

# МАТЕРИАЛЫ УРАЛЬСКОЙ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОЙ ДЕКАДЫ

14-23 апреля 2008 г.

ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

## ВЫБОР МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПЧ-АД ДЛЯ ПРИВодОВ ГОРНЫХ МАШИН

*КУЧЕВ А. А., КАРЯКИН А. Л.*

ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

**Введение.** Возрастающие технологические требования к качеству производственных процессов, необходимость внедрения высоких технологий обуславливают устойчивую тенденцию внедрения в различные отрасли промышленного и сельскохозяйственного производства регулируемых электроприводов.

Широкое использование регулируемых электроприводов привело к тому, что современный электропривод является не только энергосиловой основой, позволяющей обеспечить производственные механизмы необходимой механической энергией, но и средством управления технологическими процессами, так как задачи по реализации качества производственных процессов в настоящее время в большинстве случаев возлагаются на системы управления регулируемыми электроприводами в сочетании с системами технологической автоматики.

Рациональное электропотребление обеспечивается не только экономичностью использования электроэнергии потребителями (в частности, электроприводами), но и зависит от качества электроэнергии питающей сети.

Качество электроэнергии оценивается следующими показателями:

1. Допустимое отклонение частоты, ограничивается значениями  $\pm 0,1$  Гц. Колебания частоты лимитируются значением  $0,2$  Гц сверх допустимого значения ее отклонения.

2. Допустимые значения отклонений напряжения от номинального на зажимах электрических двигателей по условиям нормального пуска и управления должны находиться в пределах  $-5...+10\%$ . Дополнительное понижение напряжения в послеаварийных режимах допускается не более чем на  $5\%$ .

3. Несимметрия напряжения характеризуется процентным отношением напряжения обратной последовательности  $U_{обр}$  к номинальному напряжению сети  $U_{ном}$ , т. е. коэффициентом несимметрии

$$\varepsilon_{несим} = \frac{U_{обр}}{U_{ном}} \cdot 100.$$

Несимметрия, при которой коэффициент  $\varepsilon_{несим} < 2\%$  на выводах любого трехфазного симметричного электроприемника, считается допустимой.

4. Несинусоидальность напряжения характеризуется значением коэффициента несинусоидальности

$$k_{несин} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_{ном}} \cdot 100,$$

где  $U_v$  – действующее значение напряжения  $v$ -й гармоники.

Допустимое значение коэффициента несинусоидальности составляет  $5\%$  на выводах любого электроприемника.

**Выбор установленной мощности и типа двигателя.** Одним из важнейших вопросов является правильный выбор установленной мощности асинхронного двигателя (АД). Эта задача особенно актуальна, т. к. при использовании АД, номинальная мощность которого меньше, чем требуемая по условиям работы механизма, происходит перегрев электрической машины и ее преждевременный выход из строя. При завышении номинальной мощности двигателя по сравнению с требуемой возрастают капитальные затраты на

электропривод, не в полной мере используются заложенные в двигатель активные материалы (медь и сталь), снижается КПД и коэффициент мощности двигателя.

Также важно выбрать тип двигателя, т. к. они сильно отличаются друг от друга видом, механическими характеристиками, типом исполнения и т. д. Для частотно-регулируемых приводов подходят двигатели серий 4А, 5А, 6А, АИР и специально разработанной серии электродвигателей для работы с ПЧ – АЧД.

**Выбор преобразователя частоты (ПЧ).** В первую очередь необходимо определиться с типом системы управления преобразователя частоты. Различают 2 типа систем управления ПЧ:

1). Системы скалярного управления. Являются более простыми и относительно дешевыми. Они характеризуются небольшим диапазоном регулирования скорости (от 1:5 до 1:10), относительно низкими точностью и качеством регулирования;

2). Системы векторного управления. Могут быть с обратной связью по скорости и без нее. Они являются наиболее быстродействующими и качественными и обеспечивают диапазон регулирования скорости 1:1000 и более. Их недостаток заключается в необходимости использования встроенного в двигатель или пристроенного датчика скорости.

Мощность и тип ПЧ выбирается с небольшим завышением по отношению к мощности двигателя и проверяется по номинальному току двигателя. Причем необходимо учесть, что при увеличении частоты коммутации ШИМ и температуры преобразователя уменьшается его номинальный ток и, соответственно, мощность преобразователя должна быть повышена.

