевого неуравновешенного подъема с приводом постоянного тока защиту от напуска каната можно реализовывать следующим способом. Известно, что для данных установок в момент зависания имеет место скачок тока на величину, пропорциональную весу опускающегося сосуда. Это связано с тем, что теряется уравнивающая сила со стороны опускающегося сосуда. Поэтому на этапе обучения микроконтроллера необходимо произвести его настройку с привязкой к данной подъемной установке. Сначала в память микроконтроллера записывается характеристика изменения тока двигателя при движении пустых подъемных сосудов  $I_{\Pi}$ . Далее записывается характеристика при подъеме груза, равного весу сосуда  $I_C$  и плюс вес самого сосуда. На последнем этапе обучения в момент времени  $t_1$  (после окончания пускового процесса) в память записывается разность  $\Delta I_C = I_C - I_{\Pi}$ .

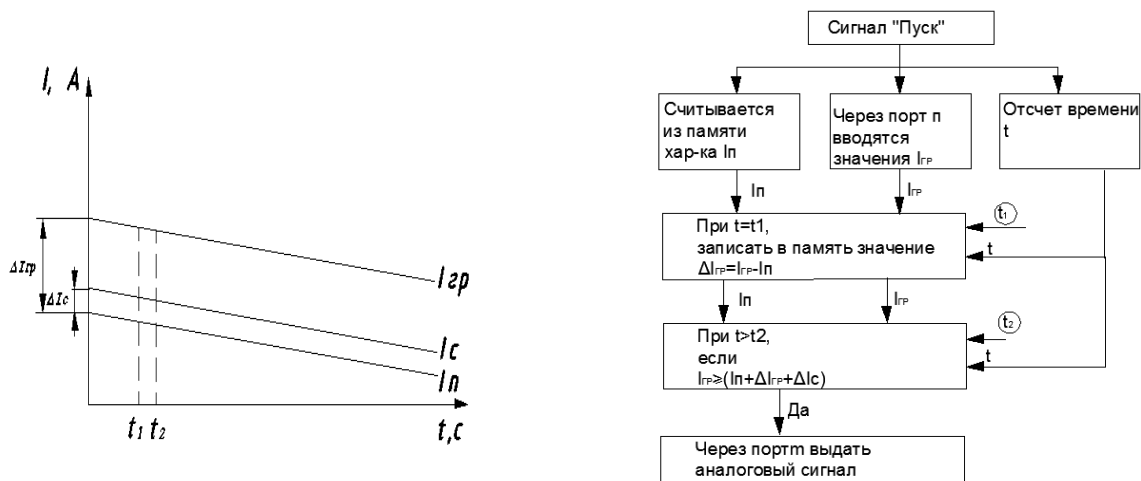


Рис. 1. Алгоритм контроля напуска каната для шахтного двухконцевого неуравновешенного подъема с приводом постоянного тока

Алгоритм контроля напуска каната будет заключаться в следующем (см. рисунок). После сигнала «Пуск» в момент времени  $t$  будет определяться и записываться в память величина  $\Delta I_{ГР} = I_{ГР} - I_{\Pi}$ . Далее после времени  $t_2$  будет контролироваться неравенство:

$$I_{д} \geq (I_{\Pi} + \Delta I_{ГР} + \Delta I_C),$$

где  $I_{д}$  – действительное значение тока в данный момент времени.

В случае выполнения неравенства микроконтроллер через один из своих портов выдаст аналоговый сигнал в цепь защиты. Преимуществом такого способа как раз является то, что не нужно предварительно учитывать все параметры и рассчитывать идеальную характеристику, а достаточно записать реальные характеристики при движении пустых сосудов, подъеме груза, равного весу сосуда, и затем согласно алгоритму сравнивать определенным образом их разность с действительными значениями тока приводного двигателя. Так как замер токов и других необходимых величин производится вторичными цепями трансформаторов тока и напряжения, находящихся в условиях сухой и незапыленной атмосферы машинного зала, то работа такого устройства защиты и линий его связи практически абсолютно надежна. В целом устройство позволит снизить количество аварий, уменьшить связанные с ними простои и повысить производительность подъемных установок.



## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

САФИН Н. Р., ГИЗАТУЛЛИН А. Х.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Асинхронные двигатели с короткозамкнутыми роторами являются наиболее распространенными типами электрической машины, что объясняется простотой конструкции, надежностью, высоким значением КПД этих электрических машин. В 70-е годы была разработана и внедрена серия асинхронных двигателей 4А, и имеется справочник [1], где приводятся параметры схем замещения данных двигателей. В настоящее время промышленностью выпускаются серии 5А, РА, 6А, АД и АИ. Имеются различные методики расчета параметров схемы замещения [2, 3, 4]. Вследствие отсутствия параметров схем замещения в современных каталогах, литературе возникает задача определения наиболее практичного и точного метода расчета этих параметров. Параметрами асинхронной машины являются активные и индуктивные сопротивления фазных обмоток статора  $r_1$ ,  $x_1$  и ротора  $r_2$ ,  $x_2$ , сопротивление взаимной индукции  $x_m$  ( $x_{12}$ ). Возьмем двигатель марки 4А355S6УЗ, IP44 [1], сведем технические данные в таблицу.

Технические характеристики двигателя

P2ном, кВт	КПД %, при P2/P2 ном, %			cos φ, при P2/P2ном, %			Параметры схем замещения, отн. ед.				
	25	50	100	25	50	100	$X_\mu$	$R_1$	$X_1$	$R_2$	$X_2$
160	91,5	93,5	93,5	0,73	0,86	0,9	3,8	0,02	0,1	0,015	0,14

Произведем расчет из относительных единиц в именованные по формулам [1]:

$$x_\mu = \frac{X_\mu \cdot U_\phi}{I_{1,ном}} = \frac{3,8 \cdot 220}{288,086} = 2,902 \text{ Ом}; \quad r_1 = \frac{R_1 \cdot U_\phi}{I_{1,ном}} = \frac{0,02 \cdot 220}{288,086} = 0,0153 \text{ Ом}.$$

Аналогично и для остальных сопротивлений имеем:  $x_1=0,0764$  Ом,  $r_2=0,0114$  Ом,  $x_2=0,107$  Ом (рис. 1).

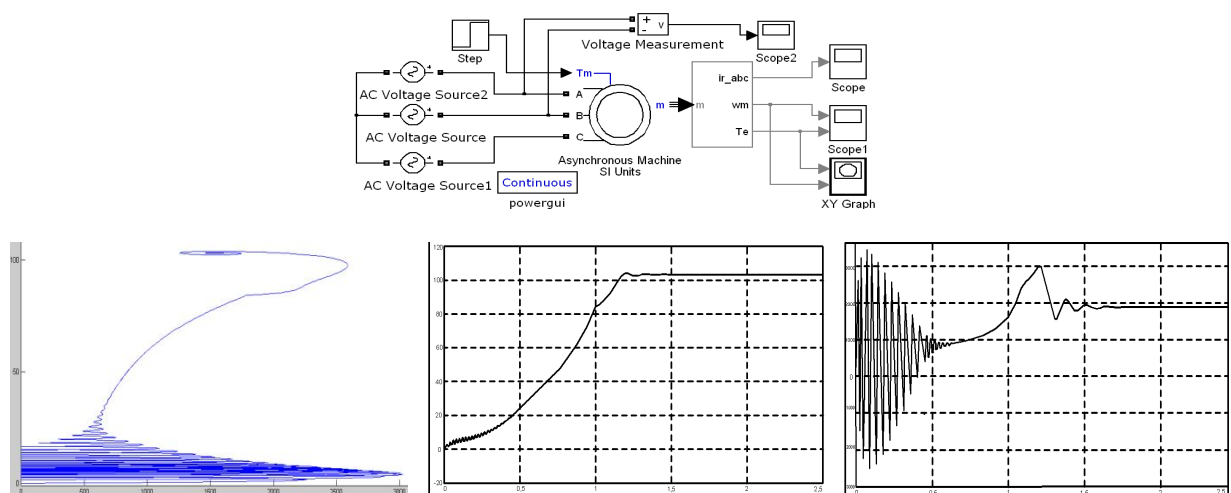


Рис. 1. Модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в среде Matlab 7.8.0 и результаты графиков: механическая характеристика, изменения скорости и момента за 2,5 с

После проведения расчета параметров схем замещения по методике, изложенной в литературе [2], имеем следующие величины: номинальное скольжение  $s_n = 0,014$ ; критическое

скольжение  $s_k=0,064$ ; коэффициент  $b_k=1,014$ ; механические потери  $\Delta P_m=1065$  Вт; активное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора  $r_1=0,0119$  Ом и ротора  $r_2=0,01339$  Ом; индуктивность фазы обмотки статора  $L_S=0,00556$  Гн,  $L_S=L_r$ ; взаимная индуктивность статора и ротора  $L_m=0,0052$  Гн;  $L_{QS}=0,0003$  Гн.

По методу, изложенному в [3], где приводится листинг задания расчета параметров схем замещения в командной строке Matlab, получим следующие значения:  $s_n=0,014$ ;  $s_{kp}=0,058$ ; конструктивный коэффициент  $c=0,01$ ; приведенное активное сопротивление ротора  $r_2=0,009$  Ом; активное сопротивление статора  $r_1=0,022$  Ом; приведенная индуктивность рассеяния ротора  $L_{sp}=L_{rp}=0,00009$  Гн; индуктивность статора  $L_S=0,0056$  Гн; индуктивность контура намагничивания  $L_m=0,0055$  Гн; коэффициент приведения  $c_1=1,0156$ .

По алгоритму расчета, изложенному в методе [4], предложена без итерационная методика определения параметров схемы замещения асинхронной машины на основе данных каталога: скорость поля статора, коэффициентов мощности и полезного действия для номинальной (100 %) и одной из частичных нагрузок (25 и 50 %); кратности пускового тока, максимального и пускового момента. Даны выражения для расчета активного и индуктивного сопротивлений ротора при изменении скольжения. В пакете Matlab составлена программа расчета параметров асинхронного двигателя, в основе которой лежат методические указания [4].

Результатами расчетов по методу [4] являются следующие величины: активное сопротивление статорной цепи  $r_1=0,016$  Ом; активное сопротивление роторной цепи  $r_2=0,011$  Ом; индуктивное сопротивление статорной цепи  $x_1=0,0756$  Ом; индуктивное сопротивление роторной цепи  $x_2=0,1044$  Ом; индуктивное сопротивление ветви намагничивания  $x_m=4,46$  Ом; индуктивность статорной цепи  $L_S=0,00024$  Гн; индуктивность роторной цепи  $L_r=0,0003324$  Гн; индуктивность ветви намагничивания  $L_m=0,1421$  Гн (рис. 2).

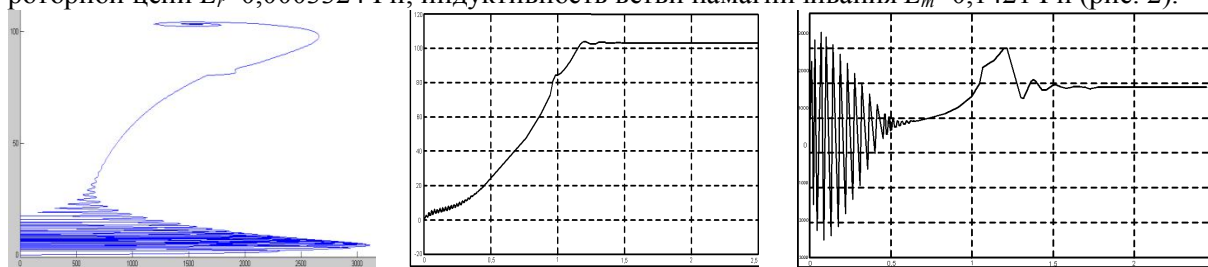


Рис. 2. Результаты графиков по результатам расчета параметров схемы замещения по методу [4] модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в среде Matlab

Сопоставление данных схемы замещения, рассчитанных по методу [4], показывает, что погрешность расчета параметров характеристик не превосходит 15 %, что вполне допустимо для инженерной практики. При сравнении значений параметров схемы замещения, полученных по методическим указаниям, изложенным в [2, 3], видно, что погрешность больше.

Вывод: сравнительный анализ по методике [4] позволяет с достаточной степенью точности находить параметры схемы замещения асинхронной машины на основе каталожных данных. Погрешность расчета параметров не превосходит 15 %, что является вполне допустимым условием.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В. И. Афонин, Е.А. Соболенская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с., ил.
2. Электрический привод: учеб. пособие / В. В. Алексеев, П. В. Алексеев, А. Е. Козярук. СПб.: 2008. 66 с.
3. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины: лабораторные работы на ПК. СПб.: КОРОНА принт, 2003. 256 с., ил.
4. Мощинский Ю. А., Беспалов В. Я., Кириякин А. А. Определение параметров схемы замещения асинхронных машин по каталожным данным // Электричество. 1998. № 4. С. 38-42.

## ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМЕ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА УГЛЕВОДОРОДОВ

*МИННЕГУЛОВА Г. С.*

ГБОУ ВПО «Альметьевский государственный нефтяной институт»

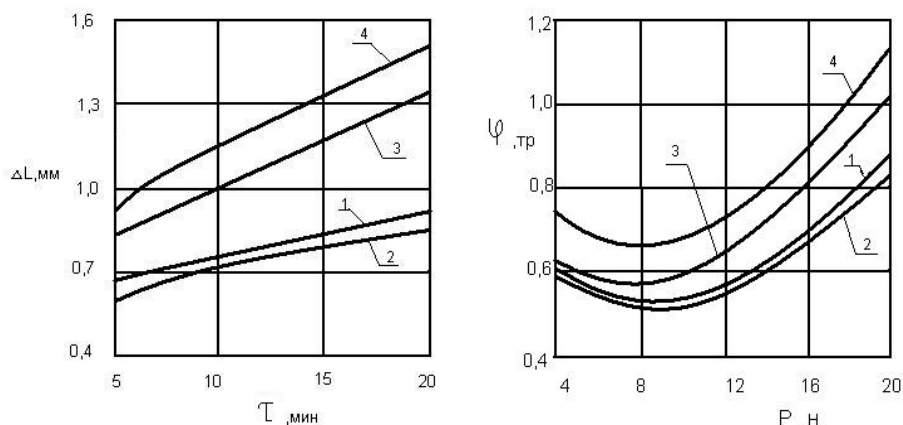
Трубопроводный транспорт углеводородов является одной из самых энерго- и ресурсоемких отраслей промышленности. В настоящее время решению проблемы энерго- и ресурсосбережения уделяется большое внимание.

При транспортировке высокосернистых углеводородов происходит непрерывное насыщение смазочного турбинного масла коррозионными примесями, в том числе сернистыми соединениями, водными растворами солей и т. п., которые значительно ухудшают трибологические свойства турбинного масла Тп-22с. Данная работа посвящена вопросу улучшения трибологических свойств масел, применяемых в системе смазки газоперекачивающих агрегатов (ГПА), работающих в контакте с сероводородом и другими коррозионно-агрессивными примесями. Решение проблемы энерго- и ресурсосбережения может быть достигнуто с использованием трибологических и химмотологических методов.

Целью работы является повышение трибологических свойств турбинных масел и снижение энерго- и ресурсозатрат при эксплуатации смазочного масла, используемого в магистральных центробежных насосах и компрессорах, перекачивающих сероводородсодержащие природные и попутные газы. Для достижения цели в данной работе решались следующие основные задачи: разработка экологически безопасного прибора и метода испытаний масел в контакте с сероводородом и коррозионно-активными примесями; исследование возможности улучшения смазочных свойств и повышения экологической безопасности и снижения энергозатрат при эксплуатации турбинных масел в присутствии сероводорода с использованием разработанного метода; исследование особенностей трения и износа металла в сероводородсодержащей масляной среде.

Исследования масел проводились на машине трения (трибометр) МТ-2М, в конструкции которой впервые использована герметичная камера трения, что позволяет экологически безопасно испытывать масла в контакте с коррозионно-активными примесями. К отличительным особенностям данного трибометра можно отнести постоянную площадь контакта пар трения и, следовательно, постоянную удельную нагрузку в зоне трения, а также сокращение продолжительности испытаний, за счет применения малогабаритных образцов.

Для исследования влияния сероводорода и других коррозионно-активных примесей на смазочные свойства турбинных масел использовалось масло Тп-22с. Данные коррозионно-активные примеси оказывают значительное влияние на смазочные свойства масла. Наблюдается явное ухудшение как противоизносных на 50-60 %, так и антифрикционных на 45-50 % свойств (см. рисунок). Угол наклона кривых зависимости противоизносных свойств от времени испытаний возрастает, что говорит об увеличении интенсивности изнашивания. Кривые антифрикционных свойств имеют параболический характер. В интервале от 4 до 8 Н наблюдается снижение коэффициента трения, далее в интервале от 8 до 12 Н коэффициент трения возрастает и далее наблюдается его резкое увеличение.



Влияние коррозионно-активных примесей на противоизносные и антифрикционные свойства масла Тп-22с:

1 – чистое; 2 – масло + сероводород; 3 – масло + электролит; 4 – масло + электролит + сероводород

Улучшение трибологических свойств турбинных масел достигается применением различных присадок (ДФ-11, АДТФ, ТОС-22, ФРИКТОЛ). Установлено, что наиболее эффективна присадка ФРИКТОЛ, представляющая собой диалкилдитиофосфат молибдена (снижение износа и коэффициент трения составляет 40-50 %).

Испытания являлись основанием для апробации работы присадок в масле на компрессорах в Уренгое, на насосах НМ 3600-230 НПС «Калейкино» Ромашкинского районного нефтепроводного управления ОАО «Северо-западные магистральные нефтепроводы», на НПЗ в Нижнекамске, перерабатывающем сернистые нефти. Промысловые испытания подтвердили полученные результаты лабораторных испытаний на трибометре МТ-2М, а также на четырехшариковой машине трения (ЧШМ-1), где было выявлено сокращение энергозатрат на 15-20 %, а также увеличение срока эксплуатации турбинного масла на 20-25 %. В течение календарного года в программу дальнейших исследований и улучшения трибологических свойств турбинных масел входит поиск оптимального пакета присадок, способного проявлять эффект синергизма при эксплуатации насосного и компрессорного оборудования. Данная работа может быть использована в системе транспорта природного и попутного газа магистральных трубопроводов РАО «Газпром».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гарпунов Д. Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. С. 424.
2. Джейкок М., Парфит Дж. Химия поверхностей раздела фаз. М.: Мир, 1984. С. 269.
3. Заславский Ю. С., Артемьева В. П. Новое в трибологии смазочных материалов: монография. М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2001. С. 480.

## СЕПАРИРОВАНИЕ КВАРЦЕВОЙ КРУПКИ 0,1-0,3 ММ

КОПЫТОВ К. О.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Первые фотометрические сепараторы появились за рубежом в 60-х годах XX столетия. Принцип их работы заключался в том, что луч лазера отражался от крутящегося барабана с зеркалами и попадал на ленту конвейера. Отраженный луч шел обратно на барабан с зеркалами и через оптическую систему попадал на фотоприемник. Принятый сигнал обрабатывался аналоговым блоком и через систему задержки воздействовал на отсекаТЕЛЬ [1].

В настоящее время, благодаря развитию науки и техники, производятся принципиально новые фотометрические сепараторы, в которых используются цифровые высокоскоростные фотокамеры. Изображение передается на вычислительный блок, в котором происходит его обработка и принимается решение о подаче сигнала на отсекаТЕЛЬ.

Процесс сепарации различных веществ сейчас встречается довольно часто. И это понятно, ведь конечный продукт ценится за свою чистоту и отсутствие ненужных примесей, а сепарирование перед энергоемкими процессами позволяет значительно снизить энергозатраты на переработку руды. Но до сих пор сепарирование материалов крупностью 0,1-0,3 мм производится в лабораториях вручную.

Внедрение механизированного сепарирования в такие цепочки производства позволит повысить производительность и заменить ручной труд работой сепаратора.

На данный момент нет какой либо универсальной методики выбора оптимальных технических средств, и для каждой системы оборудование выбирается индивидуально. Но любой фотометрической сепаратор обязательно включает пять основных частей: фотокамера, платы видеозахвата, вычислительного блока, платы дискретного ввода-вывода и исполнительного устройства (отсекаТеля). Необходимо также учесть, что все устройства должны иметь общий интерфейс передачи данных.

В нашем случае сепаратор состоит из следующих основных элементов: вибропитателя; фотокамеры и платы видеозахвата; промышленного компьютера; плат дискретного ввода/вывода и согласования нагрузки; компрессора, ресивера, воздушных фильтров; осветительной установки; пневмоклапанов (отсекаТелей).

Рассмотрим все элементы более подробно.

**Вибропитатель** необходим для равномерной, непрерывной подачи сыпучих материалов. Питатель должен быть способен работать с необходимым классом крупности и обеспечивать необходимую производительность. Были рассмотрены различные вибропитатели, но более всех заданным требованиям отвечал вибропитатель RETSCH DR 100.

**Высокоскоростная фотокамера.** Для определения требований, предъявляемых к фотокамере, необходимо задаться начальными условиями: крупность частиц  $d=0,1$  мм, ширина лотка  $b=15$  мм, высота установки камеры относительно нижней кромки лотка питателя  $h=5$  см.

Скорость частицы на уровне фотокамеры:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,05} = 0,99 \text{ м/с.}$$

Для гарантированного обнаружения частицы необходимо, чтобы на нее приходилось как минимум три пикселя матрицы камеры, тогда на один пиксель будет приходиться  $d/3=0,1/3=0,033$  мм.

При ширине лотка питателя 15 мм необходимо, чтобы фотокамера имела разрешение не менее  $15/0,033 = 450$  пикселей по горизонтали. В соответствии с этим требованием выбираем ближайшую по разрешению фотокамеру DALSA Spyder2 0512, которая имеет разрешение 512 пикселей по горизонтали. При этом один пиксель будет равен  $p=15/512=0,029$  мм.

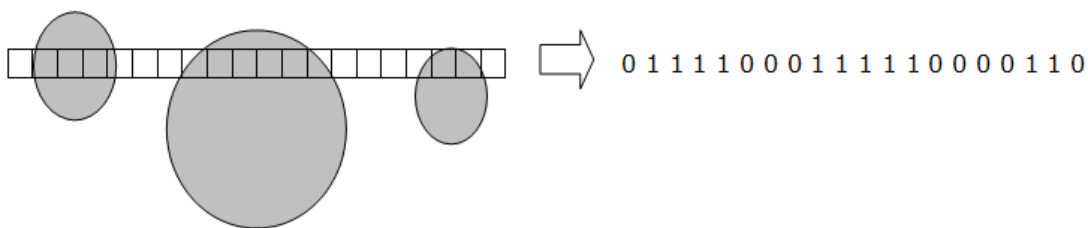
Для получения непрерывной картинки необходимо получать изображение с фотокамеры со скоростью:  $V/p = 990/0,029 = 34138$  линий в секунду или 34,14 кГц.

**Плата видеозахвата.** Фотокамера имеет 8-битную градацию серого цвета, что соответствует одному байту. При горизонтальном разрешении в 512 пикселей и при сканировании 35000 линий в секунду получим:  $512 \times 35000 \times 1 = 17,92$  Мб/с.

Выбираем плату видеозахвата фирмы Erix – PIXCI EB1 с интерфейсом Camera Link. Плата вставляется в слот PCI Express, имеет способ подключения «точка – точка», расстояние передачи не более 10 м и скорость передачи данных со скоростью до 2,38 Гбит/с [2].

**Алгоритм распознавания.** В связи с тем, что камера имеет разрешение  $512 \times 1$  пикселей, предлагается следующий алгоритм распознавания.

Монохромное изображение переводят в матрицу, в которой каждому элементу, в зависимости от затемнения, присваивается значение 0 или 1. На рисунке приведен графический пример.



Участок изображения и матрица

Причем, если ячейка заполнена не полностью, ей присваивается значение 0. Для пневмоклапанов в количестве, равном 15, на один пневмоклапан будет приходиться  $512/15 = 34$  пикселя. При наличии хотя бы трех расположенных рядом друг с другом единиц подается сигнал на срабатывание данного клапана.

**Платы дискретного ввода/вывода и согласования нагрузки.** После распознавания объектов сигнал управления через плату дискретного ввода/вывода и усиления в плате согласования нагрузки поступает на электропневмоклапан (отсекатель), который, в свою очередь, осуществляет механическое воздействие воздухом на отсекаемые частицы. В качестве платы ввода/вывода выбрана плата P10-D96U, в качестве платы согласования – Opto 22 G4ODC5.