К дополнительному оборудованию, поставляемому с ПЧ, относятся: тормозные сопротивления (стандартные или предназначенные для подъемных механизмов), модули рекуперации, сетевые дроссели и пассивные фильтры, дополнительные входные фильтры электромагнитной совместимости, синусные фильтры и дроссели двигателя.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков / Под ред. И. Я. Браславского. – М.: Издательский центр "Академия", 2004. – 256 с.
2. Поляков В. Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В. Н. Поляков, Р. Т. Штейнер; Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Р. Т. Штейнера. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 420 с.

### ЗАКОН УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ПОДДЕРЖАНИЕМ ПОСТОЯНСТВА МАГНИТНОГО ПОТОКА И ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПО ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ

ОСИПОВ П. А., ПОЛУЗАДОВ В. Н.

ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

Целью работы является разработка закона изменения напряжения статора, обеспечивающего высокую точность задания момента и длительный режим работы двигателя с тепловой нагрузкой, не превышающей предельно допустимую.

Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором выполняется по Т-образной электрической схеме замещения (рис. 1). Использование данной схемы замещения позволяет рассчитать значения фазной ЭДС статора  $E_1$ , основного магнитного потока  $\Phi$  и тока холостого хода  $I_0$  при изменении амплитуды и частоты напряжения.

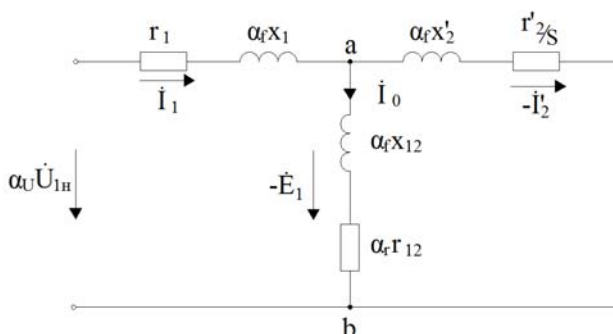


Рис. 1. Т-образная электрическая схема замещения асинхронной машины

Напряжение питания статорной обмотки изменяется по основному закону регулирования  $U_1/f_1 = \text{const}$ . Величина скольжения асинхронного двигателя определяется условием постоянного значения тока статора  $I_1 = \text{const}$  на всем диапазоне регулирования. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором работает с

постоянным моментом сопротивления на валу  $M_c = \text{const}$ . Зависимость момента двигателя  $M_2/M_{2н}$  (рис. 2) не совпадает с характеристикой механизма  $M_c = M_{2н}$ . В пределах устойчивой работы машины момент двигателя равен моменту сопротивления. Двигатель работает с  $M_2 = M_c$  за счет повышения скольжения. При кратности частоты напряжения ( $\alpha_f = f_1/f_{1н} = 0,2$ ) скольжение двигателя на 20 % превышает расчетное, ток статора – на 17 %, потери мощности в статоре – на 30% и в роторе – на 37 %. Асинхронный двигатель работает в аномальном режиме по току статора и тепловой нагрузке.

Следовательно, изменение напряжения по основному закону управления  $U_1/f_1 = \text{const}$  не позволяет с высокой точностью задать постоянное значение момента и обеспечить длительную работу двигателя с тепловой нагрузкой, не превышающей предельно допустимую.