**Электропневмоклапаны.** Первоначально рассматривались два варианта отсекания частиц: отсекание с помощью воздушной струи и отсекание с помощью «высасывания». Последний вариант оказался менее надежным, поэтому было принято решение об использовании электропневмоклапанов.

Электропневмоклапаны должны обладать высоким числом срабатывания за малый период времени, а также малым временем срабатывания, выбираем электропневмоклапаны П-РЭ 3/2.5. Их номинальное давление – 10 бар, число срабатываний равно 500 раз/с. Условный проход сопла равен 2,5 мм, используем специальный переходник, у которого выходное отверстие имеет форму эллипса с сечением  $1 \times 3$  мм, расположенного длинной осью по вертикали. Необходимое количество пневмоклапанов:  $b/1 \text{ мм} = 15/1 = 15$  шт.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оператор фотометрических сортировочных установок: справочник рабочего / Б. Н. Кравец, А. В. Белокрылецкий, Ю. Н. Волков [и др.]. М.: Недра, 1988. 151 с.
2. National Semiconductor interface Channel-link. TIA/EIA-644 LVDS standart.

## АЛГОРИТМЫ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ ИНВЕРТОРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ХАЗИЕВ В. В.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Рост производительности и степени интеграции микропроцессорных систем в системы современного электропривода привел к возможности более качественного управления электродвигателями переменного тока, по сравнению с системами аналогового управления. Уход от аппаратной избыточности в пользу программной реализации функций аналоговых элементов дал возможность повысить КПД систем управления.

Практически во всех современных контроллерах реализована возможность формирования широтно-импульсной модуляции (ШИМ) по одному или нескольким самостоятельным каналам. Принцип ШИМ позволяет при помощи дискретных сигналов создать аналоговый сигнал требуемой формы. Данный метод нашел широкое применение в электроприводе переменного тока и чаще всего реализуется при помощи программируемого логического контроллера и системы силовых электронных ключей (обычно транзисторов), образующих инвертор. Наиболее распространенной схемой силовой части инвертора является трехфазная мостовая, состоящая из шести управляемых ключей. Кроме того к достоинствам данного метода управления можно отнести то, что силовые электронные ключи работают в ключевом режиме, что позволяет свести потери на активных элементах к минимуму.

Принята следующая классификация видов широтно-импульсной модуляции [1]:

- По модулируемому параметру различают одностороннюю и двухстороннюю ШИМ;
- По отношению периода модулирующего сигнала к периоду тактов импульсной последовательности, т. е. по кратности коммутации;
- По числу полярностей импульсов на длительности такта;
- По форме модулирующего сигнала, задающего закон изменения длительностей импульсов на такте;
- По способу однозначного определения конкретной длительности импульса на такте в функции непрерывного модулирующего сигнала;
- По числу уровней модуля обобщенного вектора напряжения трехфазного инвертора.

**Классическая (скалярная) ШИМ.** При реализации данной разновидности ШИМ подаваемый на выходы трехфазного мостового инвертора управляемый сигнал каждой фазы имеет вид:

$$\begin{aligned} U_{1A} &= K_M U_m \sin(\theta); \\ U_{1B} &= K_M U_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); \\ U_{1C} &= K_M U_m \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right), \end{aligned}$$

где  $\theta = 2\pi \cdot f_{\text{вых}} \cdot t$ ;  $U_m$  – максимально допустимая амплитуда управляющего сигнала, не вызывающего перемодуляцию (определяется значением выпрямленного напряжения, подаваемого на инвертор),  $K_M$  – коэффициент модуляции – отношение наибольшей длительности импульса выходного напряжения к межкоммутационному интервалу.

Система управления трехфазным мостовым инвертором содержит в своем составе нуль-орган (для каждого плеча) и формирователи сигналов. На входе нуль-органа сравниваются задающий сигнал ( $U^*$ ) и пилообразное опорное напряжение ( $U_{\text{оп}}$ ). Если разность ( $U^* - U_{\text{оп}}$ ) положительна, то сигнал на выходе нуль-органа положителен и на входе формирователя существует положительный сигнал, отпирающий соответствующий транзистор. При отрицательной разности ( $U^* - U_{\text{оп}}$ ) на данном плече отпирается другой транзистор. Коммутации ключей будут происходить согласно таблице 4.1 [3]. Такой алгоритм работы исключает возможность одновременного замыкания обоих ключей одного плеча моста.

При равенстве амплитуды задающего сигнала  $U^*$  максимальному значению опорного напряжения  $U_{\text{опт}}$  амплитуда первой гармоники напряжения на выходе инвертора равна  $0,5U_d$  ( $U_d$  – выпрямленное напряжение, поступающее на инвертор).

**Векторная ШИМ** основана на представлении о так называемых базовых векторах напряжения, т.е. пространственных векторах, которые могут быть сформированы из трех фазных напряжений, действующих на выходе инвертора напряжения.

Каждое из напряжений  $U_{1A}$ ,  $U_{1B}$ ,  $U_{1C}$  может принимать одно из пяти возможных значений:  $\pm(2/3)U_d$ ;  $\pm(1/3)U_d$ ; 0. Из одного положения в другое вектор перемещается скачком, поворачиваясь при каждом последовательном переключении ключей инвертора на  $60^\circ$ . Каждое из шести положений пространственного вектора рассматривается как самостоятельный вектор. Шесть ненулевых и два нулевых вектора называются базовыми векторами напряжения. Метод ШИМ позволяет создавать бесконечное множество эквивалентных векторов между шестью базовыми, что позволяет формировать синусоидальный сигнал с необходимым качеством.

Амплитуда и фаза результирующего вектора напряжения зависят исключительно от скважности включения базовых векторов. Если не учитывать нулевые вектора, то годограф вектора результирующего напряжения представляет собой шестиугольник, описанный вокруг базовых векторов. Учитывая, что амплитуда базового вектора составляет  $2/3U_d$ , возможно формирование вектора результирующего напряжения с амплитудой  $0,577U_d$ . Это на 15% больше амплитуды выходного напряжения для случая классической ШИМ. А переход к базовым векторам, соответствующим 12-тактной коммутации, позволяет увеличить выходное напряжение инвертора уже на 27%.

Идея реализации векторной ШИМ-модуляции на базе стандартной центрированной ШИМ подробно рассмотрена в работе [2]. Используется двухпроходная коммутация с переключением базовых векторов на периоде ШИМ в последовательности:  $O(000)$ ,  $m$ ,  $m+1$ ,  $O(111)$ ,  $m+1$ ,  $m$ ,  $O(111)$ . Данный алгоритм легко реализуется на многих ШИМ-генераторах, однако требуется учитывать влияние «мертвого» времени при переключении ключей. Кроме того, при расчете векторов на высоких частотах (10–20кГц) требуется значительная производительность микропроцессора.

Второй способ реализации векторной ШИМ заключается в использовании двух каналов полного сравнения и последовательного управляющего автомата, обрабатывающего события по сравнению. Автомат работает по двум различным алгоритмам, в зависимости от выбранного пользователем начального направления переключения базовых векторов:  $(m, m+1)$  или  $(m+1, m)$ . Алгоритм переключений в одном из случаев следующий:  $m, m+1, O(000), m+1, m$ . Таким образом снижается число переключений на периоде ШИМ, а как следствие и динамические потери. Для исключения дополнительных переключений на стыках секторов порядок переключения базовых векторов необходимо менять при каждой смене сектора.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: учебник. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. С. 84-91.
2. Козаченко В. Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам // CHIP NEWS. 1999. № 1 (34). С. 2-9.
3. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. вузов / Г. Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. 272 с.



## СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

*ЛЫСКОВ Н. А.*

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Наиболее универсальным способом коррекции цифрового управления является использование цифрового регулятора (рис. 1). Функцию цифрового регулятора могут выполнить микроЭВМ. По сравнению с аналоговым регулятором, цифровой регулятор в состоянии обеспечить гораздо лучшее качество системы управления. Другое преимущество систем с цифровыми регуляторами заключается в том, что алгоритм управления легко может быть изменен программой контроллера, в аналоговых регуляторах сделать это намного сложнее. Более 90% систем управления в промышленности используют ПИД-регуляторы. При правильной настройке регулятор обеспечивает достаточно хорошее качество управления для объектов.

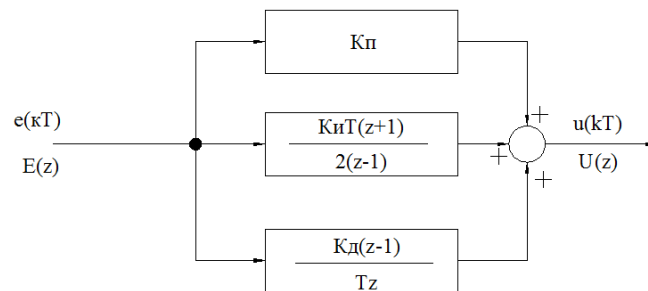


Рис. 1. Цифровой ПИД-регулятор

Для синтеза примем цифровую систему управления, описываемую передаточной функцией:

$$G_o(z) = \left\{ \frac{10}{s(s+1)(s+2)} \right\}.$$

Схема системы управления представлена на рис. 2.

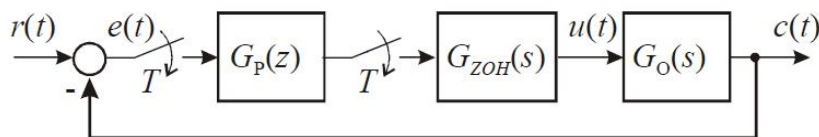


Рис. 2. Схема цифровой системы управления

При синтезе ПИД регуляторов необходимо определить три параметра:  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$ . Пропорциональное управление заключается в простом умножении сигнала на константу  $K_p$ , при интегральном управлении образуется интервал от  $e(t)$ , а при дифференциальное управление связано с формированием сигнала, пропорционального производной по времени от ошибки. Интегральный закон управления применяется для уменьшения установившейся ошибки, тогда как пропорциональный закон применяется для уменьшения перерегулирования.

Цифровая функция ПИД-регулятора\*:

$$G_p^{\text{ПИД}} = K_{\text{П}} + K_{\text{И}} \frac{T(z+1)}{2(z-1)} + K_{\text{Д}} \frac{(z-1)}{T_z} = \frac{(K_{\text{И}}T^2 + 2K_{\text{Д}} + 2K_{\text{П}}T)z^2 + (K_{\text{И}}T^2 - 4K_{\text{Д}} - 2K_{\text{П}}T)z^2}{2T_z(z-1)},$$

Определим передаточную функцию разомкнутой нескорректированной системы:

$$G_{\text{ЗОН}}G_o(z) = \frac{c(z)}{r(z)} = (1 - z^{-1})Z \left\{ \frac{10}{s(s+1)(s+2)} \right\} = \frac{0,0453(z+0,904)}{(z-0,905)(z-0,819)}.$$

С учетом этого функция разомкнутой системы с ПИД-регулятором примет вид:

$$G_p(z)G_{\text{ЗОН}}G_o(z) = \frac{(K_{\text{И}}T^2 + 2K_{\text{Д}} + 2K_{\text{П}}T)z^2 + (K_{\text{И}}T^2 - 4K_{\text{Д}} - 2K_{\text{П}}T)z^2}{2T_z(z-1)} \times \frac{0,0453(z+0,904)}{(z-0,905)(z-0,819)}.$$

Итак, есть три неизвестных, которые необходимо определить, исходя из заданных показателей качества. Примем условно, что коэффициент ошибки по скорости  $K_c$  равен 5. Это условие должно дать три линейных уравнения для определения трех неизвестных параметров ПИД-регулятора.

$$K_c = \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow \infty} (z-1) G_p(z)G_{\text{ЗОН}}G_o(z) = 5K_{\text{И}},$$

Коэффициент ошибки по скорости зависит только лишь от коэффициента  $K_{\text{И}}$  и параметрами управляемого процесса и не зависит от  $K_{\text{Д}}$  и  $K_{\text{П}}$ . Так как  $K_c$  должен равняться 5, то получим, что  $K_{\text{И}}=1$ .

$$z^2 + \frac{K_{\text{И}}T^2 - 4K_{\text{Д}} - 2K_{\text{П}}T}{K_{\text{И}}T^2 + 2K_{\text{Д}} + 2K_{\text{П}}T} + \frac{2K_{\text{Д}}}{K_{\text{И}}T^2 + 2K_{\text{Д}} + 2K_{\text{П}}T} = (z-0,905)(z-0,819).$$

Поскольку  $K_{\text{И}}=1$ , а  $T=0,1$  с, из этого уравнения находим значение  $K_{\text{П}}=1,45$  и  $K_{\text{Д}}=0,43$ , передаточная функция ПИД-регулятора запишется:

$$G_p^{\text{ПИД}}(z) = 1,45 + \frac{T(z+1)}{2(z-1)} + 0,43 \frac{(z-1)}{T_z} = \frac{0,58 - 0,54z^{-1} + 0,43z^{-2}}{1 - z^{-1}}.$$

Алгоритм управления примет вид:

$$u(kT) = 0,58e(kT) - 0,54e((k-1)T) + 0,43e((k-1)T) - u((k-1)T).$$

Запишем передаточную функцию разомкнутой скорректированной системы:

$$G_p(z)G_{\text{ЗОН}}G_o(z) = \frac{0,263(z+0,904)}{z^2 - 0,737z + 0,238}.$$

Таким образом, с помощью ПИД-регуляторов можно полностью или частично компенсировать динамику объектов управления. Так же при введении дифференциальной составляющей можно уменьшать перерегулирование, а также длительность переходного процесса.

---

\* Цифровые системы управления: учеб. пособие / А. Г. Бабенко. Екатеринбург: УГГУ, 2005. 325 с.

## ЗАЩИТА РУДНИЧНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК ОТ НАПУСКА КАНАТОВ

БУЛЯКОВ М. О.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Главными задачами горной промышленности являются развитие опережающими темпами рудной и угольной баз и непрерывное обеспечение потребителей страны качественным рудным и топливным сырьём. Решение этих задач во многом зависит от состояния горного оборудования. В настоящее время все возрастающая часть полезных ископаемых в стране и мире добывается подземным способом, что влечет за собой необходимость усовершенствования шахтных подъемных установок (ШПУ), в частности их эксплуатационной безопасности. Поэтому разработка устройств по недопущению аварийных ситуаций в стволе шахты и создание условий безопасной эксплуатации БШПУ являются решением актуальной задачи.

В данной статье рассматриваются датчики, предназначенные для контроля натяжения каната непосредственно у подъемного сосуда, для контроля положения коуша подъемного сосуда, а также для контроля резких замедлений сосуда.

Датчики контроля натяжения каната крепятся непосредственно на канате выше подвесного устройства и по конструктивному исполнению выполнены трех-, двух- и одноопорными. Датчик в комплекте с аппаратурой АПИК-2 успешно прошел межведомственные испытания МЦМ СССР и был рекомендован к более широкому применению на различных предприятиях отрасли. Контролируемый напуск каната не превышал 0,15 м на скиповом подъеме и 0,25–0,3 м – на клетевых, то есть датчик достаточно высоко чувствителен, однако он имеет тот недостаток, что занимает часть высоты переподъема в копре и это может привести к нарушению требований статьи 314 ЕПБ. Так, на длине базы у трёхопорного датчика должна уместиться половина длины волны изгиба каната. За счет размещения датчика на канате с удалением от подвесного устройства фактическая высота переподъема ( $h_{\phi}$ ) в копре уменьшается на величину

$$h_{\phi} = h_{\phi_3} + h_{y_{\phi}}, \text{ или } h_{\phi} = 2\sqrt{78d_k \cdot f} + 1160,$$

где  $h_{y_{\phi}}$  – высота удаления датчика от подвесного устройства, мм;  $h_{\phi_3}$  – габаритные размеры трёхопорного датчика по высоте, мм;  $f$  – величина прогиба каната, мм.

На длине базы двухопорного датчика достаточно уместить четверть длины волны изгиба каната. Следовательно

$$L_{d_2} = 2\sqrt{78d_k \cdot f} + 1200$$

С учетом удаления датчика от подвесного устройства высота, занимаемая двухопорным датчиком, составила  $h_{d_2} = 1\ 220$  мм. Экономия высоты переподъема по сравнению с трёхопорными датчиками составит 32%. Однако, места крепления тех и других датчиков приводит к скоплению влаги, преждевременной коррозии и, следовательно, к утонению проволок каната. При определении продолжительности срабатывания двухопорного датчика его конструкция рассматривалась как упругая система, состоящая из приводной пружины датчика и каната, которая при изменении осевой нагрузки  $S$  на канат совершает колебания. Время срабатывания датчика можно определить из выражения:

$$t = 0,5, \quad T = \pi k^{-1},$$

где  $T$  – период колебаний;  $k$  – угловая частота колебаний.

Продолжительность срабатывания датчика равна

$$t = \pi h L^2 \cdot 0,5 E^{-1} J^{-1} \left[ (c_1^{-1} + c_2^{-1}) \cdot 5 g q^{-1} L^{-1} \right]^{-0,5}$$

Сравнение результатов расчета длительности срабатывания двухпорного датчика по предложенной методике с экспериментальными данными, полученными для клетевой подъемной установки, показало их хорошую сходимость.

Рассмотренные двух- и трёхпорные датчики применимы в тех случаях, когда фактическая высота перепоъёма больше требуемой. На практике имеет место совпадение этих размеров. Тогда необходимы датчики, монтируемые на подвесном устройстве или на подъемном сосуде.

На скиповом подъеме Вишневогорского рудоуправления Челябинской области было испытано устройство, оборудованное четырьмя датчиками (на каждом скипе по два датчика): один из них контролировал положение коуша (зависание на малой скорости), (рис. 1), другой датчик (датчик ускорения) контролировал резкие изменения скорости и ударные явления скипа при зависаниях на скорости (рис. 2). Дооборудование шахтного парашюта измерительным преобразователем позволило контролировать как зависание клетки, так и целостность узлов собственно парашюта (рис. 3).

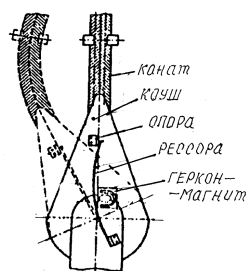


Рис. 1. Усовершенствованный датчик контроля положения коуша

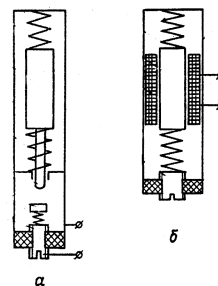


Рис. 2. Датчики контроля резких изменений скоростей:

а – контактный; б – бесконтактный

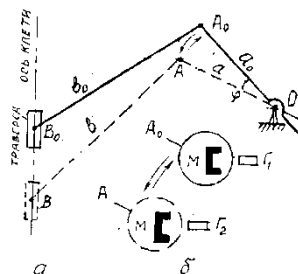


Рис. 3. Датчики положения шахтного парашюта:

а – схема механизма; б – условная схема точек  $A_0$  и  $A$  механизма с элементами измерительного преобразователя;  $G_1$  и  $G_2$  – герконы;  $M$  – магнит

В этой работе изложены научно обоснованные технические решения по повышению эксплуатационной безопасности БШПУ, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие технического уровня горных предприятий с подземной добычей полезных ископаемых и в оснащение их современной горной техникой. Актуальность этой задачи возрастает в связи с моральным и физическим износом барабанных подъемных установок, повсеместно используемых на рудниках России.

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИ КОНТУРА СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

СИМОНОВ И. А., КАРЯКИН А. Л.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Для системы электропривода с подчинённым регулированием координат. Графики переходных процессов скорости и тока будут иметь вид (рис. 1):

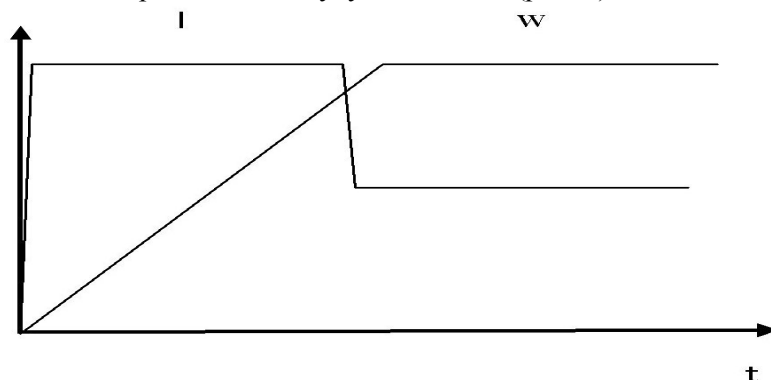


Рис. 1. Графики переходных процессов

График скорости характеризуется изломом в точке выхода на номинальную скорость. Это не позволяет получить линейную модель контура скорости.

Решим задачу представления кусочно-линейной зависимости скорости от времени в идее звеньев первого и второго порядка (рис. 2).

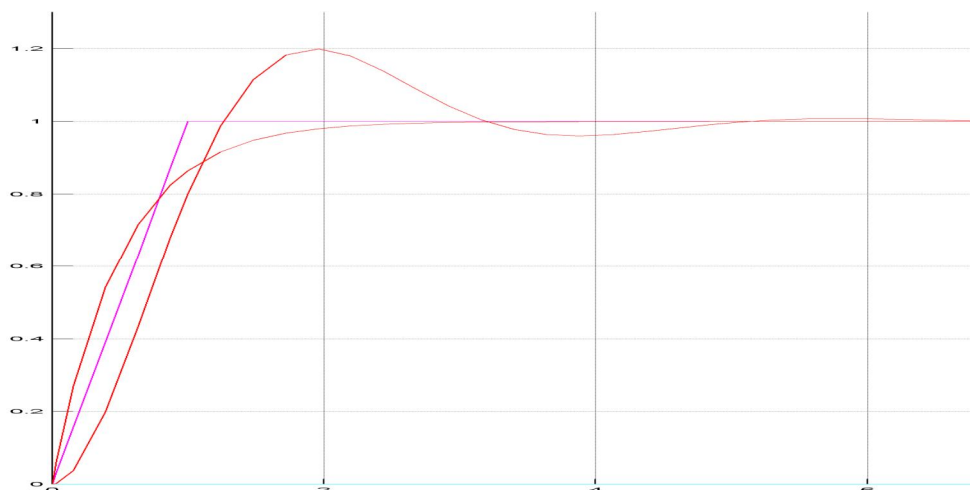


Рис. 2. Замена нелинейной кривой

Дифференциальное уравнение инерционного звена первого порядка имеет вид:

$$W_3^*(p) = \frac{w(p)}{w_3(p)} = \frac{k}{T_1 p + 1}.$$

Найдём такое  $T$ , чтобы разность квадрата интегральной ошибки была минимальна. Для этого применим метод наименьших квадратов.

$$\varepsilon(T) = \int_0^{\infty} (w - w^*)^2 dt \rightarrow \min.$$

Посчитаем площадь для чего возьмём интеграл.

Все расчёты производим в Maple.

Вычислив интеграл на участке от 0 до  $t_0$  определим разность площадей на том же участке.

$$e_1(T) = \int_0^{t_0} \left( k \cdot t - \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right)^2 dt.$$

Посчитаем интеграл на участке от  $t_0$  до  $\infty$ :

$$e_2(T) = \int_{t_0}^{\infty} \left( 1 - \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right)^2 dt.$$

Сложим полученные площади  $e_1$  и  $e_2$ :

$$e(T) = -\frac{3}{2}T + 2kT^2 + \frac{1}{3k} - \frac{2kT^2}{e^{\frac{1}{kT}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{\left( \frac{1}{e^{\frac{1}{kT}}} \right)^2} + \frac{1}{2} T e^{-\frac{2}{kT}}.$$

Далее продифференцируем полученное выражение по  $T$ :

Найдём точку, в которой функция равна 0, что и соответствует минимальной разности площадей:

$$T = 0,5337946469.$$

Дифференциальное уравнение инерционного звена второго порядка имеет вид:

$$W_3^*(p) = \frac{w(p)}{w_3(p)} = \frac{k}{T_1 p^2 + T_2 p + 1}.$$

Для того чтобы найти  $T_1$  и  $T_2$ , найдём такое  $T$ , чтобы разность квадрата интегральной ошибки была минимальна. Для этого применим метод наименьших квадратов.