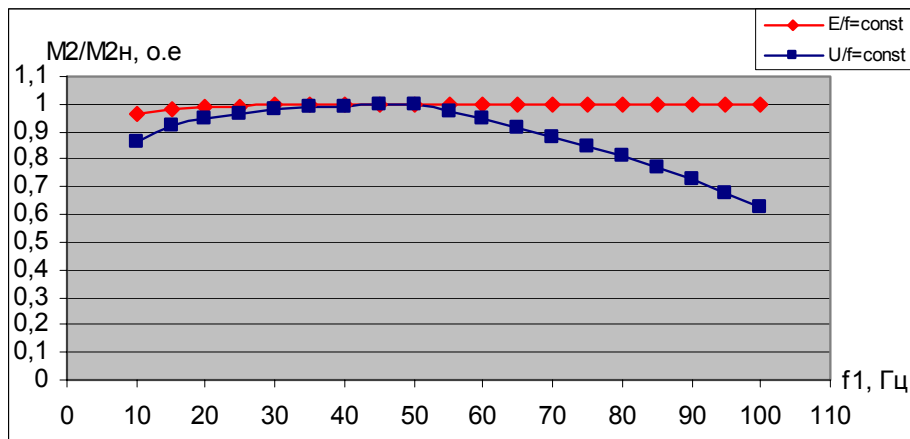


Рис. 2. Зависимость момента асинхронного двигателя от частоты напряжения при  $U_1/f_1 = \text{const}$  ( $f_n = 50$  Гц).

Предлагается напряжение статора  $U_1$  вычислять при условии  $E_1/f_1 = \text{const}$ , скольжение асинхронного двигателя определять критерием оптимальности тепловой нагрузки, т. е. тепловая нагрузка асинхронного двигателя при частотном регулировании должна быть равной номинальной тепловой нагрузке. Номинальная тепловая нагрузка асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором – суммарная мощность электрических потерь в обмотках статора ( $\Delta p_{\sigma 1} = f(I_1^2)$ ) и ротора ( $\Delta p_{\sigma 2} = f(I_2^2)$ ) при номинальных параметрах напряжения статора и принудительного охлаждения двигателя.

Расчет косвенным методом напряжения статора при условии  $E_1/f_1 = \text{const}$  и определение скольжения по критерию оптимальности тепловой нагрузки  $\Sigma(\Delta p_{\sigma 1} + \Delta p_{\sigma 2}) = \text{const}$  позволяют задать момент с погрешностью 4 % (рис. 2), увеличить КПД асинхронного двигателя на 3 % и контролировать ток статора с точностью 3 %.

Способ позволяет моделировать характеристики асинхронного двигателя в системе частотного регулирования, точно задать значение момента, обеспечить длительный режим работы двигателя по тепловой нагрузке, увеличить КПД двигателя и экономию электроэнергии.

## ОБЗОР ПРОБЛЕМ В ОБЛАСТИ КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

*БАЗАРОВ Ш. А., КАРЯКИН А. Л., САДОВНИКОВ М. Е.*  
 ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

Сопротивление изоляции в сетях с изолированной нейтралью влияет на безопасность эксплуатации таких сетей, надежность электроснабжения, безопасность обслуживающего персонала. В связи с этим рассмотрение вопросов, касающихся улучшения контроля изоляции в таких сетях, является актуальной задачей.

В сетях с изолированной нейтралью замыкания на землю приводят к возникновению перенапряжений, которые являются причиной большинства повреждений, особенно в кабельных сетях. Характер повреждения в сети зависит от состояния изоляции элементов сети и кратности перенапряжений.

Повреждение сетей вследствие снижения сопротивления изоляции приводит к простоям оборудования, недоотпуску продукции, травмам обслуживающего персонала.

Причины утечек в сетях с изолированной нейтралью:

- 1) старение материала изоляции;
- 2) отсыревание изоляции;
- 3) механическое повреждение изоляции.

Снижение сопротивления изоляции может происходить равномерно во всех фазах (симметричное снижение сопротивления изоляции) или в одной из фаз (не симметричное снижение сопротивления изоляции).

Для обеспечения безопасности сетей с изолированной нейтралью исторически используется два вида устройств, служащих для отключения поврежденного участка электрической сети:

1). Устройства контроля изоляции, предназначенные для постоянного контроля и опережающего отключения поврежденного участка сети до момента опасного развития ситуации как при симметричном, так и при несимметричном снижении сопротивления изоляции.

2). Защиты от однофазных замыканий на землю отключающие поврежденный участок электрической сети при несимметричном аварийном повреждении на этом участке (однофазном замыкании на землю).

Применение обоих видов устройств регламентируется правилами безопасности и другими нормативными документами.

В настоящий момент используемые устройства вида 1 и 2 имеют ряд недостатков, которые ограничивают их возможности применения по назначению или полностью сводят на нет их эффективность. Главные из этих недостатков:

- низкая чувствительность;
- зависимость чувствительности от различных факторов (характер утечки; колебания напряжения сети, напряжения питания устройства, температуры окружающей среды и т. п.);
- отсутствие отстройки от переходных процессов, происходящих в электрических сетях при ОЗЗ;
- неселективная работа;
- отсутствие автоматического самоконтроля;
- возможность шунтирования выходных контактов устройств обслуживающим персоналом (вывод устройства из работы) с целью выполнения плана и т. п.
- отсутствие возможности удаленного контроля и управления работой устройств.
- отсутствие возможности взаимосоординации работы этих устройств, особенно расположенных на удалении друг от друга.

Целью работы является разработка методов и устройств непрерывного контроля сопротивления изоляции, минимизирующих перечисленные выше недостатки существующих устройств, используя возможности, предоставляемые современной микропроцессорной элементной базой, допускающей осуществлять прямое логическое управление в процессе контроля сопротивления изоляции, а также координировать работу этих устройств, установленных в связанных электрических сетях предприятия, используя удаленные каналы передачи данных.

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ (ШИМ)**

*КИРИЛЛОВ Р. С., КАРЯКИН А. Л.*

ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором является самым распространенным типом электрической машины. Основным достоинством асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором является простота конструкции, высокая надежность и невысокая стоимость. Однако при стандартной схеме включения асинхронный двигатель не позволяет регулировать частоту вращения вала. Длительное время асинхронный двигатель использовался, в основном, в нерегулируемых электроприводах, хотя теоретические способы регулирования его скорости были известны. Наибольшее распространение получили способы, связанные с формированием переменного регулируемого напряжения из постоянного. На сегодняшний день является актуальным выбор метода преобразования постоянного напряжения в переменное.

Из всех методов преобразования можно выделить два метода: с широтно-импульсной модуляцией и с векторной широтно-импульсной модуляцией. Использование данных методов позволяет добиться механических характеристик, аналогичных приводу постоянного тока с двигателем независимого возбуждения. Данные методы обеспечивают большой диапазон регулирования и высокую точность поддержания скорости.

**Самым распространенным является метод широтно-импульсной модуляции.** Наибольшее распространение получил тип преобразования с неуправляемым выпрямителем напряжения. При этом напряжение на входе инвертора остается постоянным, а получение необходимого напряжения на выходе инвертора реализуется методом ШИМ. Суть метода заключается в сравнении задающего напряжения с пилообразным и последующим формированием управляющих импульсов на силовые ключи. Вследствие пульсации напряжения в цепи питания возникают перенапряжения, для борьбы с которыми необходимо повышать класс изоляции обмоток машины.

**Второй метод: векторная широтно-импульсная модуляция (ВШИМ).** Данный метод нашел широкое применение после появления на рынке микроконтроллеров. Суть метода заключается в формировании вектора напряжения шестью базовыми векторами, которые позволяют поворачиваться вектору на угол  $60^\circ$ . Данный метод позволяет получить практически синусоидальное напряжение на выходе инвертора за счет формирования промежуточных векторов между базовыми векторами. Отношение модуля вектора напряжения на выходе инвертора к питающему напряжению равно  $0,577$ , при широтно-импульсной модуляции указанное

отношение равно 0,5. Следовательно, данный метод имеет неоспоримое преимущество с точки зрения энергосбережения перед ШИМ. Простота реализации на микроконтроллере является одним из преимуществ данного метода.

В целях подтверждения преимуществ ВШИМ перед ШИМ с точки зрения энергосбережения необходимо выполнение математического моделирования и реализации макета. Перед технической реализацией макета выполнено математическое моделирование в пакете *MathCAD*. Создание модели можно выполнить различными способами (в пакете Симулинк с помощью *m*-файла или др.).

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ КОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКОЙ БУРОВОГО СТАНКА 2СБШ-200Н

*ОСИПОВ П. А., ЕЛИСЕЕВ В. В.*

ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

Станок шарошечного бурения 2СБШ-200Н предназначен для бурения на открытых горных разработках взрывных скважин диаметром 215 мм и глубиной до 40 м. Компрессорная установка станка состоит из двух винтовых компрессоров 6ВВ-12/9 производительностью 24 м<sup>3</sup>/мин. и давлением 9 атм.