Функция звена второго порядка будет выглядеть следующим образом\* [1]:

$$h = 1 - \frac{e^{-at} \cdot \sin(bt + f)}{bT};$$

где  $\sigma = \frac{T_1}{2T}$ ;  $a = \frac{\sigma}{T}$ ;  $b = \frac{\sqrt{1-\sigma^2}}{T}$ ;  $f = \arccos(\sigma)$ .

$$Z = \sum_{i=1}^{20} (h_i - y_i)^2.$$

Решаем полученное выражение в Maple.

Для нахождения двух неизвестных продифференцируем полученное выражение по этим неизвестным

$$Z1 = \frac{d}{dT} Z; Z2 = \frac{d}{dT1} Z.$$

Для нахождения постоянных времени полученные выражения приравняем к нулю.

В ходе вычислений получим, что

$$T=0,319025;$$

$$T1=0,50158.$$

---

\* Лукас В. А. Теория управления техническими системами. 3-е издание. Екатеринбург: 2002.

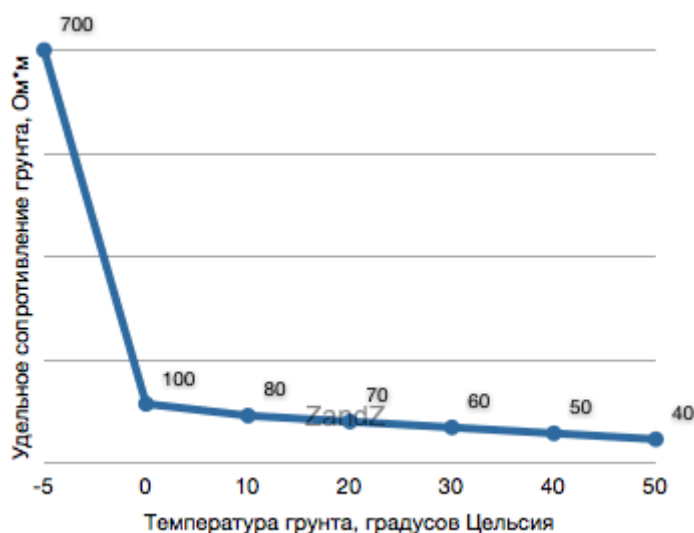
## ЗАЗЕМЛЕНИЕ ГОРНЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

*ОСТАПЧЕНКО А. В., СТАРИКОВ В. С.*

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Дальнейшее освоение природных богатств районов Крайнего Севера связано с ростом энергетических мощностей и рабочих напряжений, постоянным совершенствованием систем электроснабжения потребителей. Это, в свою очередь, требует улучшения условий труда, обеспечения необходимого уровня электробезопасности путем разработки эффективных заземляющих устройств для защиты человека от поражения электрическим током. Известно, что с уменьшением температуры - удельное сопротивление грунта возрастает. Так для суглинка при  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  оно не превышает  $100\text{ Ом}\cdot\text{м}$ , однако при температуре в  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  может достигать  $500\text{-}1000\text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

На рисунке графике хорошо видно, что при температуре ниже нуля грунт резко повышает свое удельное сопротивление, что связано с переходом воды в другое агрегатное состояние (из жидкого в твердое) – почти прекращаются процессы переноса заряда ионами солей и кислотными/щелочными остатками.



Зависимость удельного сопротивления грунта (суглинок) от его температуры  
(данные из IEEE Std 142-1991):

Для вечномерзлого грунта, температура которого всегда составляет  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , характерно удельное сопротивление в  $10\text{-}50$  тысяч  $\text{Ом}\cdot\text{м}$ . Чтобы достигнуть необходимого сопротивления заземления в таких условиях - необходимо смонтировать количество заземляющих электродов в десятки раз превышающее количество электродов, необходимое в обычном грунте. Что зачастую просто не выполнимо. С учетом сложностей заземления в вечномерзлых грунтах, для организации заземляющего электрода обычно применяется следующее решение - засоление грунта. Это добавление в почву такого количества обычной поваренной соли  $\text{NaCl}$ , которое позволяет снизить удельное сопротивление грунта около электродов до необходимого уровня.

Кроме засоления, иногда применяется такой сложный и дорогостоящий прием, как замена грунта. Он осуществляется путем вынимания естественного грунта и засыпка полученного объема другим, имеющим низкое удельное сопротивление, грунтом. Такой грунт из-за первоначально низкого сопротивления при замерзании не будет сильно повышать свое

удельное сопротивление, а обычные заземлители, размещенные в нем дадут требуемое сопротивление заземления в любое время года.

Для надежного и качественного заземления в условиях вечномёрзлых грунтов рекомендуется использовать комплекты электролитического заземления. Расчет электролитического заземления (расчет сопротивления заземления) производится как расчет обычного горизонтального электрода в виде трубы, имеющей длину 2,4 метра с учетом влияния электролита на окружающий грунт (коэффициент  $C$ ).

Формула расчета сопротивления заземления одиночного горизонтального электрода с добавлением поправочного коэффициента

$$R_1 = C \frac{\rho}{\pi \cdot L} \cdot \ln \frac{L}{\sqrt{dT}},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление грунта (Ом·м);

$L$  – длина заземлителя (м);

$d$  – диаметр заземлителя (м);

$T$  – заглубление (расстояние от поверхности земли до заземлителя) (м);

$\pi$  – математическая константа Пи (3,141592);

$C$  – коэффициент содержания электролита в окружающем грунте

Коэффициент  $C$  варьируется от 0,5 до 0,05. Со временем он уменьшается, так как электролит проникает в грунт на больший объем, при этом повышая свою концентрацию.

Для электролитического заземления формула расчета сопротивления заземления упрощается до вида:

$$R_1 = 0,0414\rho,$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление грунта (Ом·м)

Достоинства электролитической системы заземления:

- Электрод в 10 раз эффективнее обычного металлического электрода таких же размеров
- Специальная смесь минеральных солей с патентованной добавкой:
- Не вызывает ускорения коррозии электрода
- Не превращается в электролит сразу всем объемом при повышенной влажности грунта (актуально в весенний период)
- Делает процесс выщелачивания равномерным и постоянным. Это способствует не просто сохранению концентрации электролита в грунте, а ее увеличению со временем, что способствует дополнительному уменьшению сопротивления заземления.
- Срок службы электрода составляет не менее 50 лет.



## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ МЕХАНИЗМОВ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

ОСИПОВ П. А.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Электропривод главных механизмов карьерного экскаватора ЭКГ-18 производства МК «Уралмаш» выполнен с асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором (АДКР). Координаты АДКР используют в информационных системах для вычисления производительности, времени рабочих операций и эффективности работы экскаватора. Оценка производительности связана с определением массы горной породы в ковше, пропорциональной статической составляющей электромагнитного момента электропривода подъема ковша [1].

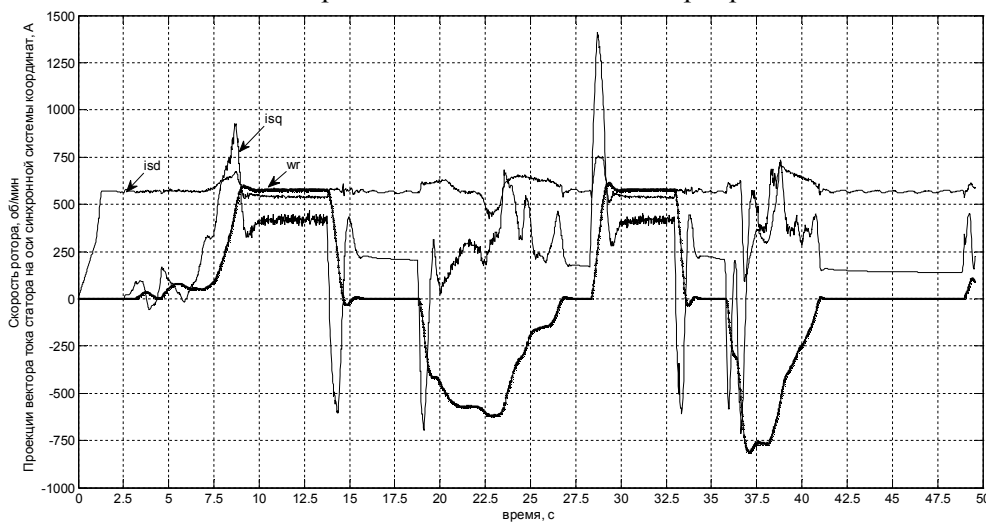


Рис. 1. Экспериментальные данные работы электропривода механизма подъема ковша экскаватора ЭКГ-18:

$i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  – проекции вектора тока статора на ось  $\alpha$  и ось  $\beta$ ;  $\omega_r$  – угловая частота вращения ротора.

Математическая модель АДКР при произвольной ориентации системы координат  $\alpha$ - $\beta$  (1) [2] и ориентации по вектору потокосцепления ротора (2) [3]:

$$\begin{aligned}
 i_{m\alpha} &= \frac{\Psi_{m\alpha}}{L_m(\Psi_m)}; \quad \Psi_{m\alpha} = \Psi_{r\alpha} - i_{r\alpha} L_{r\sigma}; \\
 i_{m\beta} &= \frac{\Psi_{m\beta}}{L_m(\Psi_m)}; \quad \Psi_{m\beta} = \Psi_{r\beta} - i_{r\beta} L_{r\sigma}; \\
 i_{r\alpha} &= i_{m\alpha} - i_{s\alpha}; \quad p\Psi_{r\alpha} = -i_{r\alpha} R_r + (\omega_k - \omega)\Psi_{r\beta}; \\
 i_{r\beta} &= i_{m\beta} - i_{s\beta}; \quad p\Psi_{r\beta} = -i_{r\beta} \cdot R_r - (\omega_k - \omega)\Psi_{r\alpha};
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 p\Psi_r &= \frac{1}{T_r} (L_m i_{s\alpha} + \Psi_r); \\
 m &= \frac{3}{2} p_{II} k_r \Psi_r i_{s\beta},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$ ,  $i_{r\alpha}$ ,  $i_{r\beta}$ ,  $i_{m\alpha}$ ,  $i_{m\beta}$  – проекции пространственного вектора тока статора, тока ротора, тока намагничивания, А;  $\Psi_{s\alpha}$ ,  $\Psi_{s\beta}$ ,  $\Psi_{r\alpha}$ ,  $\Psi_{r\beta}$ ,  $\Psi_{m\alpha}$ ,  $\Psi_{m\beta}$  – проекции пространственного вектора потокосцепления статора, потокосцепления ротора, главного потокосцепления, Вб;  $R_r$  – приведённое к статору сопротивление ротора, Ом;  $L_{r\sigma}$  – индуктивность рассеяния ротора, Гн;  $m$ ,  $m_c$  – электромагнитный момент асинхронного двигателя и момент сопротивления, Нм;  $\omega$ ,  $\omega_k$  – угловая частота вращения ротора и системы координат в электрическом пространстве, эл. рад/с;  $T_r = L_r/R_r$  – электромагнитная постоянная времени ротора, с;  $k_r = L_m/L_r$  – коэффициент электромагнитной связи ротора.

Экспериментальные данные (рис. 1) работы электропривода механизма подъема ковша получены для двух циклов операций: подъем ковша от поверхности земли до горизонтального положения рукояти; удержание рукояти в горизонтальном положении; опускание ковша до поверхности земли. Вылет рукояти поддерживался на таком уровне, чтобы ковш находился под головными блоками стрелы, с целью плавности изменения момента статического сопротивления при перемещении ковша в плоскости стрелы.

В экспериментальных характеристиках (см. рис. 1) отсутствует угловая скорость поля статора, поэтому метод вычисления электромагнитного момента (2) дополнен уравнением вычисления скольжения для ориентированной по потокосцеплению ротора модели АДКР  $\beta_k = R_r k_r i_{s\beta} / \psi_r$  [4]. Значение скольжения в режиме удержания ковша на нулевой скорости принимается равным значению скольжения при номинальной скорости для компенсации снижения в два раза  $i_{s\beta}$  на нулевой частоте вращения.

Из графиков (рис. 2) следует, что вычисленные значения электромагнитного момента в процессе удержания ковша на нулевой частоте вращения отличаются от значений электромагнитного момента при установившейся частоте вращения на 20 % для метода с произвольной ориентацией системы координат и 45 % для метода с ориентацией по вектору потокосцепления ротора.