Пневматическая транспортировка буровой мелочи осуществляется воздействием потока сжатого воздуха на частицы разрушенной породы. Компенсация суммарного воздействия сил тяжести и восходящего потока обеспечивает витание частиц породы в воздушном потоке. Скорость витания частицы зависит от характеристик горной породы и характеризует скорость восходящего потока, компенсирующего силу тяжести частицы.

Скорость витания частицы породы плотностью 2,76 т/м<sup>3</sup> и диаметром 5 мм составляет 1025,28 м/мин. Количество воздуха, необходимое для витания частицы разрушенной породы, принимается за начальное количество воздуха  $Q_0=11,483$  м<sup>3</sup>/мин; подаваемое в скважину на начальной глубине бурения. В процессе проходки скважины величина потерь воздуха в трещинах увеличивается. Предполагаем, что на предельной глубине бурения 40 м для удаления частиц породы компрессорной установке необходимо работать с максимальной производительностью 24 м<sup>3</sup>/мин.

Зависимость производительности компрессора от глубины бурения (см. рис.), в предположении линейного возрастания потерь в скважине, описывается уравнением

$$Q = ((Q_{\max} - Q_0) \cdot h / h_{\max}) + Q_0 = (0,256 \cdot h + 13,78) \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Мощность электропривода винтового компрессора зависит от параметров работы: производительности и давления  $P_{\text{ЭП}} = 4,2 \cdot Q \cdot p_1 \cdot \lg(p_2/p_1) \cdot (n_K \cdot n_H)^{-1}$ . Полагаем, что давление на выходе винтового компрессора неизменно. Мощность электропривода зависит только от производительности компрессора.

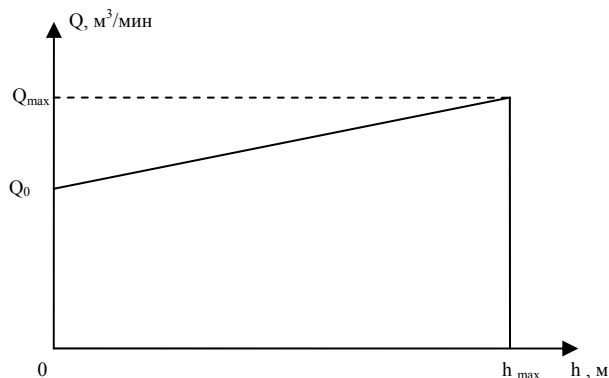


Рис. Зависимость производительности компрессора от глубины бурения

В настоящее время на станках 2СБШ-200Н электропривод компрессоров нерегулируемый, следовательно, мощность, потребляемая из сети компрессорной установкой, постоянна на протяжении проходки скважины.

Предлагается электропривод одного компрессора выполнить регулируемым по системе ПЧ-АД, используя установленный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 75 кВт. Регулируемый электропривод компрессора позволит варьировать подачу воздуха в забой скважины.

Расчет экономии электроэнергии выполнен по данным комбината ОАО "УралАсбест": годовая норма бурения 424500 п. м, годовой расход электроэнергии на буровые работы – 7872000 кВт, двухставочная система оплаты электроэнергии. Количество электроэнергии, сэкономленной при проходке одного погонного метра скважины, 1,008 кВтч, или 23 %.

Годовая экономия на отдельном станке составляет 197,106 тыс. руб без учета стоимости преобразователя.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ МОЩНЫХ ОДНОКОВШОВЫХ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

*МЕЖЕННЫЙ Е. В., КАРЯКИН А. Л.*

ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

В современной промышленности основными приводными механизмами служат электрические двигатели. Во всем мире в связи с достижениями во всех отраслях науки и техники, появлением высокоэффективной и надежной силовой электроники, увеличением надежности и производительности вычислительной техники и появлением новых технологий меняются требования, предъявляемые ко всем электроприводам без исключения. Требования к электроприводам – это, прежде всего, повышение надежности, снижение потребления электроэнергии, повышение производительности, снижение затрат на приобретение и эксплуатацию, снижение времени на обслуживание и ремонт приводов механизмов.