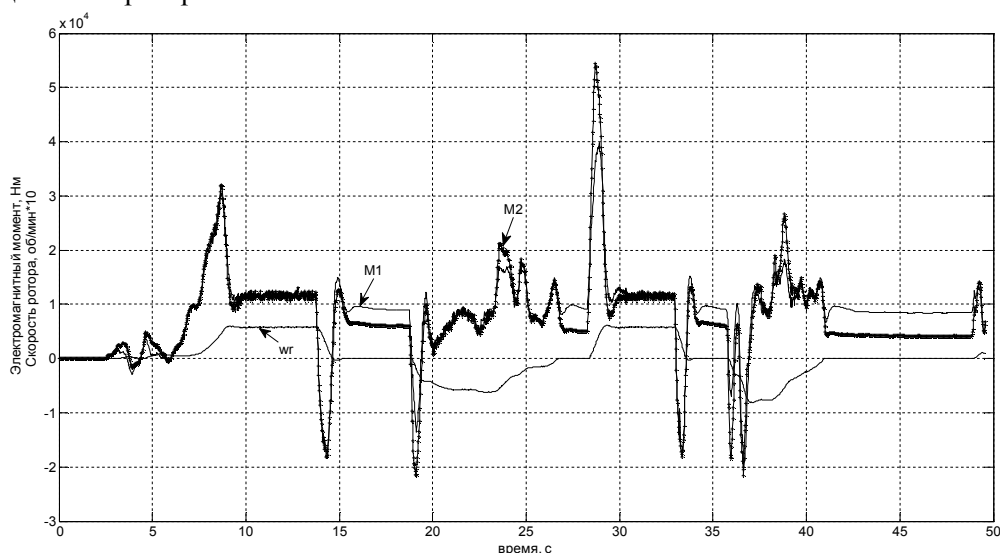


Рис. 2. Вычисленный электромагнитный момент электропривода механизма подъема ковша:

M1, M2 – при произвольной ориентации системы координат  $\alpha$ - $\beta$  и ориентации по вектору потокосцепления ротора;  
 $\omega_r$  – угловая частота вращения ротора

Применение моделей с ориентацией по вектору потокосцепления ротора для вычисления электромагнитного момента и скольжения АДКР характеризуется высокой погрешностью в зоне низких частот вращения ротора. Метод вычисления электромагнитного момента с произвольной ориентацией вращающейся системы координат  $\alpha$ - $\beta$  учитывает изменение скольжения в области низких частот, которое должно быть вычислено по значениям угловой частоты вращения поля статора.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карякин А. Л. Метод измерения статического тока электропривода // Изв. вузов. Горный журнал. 2002. № 2.
2. Поляков В. Н. [и др.]. Экстремальное управление электрическими двигателями / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Р. Т. Шрейнера. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006.
3. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2006.
4. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УрО РАН, 2000.

## МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

ПЕТРИХИН И. С., САДОВНИКОВ М. Е.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Целью настоящей работы является краткий обзор существующих методов непрерывного контроля изоляции для выработки подходов к решению задачи надежного и селективного контроля изоляции электрических сетей, работающих с изолированной нейтралью источника питания.

В условиях работы современных промышленных предприятий всех отраслей промышленности требуется непрерывно решать задачи обеспечения безопасности обслуживающего персонала, надежной эксплуатации электрооборудования и гарантированного электроснабжения потребителей электрической энергии. Особенно это актуально для особо опасных производственных объектов, к которым относятся традиционные объекты горного производства, такие как шахты, рудники и открытые горные работы.

Например, в условиях подземных горных работ эксплуатируются протяженные кабельные линии, изоляцию которых, в процессе эксплуатации, сложно защитить от механических повреждений. В связи с этим повреждения изоляции кабельных линий одна из основных причин возникновения аварий в шахтах и рудниках [2]. Повреждение кабеля в местах возможного выделения метана или концентрации угольной пыли (в забоях), может привести к взрывам, пожарам или поражению людей электрическим током со всеми вытекающими отсюда последствиями.

В связи с этим непрерывный контроль состояния изоляции электрической сети и электрооборудования является общепризнанным способом обеспечения безопасности сетей напряжением до 1140 В включительно и, в некоторых случаях, сетей 6 и 10 кВ.

В настоящее время задача непрерывного контроля изоляции отдельных фаз на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью решена не в полной мере, поэтому нет устройств надежного отключения, обеспечивающих безопасную эксплуатацию электроустановок во всех возможных при эксплуатации случаях.

Основные методы, непрерывного контроля изоляции [1-4]:

*Метод вольтметра-амперметра* заключается в определении значения тока утечки, образующегося при приложении к изоляции испытательного напряжения. В этом методе определяются полное сопротивление изоляции, используя методы холостого хода и короткого замыкания, а затем активная и емкостная составляющие полного сопротивления изоляции. Недостаток данного метода заключается в том, что высока возможность погрешности при определении параметров сети вольтметрами и амперметрами, которые в некоторых случаях не фиксируют равномерное снижение сопротивления изоляции.

*Метод холостого хода и короткого замыкания.* В данном методе сопротивление изоляции находится как частное от деления напряжения холостого хода между любой из фаз сети и землей на ток короткого замыкания (ток замыкания на землю любой фазы). Необходимость выполнения глухого замыкания на землю для выполнения измерения является недостатком данного метода.

*Метод наложения.* Метод основан на наложении постоянного тока мегомметра на переменный ток сети. Общее сопротивление изоляции сети, находящейся под рабочим напряжением, наиболее просто может быть получено при помощи измерения обычными омметрами постоянного тока. При использовании данного метода достаточно провести только одно измерение между любым проводом и землей. Результатом измерения является общее сопротивление изоляции по отношению к земле. Наложение относительно большого напряжения на изоляцию сети изменяет ее сопротивление, что может вызвать пробой изоляции и увеличивает опасность поражения электрическим током обслуживающего и эксплуатирующего персонала.

*Метод добавочной проводимости.* Заключается в том, что под рабочим напряжением измеряются проводимости изоляции фаз относительно земли, затем подключается добавочная проводимость в одну из фаз и так же измеряются напряжения фаз относительно земли. По измеренным напряжениям вычисляются проводимости каждой фазы. Недостатком рассмотренного метода является большая погрешность в определении параметров изоляции, которая возникает от небольшой погрешности измерения напряжений.

*Метод токов нулевой последовательности с асимметрами.* Асимметр — это три равных по величине сопротивления, включенные в звезду. Нулевая точка этой звезды заземляется через измерительный узел. Сопротивление подключаемого асимметра должно быть достаточно большим. При повреждении изоляции на измерительном узле появляется напряжение нулевой последовательности и через него начинает проходить ток. Этого тока достаточно для срабатывания прибора контроля изоляции. Недостаток метода заключается в том, что он не позволяет выявить равномерное снижение сопротивления изоляции.

*Метод на выпрямленных токах (вентильные схемы).* Три полупроводниковых вентиля подключаются к фазам контролируемой сети. Общая точка вентиля соединяется с землей через измерительный узел. При снижении установленного предела сопротивления изоляции происходит срабатывание прибора контроля изоляции. В данном методе не учитывается индуктивность вентильной схемы и емкость фаз по отношению к земле — это является его недостатком.

*Коммутационный метод.* Измерительным органом данного метода являются трансформаторы напряжения нулевой последовательности. Метод нашел применение в сетях 6, 10 и 35 кВ. За счет сравнения токов нулевой последовательности отдельных присоединений выделяется поврежденное присоединение. Недостатком метода является необходимость исключения всех искусственно созданных цепей утечки на землю.

Каждый из выше изложенных методов имеет практическую реализацию и возможность развития и усовершенствования для обеспечения надежности и безопасности электроустановок и электрических сетей. Развитие методов и устройств непрерывного контроля изоляции электрической сети играет особо важную роль в горно-добывающей промышленности с точки зрения техники безопасности работников предприятия и снижения затрат на простой и ремонт электрооборудования.

Методы и устройства непрерывного контроля изоляции электрических сетей после реализации на горно-добывающих предприятиях можно применять на общепромышленных предприятиях и предприятиях народного хозяйства не имеющих взрывоопасную атмосферу, в связи с более низкими требованиями техники безопасности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цапенко Е. Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В. М.: Энергия, 1972. 152 с.
2. Нагорных В. В. Система непрерывного контроля сопротивления изоляции отдельных фаз электрической сети с изолированной нейтралью // Горное оборудование и электромеханика. М.: Новые технологии, 2010. № 2. С. 16-23.
3. Цапенко Е. Ф. Горная электротехника. М.: Недра, 1986. 431 с.
4. Бульчев А. В., Наволочный А. А., Поздеев Н. Д. // Межвузовская научно-техническая конференция «Электроснабжение. Новые технологии». Волгоград. (<http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/eltf/mendus/library/mat7.htm>).

## ОГРАНИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК РУДНИЧНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

ГРИШЕНКОВ М. А.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Целью работы является исследование динамических процессов, происходящих при подъеме груза, и рассмотрение наилучшего способа ограничения динамических нагрузок. Идея работы заключается в сравнении разных способов коррекции координат. Актуальность работы обусловлена необходимостью постоянного поддержания безопасности и надежности работы шахтных подъемных установок.

Ограничение динамических нагрузок посредством использования демпфирующих свойств электропривода является наиболее перспективным. Для анализа различных структур управления предложен модифицированный метод нормированных передаточных функций [2]. В качестве эталонной рассмотрена разомкнутая система управления электроприводом (рис. 1).

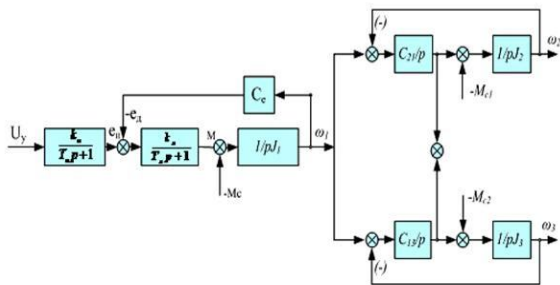


Рис. 1. Структурная схема разомкнутой трехмассовой ЭМС подъемной установки.

Динамические свойства системы определяются собственным оператором

передаточных функций:

$$D(p) = \frac{k_2 k_3}{n \gamma} T_M T_1^4 T_3 p^6 + \frac{k_2 k_3}{n \gamma} T_M T_1^4 p^5 + \left( \frac{k_2 k_3}{n} T_1^4 + \frac{k_2 k_3 (1+n) + k_2 n + k_3}{n \gamma} T_M T_1^4 T_3 \right) p^4 + \frac{k_2 k_3 (1+n) + k_2 n + k_3}{n \gamma} T_M T_1^2 p^3 + \left( \frac{k_2 n + k_3}{n \gamma} T_1^2 + T_M T_3 \right) p^2 + T_M p + 1,$$

где  $T_3$  – электромагнитная постоянная времени;  $\gamma = J_1 + J_2 + J_3/J_1 = 1 + k_2 + k_3$  – относительный момент инерции трехмассовой ЭМС;  $k_2 = J_2/J_1$  – относительное значение момента инерции второй массы;  $k_3 = J_3/J_1$  – относительное значение момента инерции третьей массы;  $T_M = (J_1 + J_2 + J_3)R_\alpha C_c^2 = J_1 + J_2 + J_3/k_m C_c$  – электромеханическая постоянная времени системы;  $T_1^2 = J_1/C_{21}$  – постоянная времени характеризующая частоты собственных колебаний трехмассовой ЭМС;  $n = C_{13}/C_{21}$  – относительное значение коэффициента жесткости между второй и третьей массой;  $J_1, J_2, J_3$  – моменты инерции первой, второй и третьей масс;  $R_\alpha$  – активное сопротивление якорной обмотки двигателя;  $C_c$  – внутренняя обратная связь двигателя по ЭДС.

Демпфирующие свойства разомкнутой трехмассовой ЭМС ограничены массами рабочих органов, вследствие этого возможность использования естественной демпфирующей способности электропривода подъемной установки с разомкнутой системой управления является ограниченной [2]. Замкнутая система трехмассовой ЭМС подъемной установки при параллельной коррекции координат [4], представлена на рис. 2. В представленной схеме присутствуют следующие обратные связи: жесткая и гибкая по скорости, жесткая и гибкая по току, жесткая и гибкая по упругому моменту.