В отличие от общепромышленных электроприводов, к основным приводам техники горнодобывающей промышленности предъявляются более жесткие требования в связи с более сложными и экстремальными условиями эксплуатации. Среди этих условий – воздействие атмосферных явлений на механизмы, повышенная влажность и запыленность, наличие стопорных режимов, которые являются нормальными режимами для экскаваторов и буровых станков. Учитывая то, что добычная техника находится непосредственно на месте добычи полезных ископаемых, и принимая во внимание большие расстояния в горнодобывающей промышленности, необходимо также принимать во внимание тот фактор, что обслуживание и ремонт горнодобывающей техники приходится производить непосредственно на рабочем месте этой техники вдали от сервисных и ремонтных мастерских, в полевых условиях, все это увеличивает требования к надежности и простоте обслуживания.

Электроприводы основных механизмов одноковшовых карьерных экскаваторов (далее приводы) за весь срок эксплуатации данного вида техники, с начала своего появления по настоящее время, претерпевали большие изменения в конструкции и продолжают меняться. Основное направление изменения приводов экскаваторов – это, прежде всего, повышение надежности, во-вторых, повышение точности регулирования, в-третьих, снижение массогабаритных показателей – все это влечет за собой повышение производительности экскаваторов.

До настоящего времени в качестве регулируемого электропривода преобладал привод постоянного тока. В последние годы большое распространение получил привод переменного тока, основанный на асинхронном двигателе (АД). А в настоящее время, по результатам исследований и достижениям в области науки и техники, наиболее перспективным является применение электропривода на основе вентильно-индукторного двигателя (ВИД).

Основные преимущества данного типа электроприводов по сравнению с приводом на двигателе постоянного тока (ДПТ) – это, прежде всего, более простая и надежная конструкция, отсутствие щеточно-коллекторного механизма, отсутствие обмоток на роторе. Все это дает также и преимущества в массогабаритных показателях. Также ротор машины жесткий, прочный и допускает во много раз большие ускорения, чем ДПТ или асинхронный двигатель АД, что крайне важно при стопорениях "копающих" механизмов. Ротор ВИД, в отличие от якоря ДПТ или ротора АД, практически не греется, поскольку не имеет обмотки и вращается синхронно с полем статора. Тепло выделяется на статоре и его легче отводить (не надо продувать машину, как ДПТ или АД). В облегченном тепловом режиме работают и подшипники.

Двигатель может длительно работать в состоянии стопорения, в режиме электромагнитного тормоза, на низких скоростях при больших моментах, что очень важно для "копающих" механизмов. При установке соответствующих подшипников и балансировке ротора он допускает многократное ослабление поля, что важно для режимов, как опускание ковша экскаватора [2].

Также ЭП с АД с возможностью двухтонного регулирования скорости имеет самую сложную структуру управления. При этом сложные алгоритмы векторного управления АД усложняют микропроцессорные системы управления. По массогабаритным показателям АД превосходят ДПТ лишь на 10-15 % и уступают вентильным двигателям.

Также, принимая во внимание то, что ВИД способен работать во всем диапазоне скоростей от 0 до максимальной с постоянным моментом, то к большим плюсам данного типа приводов можно отнести возможность применения двигателя без редуктора, что значительно упростит механическую часть привода в целом.

По сути, ВИД – это мощный вариант шагового двигателя, управление которым можно осуществлять напрямую с цифровых устройств, при этом скорость двигателя зависит от возможностей силовых коммутационных ключей и ограничений по прочности, накладываемых на приводимые двигателем механизмы.

Наконец, ВИП имеет уникальную устойчивость к отказам отдельных элементов. Ни одна из традиционных электрических машин не может работать (по крайней мере, долго) с оборванной или закороченной фазой, поскольку в них существуют сильные магнитные связи между фазами статора, а

отклонения от кругового вращающегося магнитного поля вызывают резкую асимметрию и возрастание токов в работающих фазах. Отсутствие магнитной связи между фазами ВИП позволяет работать каждой фазе независимо от других. Отключение одной и даже нескольких фаз приводит только к пропорциональному снижению выходной мощности и возрастанию пульсаций момента, но сохраняет привод в рабочем состоянии. Потеря мощности частично может быть компенсирована за счет увеличения нагрузки на оставшиеся фазы, если имеется надлежащий запас по допустимым токам фаз и силовых ключей. Выход из строя одного из силовых транзисторов в плече типового инвертора вызывает "сквозное" короткое замыкание источника питания, защитой от которого может быть только отключение привода. Поскольку в ВИП используется несимметричная мостовая схема, в плечах которой включены транзистор и диод, при отказе любого из них токовая защита по току источника может заблокировать работу неисправной фазы через отключение оставшегося работоспособным ключа, а ВИП будет продолжать работать [1].