Использование метода нормированных передаточных функций позволило составить математическое описание представленной ЭМС при параллельной коррекции координат:

$$\frac{k_2 k_3}{\gamma n} T_M T_1^4 + \frac{k_2 k_3}{\gamma n} \tau_r T_M T_1^4 = \tau^6; \quad \frac{k_2 k_3}{\gamma n} (1 + \lambda_2) T_M T_1^4 + \frac{k_2 k_3}{n} \tau_c T_1^4 = 6 \varepsilon \tau^5; \quad \frac{k_2 k_3}{n} (1 + \lambda_1) T_1^4 + \left( \frac{k_2 k_3 (1+n) + k_2 n + k_3}{\gamma n} \right) (1 + \tau_r) T_M T_1^2 + \left( \frac{k_2 k_3 (1+n)}{\gamma n} \right) \tau_n T_M T_1^2 = 3 \tau^4 + 12 \varepsilon^2 \tau^4; \\ \left( \frac{k_2 k_3 (1+n) + k_2 n + k_3}{\gamma n} \right) (1 + \lambda_2) T_M T_1^2 + \lambda_3 \left( \frac{k_2 k_3 (1+n)}{\gamma n} \right) T_M T_1^2 + \left( \frac{k_2 n + k_3}{n} \right) \tau_c T_1^2 = 8 \varepsilon^3 \tau^3 + 12 \varepsilon \tau^3;$$

$$\left(\frac{k_2 n + k_3}{n}\right) (1 + \lambda_1) \tau_1^2 + \frac{1}{\gamma} (k_2 + k_3) \tau_n \tau_m + \tau_r \tau_m + \tau_m = 3\tau^2 + 12\varepsilon^2 \tau^2; \tau_m (1 + \lambda_2) + \frac{1}{\gamma} \lambda_3 (k_2 + k_3) \tau_m + \tau_c = 6\varepsilon \tau.$$

Замкнутая система трехмассовой ЭМС подъемной установки при смешанной коррекции координат [4] представлена на рис. 3.

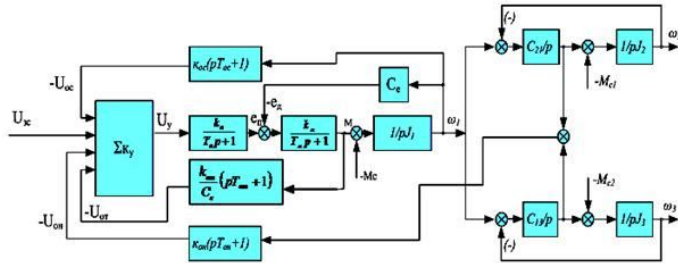
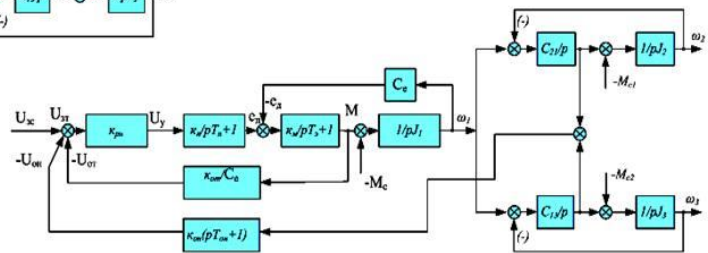


Рис. 3. Структурная схема трехмассовой ЭМС подъемной установки при смешанной коррекции координат

Рис. 2. Структурная схема трехмассовой ЭМС подъемной установки при параллельной коррекции координат



Динамические свойства представленной системы определяются собственным оператором передаточных функций:

$$D(p) = \frac{k_2 k_3}{n[\gamma \lambda_2 + (\gamma - 1) \lambda_3]} T_n T_{рн} T_1^4 p^6 + \frac{k_2 k_3}{n[\gamma \lambda_2 + (\gamma - 1) \lambda_3]} T_{рн} T_1^4 p^5 + \left[ \frac{k_2 k_3 (1 + n) + k_2 n + k_3}{n[\gamma \lambda_2 + (\gamma - 1) \lambda_3]} T_n T_{рн} T_1^2 + \frac{k_2 k_3 \lambda_2}{n[\gamma \lambda_2 + (\gamma - 1) \lambda_3]} T_1^4 \right] p^4 + \left[ \frac{k_2 k_3 (1 + n) + k_2 n + k_3}{n[\gamma \lambda_2 + (\gamma - 1) \lambda_3]} T_{рн} T_1^2 + \frac{k_2 k_3 (1 + n)}{n \gamma \lambda_2} T_n T_1^2 \right] p^3 + \left[ \frac{\gamma}{\gamma \lambda_2 + (\gamma - 1) \lambda_3} T_n T_{рн} + \frac{k_2 k_3 (1 + n) \lambda_3}{n[\gamma \lambda_2 + (\gamma - 1) \lambda_3]} T_1^2 \right] p^2 + \left[ \frac{\gamma}{\gamma \lambda_2 + (\gamma - 1) \lambda_3} T_{рн} + \frac{\gamma - 1}{\gamma \lambda_2} T_n \right] p + 1.$$

В результате исследования процессов коррекции координат электропривода подъемной установки можно сделать вывод: в настоящее время наиболее эффективной системой коррекции координат из условия максимального демпфирования колебаний в упругих элементах подъемной установки является система смешанной коррекции координат с жесткими отрицательными обратными связями по току и упругому моменту и гибкой отрицательной обратной связью по упругому моменту.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ключев В. И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. М.: Изд-во «Энергия», 1971. 320 с.
2. Ляхомский А. В., Фашиленко В. Н. Управление электромеханическими системами горных машин. М.: Изд-во МГТУ, 2004. 296.
3. Решетняк С. Н. К вопросу о применении частотно-регулируемого привода шахтных подъемных установок // ГИАБ. № 5. 2005. М.: Изд-во МГТУ. С. 230-233.
4. Решетняк С. Н. Математическое описание трехмассовой ЭМС подъемной установки // ГИАБ. № 7. 2007. М.: Изд-во МГТУ. С. 287-292.
5. Решетняк С. Н., Фашиленко В. Н. [и др.]. Особенности применения преобразовательной техники на горнодобывающих предприятиях России // ГИАБ. № 6. 2008. М.: Изд-во МГТУ. С. 331-335.

## ЗАЩИТА ОТ УТЕЧЕК ТОКА В СЕТЯХ НИЖЕ 1000 В

КОЛЕСНИК Е. В., СТАРИКОВ В. С.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

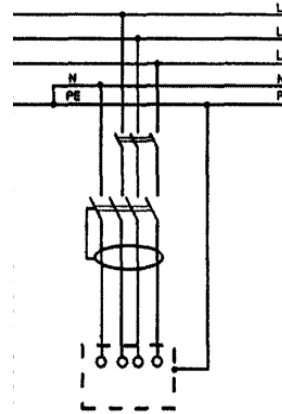
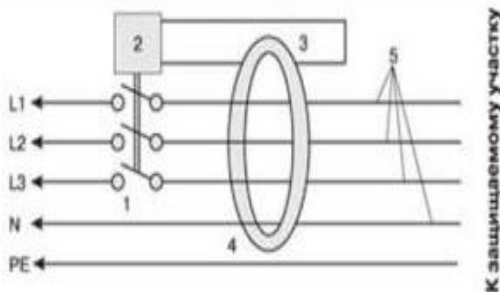
Защитное отключение (ЗО) – быстродействующая защита, осуществляющая автоматическое отключение ЭУ при возникновении в ней замыканий или токов утечки в проводниках электропитания, чем обеспечивает защиту от поражения электрическим током человека и возникновения пожара. Защита осуществляется ограничением времени протекания через человека опасных токов и протекания токов утечки в проводниках.

Таким образом, если при прикосновении человека к корпусу оборудования или фазе сети напряжение прикосновения (или ток через тело человека) превысит длительно допустимое значение, то возникает реальная угроза поражения человека током, и мерой защиты в этом случае может быть лишь быстрый разрыв цепи тока через тело человека, т.е. отключение соответствующего участка цепи. Для выполнения этой задачи и служит защитное отключение. Защита осуществляется устройством защитного отключения (УЗО), которое постоянно контролирует условия поражения и осуществляет отключение сети или участка ее при их возникновении.

С введением ГОСТ Р 51326-1-99 Госэнергонадзором рекомендуется для защиты от пожаров при замыканиях в сети и поражения электрическим током применять устройства защитного отключения, реагирующие на дифференциальный ток.

Рассмотрим принцип работы УЗО-Д (рис.1).

В трехфазных УЗО через окно сердечника проходят четыре провода - три фазных и нулевой. Принципиальная электрическая схема простейшего трехфазного УЗО приведена на рис. 1.



Принцип действия и применение УЗО-Д в системе TN-C-S

Трёхфазное УЗО включает в себя выключатель 1, которым управляет элемент 2, получающий сигнал на отключение с вторичной обмотки 3 трансформатора тока 4, сквозь окно которого проходят нулевой рабочий провод N и фазные провода L1, L2 и L3 (5).

При равенстве нагрузки в нулевом и фазном (или в трех фазных) проводах их геометрическая сумма равна нулю (ток в фазном проводе однофазного УЗО течет в одном направлении, а ток в нулевом проводе точно такого же значения течет в противоположном направлении). Поэтому тока во вторичной обмотке трансформатора тока нет.

При утечке тока на заземленный корпус электроприемника, а также при случайном прикосновении стоящего на земле или на токопроводящем полу человека к фазному проводу электрической сети, равенство токов в первичной обмотке трансформатора тока нарушится, поскольку по фазному проводу, помимо тока нагрузки, будет проходить ток утечки, и в его вторичной обмотке появится ток. Протекающий во вторичной обмотке трансформатора ток

воздействует на управляющий элемент 2, который через выключатель 1 отключает потребителя от питающей сети. Внешний вид трёхфазного УЗО показан на рис. 2.

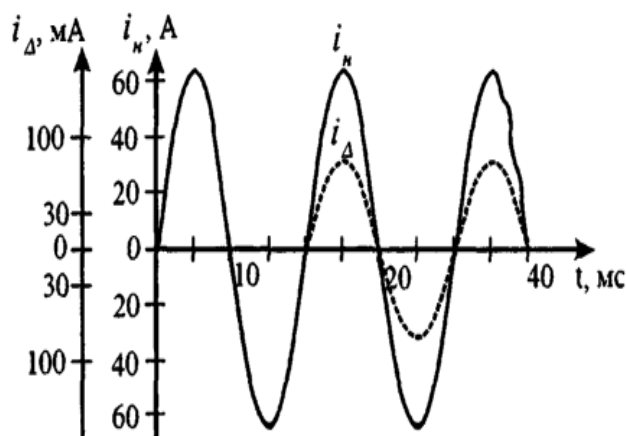


Рис. 2. Осциллограмма тока нагрузки и дифференциального тока при срабатывании УЗО

По условиям функционирования УЗО бывают двух типов:

- типа АС, реагирующие на синусоидальный переменный дифференциальный ток, медленно возрастающий, либо возникающий скачком;
- типа А, реагирующие как на синусоидальный переменный дифференциальный ток, так и на пульсирующий постоянный дифференциальный ток, медленно нарастающие, либо возникающие скачком.

По наличию выдержки времени срабатывания устройства защитного отключения подразделяются на:

- УЗО общего назначения (без выдержки срабатывания);
- типа S, которые имеют выдержку срабатывания для обеспечения селективности отключения при последовательном их соединении с УЗО общего назначения.

В соответствии с требованиями ПУЭ седьмого издания, УЗО-Д чаще используется как дополнительная защита. УЗО выпускаются на номинальные отключающие токи утечки 10, 30, 100, 300, 500, 1000 мА. При этом УЗО на токи 100 мА (и более) используются, как правило, в необходимых случаях - для обеспечения селективности.

УЗО на токи 300 мА применяют также для обеспечения защиты от возникновения пожара при замыкании тока на землю.

Защитное отключение, как правило, используется в тех случаях, когда защитное заземление и защитное зануление неэффективно защищают от поражения электрическим током или в тех случаях, когда их применение невозможно по условиям эксплуатации.



## УЧЕБНЫЙ СТЕНД ПО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМУ ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

ДЕМБИНСКИЙ М. Ф.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Частотные преобразователи широко распространены в промышленности, поэтому возникает необходимость обучения студентов электротехнических специальностей принципам частотного регулирования. Промышленные устройства имеют высокую стоимость и не ориентированы на безопасную демонстрацию осциллограмм напряжений и токов.

Целью работы является разработка стенда для демонстрации принципа работы частотного преобразователя (рис. 1) с возможностью наблюдения осциллограмм выходных напряжений и токов.

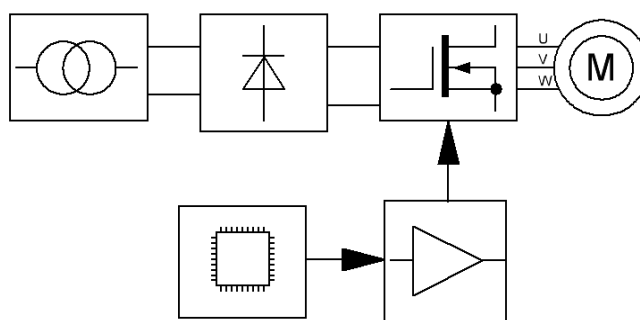


Рис. 1. Структурная схема лабораторного стенда

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- Выбрать электродвигатель;
- Выбрать полупроводниковые ключи;
- Выбрать управляющий микроконтроллер;
- Разработать алгоритмы управления ключами;
- Разработать способы наблюдения работы стенда.

**Выбор электродвигателя.** В качестве демонстрационного двигателя был выбран сельсин БД404А. Сельсин имеет мощность 16 Вт, соответственно, не требует мощных ключей и охлаждения. При замыкании обмотки фазного ротора накоротко сельсин подобен общепромышленным асинхронным двигателям с короткозамкнутым ротором. В задачи стенда входит демонстрация изменения скорости вращения двигателя без нагрузки на валу, поэтому сельсин будет работать в режиме холостого хода.

**Выбор полупроводниковых ключей.** В качестве силовых ключей взяты широко распространённые MOSFET транзисторы IRF740 с номинальным длительным током 1 А и амплитудным значением линейного напряжения 400 В. Трёхфазная мощность полупроводникового преобразователя частоты составляет 250 Вт поэтому сельсин может быть подключен в качестве нагрузки на преобразователь. Драйверы ключей использованы интегральные IR2110 по причине компактности и низкой стоимости.

**Выбор управляющего микроконтроллера.** Для управления выбран микроконтроллер STM32 - один из самых экономически выгодных на сегодняшний день микроконтроллеров имеющих аппаратный трёхфазный ШИМ-таймер с сигналами для 6 ключей. Таймер контроллера обеспечивает задержку при переключении, что исключает сквозные токи и упрощает разработку программы.

**Разработка алгоритма управления ключами.** Программа для микроконтроллера написана в среде разработки Keil на языке Си. Для регулирования скорости подключены 2 кнопки, при запуске рассчитывается таблица поиска синусоиды для упрощения последующих расчётов. Регулирование частоты производится изменением скорости записи значений синуса в

регистры сравнения ШИМ. При изменении частоты пропорционально по линейному закону изменяется напряжение на двигателе, что обусловлено различной реактивной составляющей сопротивления фаз двигателя на разных частотах и необходимостью поддерживать фазные токи неизменными. Выходы фаз не имеют фильтров НЧ, так как фильтрами являются сами обмотки двигателя.

**Выбор способа наблюдения работы стенда.** Для вывода наглядных сигналов напряжений и токов преобразователь имеет нейтральную точку. На выходе инвертора находятся шунты и резисторные делители напряжения, переключаемые на режим наблюдения фазного напряжения или тока (рис. 2).

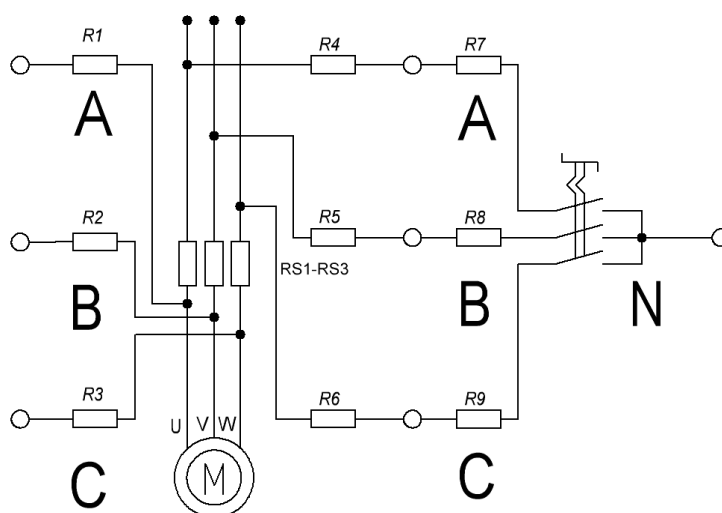


Рис. 2. Схема наблюдения осциллограмм выходных напряжений и токов

При разомкнутом переключателе на выходах А-А, В-В, С-С можно наблюдать форму токов, протекающих через шунты. При замкнутом переключателе резисторы образуют делитель напряжения, и на выходах А, В, С относительно N можно наблюдать форму выходных напряжений (рис. 3). Токоограничивающие резисторы на выходах обеспечивают безопасность работы со стендом и исключают возможность повреждения инвертора при случайном замыкании выходов. Также для безопасности инвертор имеет гальваническую развязку от сети через трансформатор.

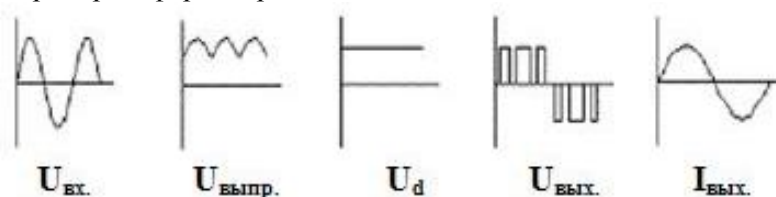


Рис. 3. Осциллограммы работы стенда

В результате проделанной работы был разработан стенд, демонстрирующий принцип работы частотного преобразователя. Данный стенд позволит студентам электротехнических специальностей обучаться принципам частотного регулирования, широтно-импульсной модуляции и программированию микроконтроллеров систем управления электроприводами.

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

СМИРНОВ И. А.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Повышение качества электроэнергии было и остаётся актуальным вопросом для энергетических систем. Одна из важных проблем электроэнергетики – компенсация реактивной мощности. При включении в электрической цепи индуктивной или емкостной составляющей нагрузки между электроустановкой и источником возникает обмен потоками энергии, который вызывает потери активной энергии, напряжения, а также снижает пропускную способность электрических сетей.

Потребление реактивной мощности, по существу, не связано с потреблением активной мощности и обусловлено параметрами сети переменного тока и режимами её работы. Реактивная мощность потребляется любым элементом электрической сети, в которой ток отстаёт от приложенного напряжения [1].

Большинство электроприёмников представляют собой электромагнитные механизмы, например, электродвигатели, в которых переменный магнитный поток связан с обмотками. При протекании переменного тока в обмотках индуцируются реактивные э.д.с., которые способствуют сдвиг по фазе между напряжением и током (ток «отстаёт» от напряжения).

Компенсация реактивной мощности особенно актуальна для буровых установок нефтедобычи, поскольку значительную часть электрооборудования такого технического комплекса составляют устройства, обязательным условием работы которых является создание в них магнитных полей, а именно: трансформаторы, асинхронные двигатели, которые можно обобщённо охарактеризовать как «индуктивная нагрузка». Установки на глубину бурения 3200м. работают с применением асинхронных двигателей, мощность указана в таблице.

Основные электроприводы буровой установки

Электропотребители		$P$ , кВт
Вышко- лебедочный блок	Электродвигатель привода буровой лебёдки	1000
	Электродвигатель аварийного привода	55
	Электродвигатель вспомогательной лебёдки	17
	2 электродвигателя вертикального шламового насоса	2x30
	Электродвигатель насоса агрегата гидравлического	7,5
	Электродвигатель консольно-поворотного крана	10,5
Емкостной блок (Циркуляционная система)	11 электродвигателей перемешивателей бурового раствора	11x5,5
	2 электродвигателя шламового насоса	2x45
	Электродвигатель дегазатора	22
	Электродвигатель насоса пескоотделителя	55
	Электродвигатель насоса илоотделителя	45
	2 вибросита (в составе каждого 3 электро-двигателя по 1,3 кВт)	2x3,9
	Ситогидроциклонная установка (включает в себя 3 электродвигателя по 1,3кВт)	3,9
	2 Центрифуги (в составе каждой двигателя 7,5 кВт и 18,5кВт)	2x(7,5+18,5)
	2 винтовых насоса	2x7,5
	Центробежный насос доливной емкости	7,5
6 электродвигатели вытяжных вентиляторов	6x2,2	
Насосный блок	2 Электродвигателя буровых насосов	2x950
	Электродвигатель охлаждения штоков насоса	4
	Электродвигатель насоса маслосмазки	5,8
	2 подпорных насоса	2x55

Для решения проблемы компенсации реактивной мощности используются устройства на основе статических или синхронных элементов. На первых этапах возникновения данной проблемы использовались в основном электромеханические средства [2]:

- Компенсаторы реактивной мощности на основе синхронных машин, способные генерировать и потреблять в определённых пределах активную мощность;
- Трансформаторные регуляторы напряжения с последовательным включением выходных обмоток в линию электропередач, обеспечивающих ступенчатое регулирование выходного напряжения с заданным углом фазы и соответствующую компенсацию реактивной мощности.

В настоящее время широко применяются статические тиристорные компенсаторы (СТК) и конденсаторные батареи или фильтрокомпенсирующие установки.

Регулирование реактивной мощности СТК осуществляется импульсно-фазовым управлением встречно-параллельных тиристорных вентилей, состоящих из обычных вентилей. Конденсаторные батареи могут коммутироваться с помощью тиристорных вентилей и выключателей. Параллельное подключение СТК к шинам энергосистемы позволяют регулировать напряжение с точностью, определяемой статизмом компенсаторов, а их модульное построение может реализовать требуемую мощность установки [3].

В сети электроснабжения буровых установок применяются батареи статических конденсаторов (БК), они могут работать как источники реактивной мощности. БК на напряжение до 1000В обычно включаются по схеме треугольника, так как при этом к конденсатору приложено линейное напряжение и в три раза увеличивается реактивная мощность по сравнению с соединением в звезду [4]:

$$Q_{\text{КЛ}} = I^2 X_K = \frac{U_{\text{Л}}^2}{X_K} = U_{\text{Л}}^2 \omega C, \quad Q_{\text{СГ}} = \left( \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \right)^2 / X_K = \frac{1}{3} U_{\text{Л}}^2 \omega C,$$

где  $U_{\text{Л}}$  – линейное напряжение сети;  $C$  – емкость трех фаз батарей;  $\omega$  – угловая частота.

К новым разработкам компенсирующих устройств относятся преобразователи напряжения (ПН) и статические устройства на его основе. Это новый класс преобразователей, основанный на применении запираемых (GTO и GCT) тиристорах и быстродействующих диодах со шкалой параметров напряжения 2500÷6000В и отключаемого тока 1500÷4000А. Активную и реактивную мощности можно получить, выделив активную и реактивную составляющие фазного тока [3]:

$$P_{\text{ПН}} = \frac{U_1 \cdot U_{\text{П}}}{X_{\text{Ф}}} \cdot \sin \beta; \quad Q_{\text{ПН}} = \frac{U_1 (U_1 - U_{\text{П}} \cos \beta)}{X_{\text{Ф}}}.$$

В зарубежных публикациях данный преобразователь имеет название FACTS (Flexible AC Transmission Systems – гибкие системы передачи переменного тока).

На многих нефтяных месторождениях Российской Федерации в настоящее время применяются устаревшие буровые установки, произведённые ещё в годы СССР. В случае модернизации таких установок уделяется внимание проблеме реактивной мощности, но как правило это сводится к установке фильтрокомпенсирующих установок. Активные работы по проектированию и разработке регуляторов мощности как в России, так и в европейских странах способствуют развитию этого направления, что даёт возможность применять средства компенсации нового уровня.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Князевский Б. А., Липкин Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Высш. школа, 1979. 431 с.
2. Бурман А. П. Перспективы применения в ЕЭС России гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока // Электротехника. 2004. № 8.
3. Кочкин В. И., Нечаев О. П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2000. 248 с.
4. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. 672 с.
5. Tevhid Atalik. Multi-DSP and –FPGA Based Fully-Digital Control System for Cascaded Multilevel Converters used in FACTS Applications. IEEE Trans. Industrial Informatics, vol. 99, 2012.