К недостаткам этих двигателей обычно относят невозможность работать без полупроводникового преобразователя, наличие пульсаций электромагнитного момента и, как следствие, повышенный шум и вибрация двигателя, а также более высокую стоимость полупроводникового преобразователя в электроприводе эквивалентной выходной мощности. Также для ВИД необходим датчик положения ротора, однако принципиально возможно создание систем бездатчикового управления, базирующихся на измерении ЭДС статорных обмоток и цифровом выделении сигнала текущего электрического положения ротора.

Что касается пульсаций электромагнитного момента, то эта проблема решается при применении более сложных алгоритмов управления двигателем, например, подачей импульсов на полюса статора не ступенчато, а последовательно, постепенно увеличивая ток в последующей по шагу обмотке и уменьшая ток в предыдущей.

Учитывая все достоинства вентильно-индукторного привода, можно сделать вывод, что этот привод как нельзя лучше всего подходит для основных приводов одноковшовых карьерных экскаваторов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вентильно-индукторный электропривод: современное состояние и перспективы развития // Журнал-справочник "Рынок Электротехники". – 2007 г. – № 2.
2. Электропривод экскаваторов: Доклады научно-практического семинара, 3 февр. 2004 г., Москва. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 112 с.
3. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И. Е. Овчинников: Курс лекций. – СПб.: КОРОНА-Век, 2006. – 336 с.: ил.

### ТИПОВЫЕ АЛГОРИТМЫ СТВОЛОВОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ КЛЕТЕВОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ ШАХТ И РУДНИКОВ

*ХАСАНОВ Д. Р., КАРЯКИН А. Л.*  
ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

На современном этапе развития систем управления горно-механическим оборудованием получили широкое применение системы управления на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК). Особое положение среди машин и механизмов шахтного оборудования занимают подъемные установки, что связано с их значимостью для производственной деятельности рудников и шахт. Основными требованиями, предъявляемыми к ним, являются безопасность и надежность работы в течение всего срока службы шахты. Применение ПЛК для автоматизации систем стволовой сигнализации клетевых подъемных установок шахт и рудников позволяет: повысить надежность функционирования клетевого подъема; снизить эксплуатационные затраты; обеспечить раннее обнаружение и диагностику неисправностей и предотвращение их опасного развития; получать обобщенные параметры работы технологического комплекса.

Задачами данной работы являются: во-первых, формализация процедуры синтеза программы системы стволовой сигнализации, во-вторых, выделение типовых функциональных звеньев, соответствующих необходимым технологическим операциям в системе управления стволовой сигнализацией для дальнейшего использования их в качестве основы при создании программ для аналогичных систем различных рудников и шахт.

В качестве объекта для выполнения работы был взят рудник Интернациональный. Основанием для разработки алгоритмов послужили: 1) Техническая документация на аппаратуру шахтной автоматики, стволовой сигнализации и связи ШАСС Микон, 2) Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом ПБ 03-553-03.

Для решения задачи синтеза выбран метод типовых узлов, так как он является универсальным и позволяет найти оптимальный вариант решения. Метод синтеза выполняет процедуры декомпозиции, то есть выделения в составе системы управления функциональных узлов, соответствующих необходимым технологическим операциям, составление математического описания этих операций, и композиции –

объединения описаний в единую систему управления. В качестве формализованного описания технологических операций был применен метод конечных автоматов. Такой подход к программированию называют "автоматным программированием", а процесс проектирования программ – "автоматным проектированием".

Предлагаемый вариант технологии характеризуется следующими основными особенностями. В общем случае автоматы рассматриваются не изолированно, а как составные части взаимосвязанной системы – системы взаимосвязанных автоматов, поведение которой формализуется с помощью системы взаимосвязанных графов переходов. На этапе анализа на основе технического задания выделяются сущности, каждая из которых называется автоматом. Автоматы взаимодействуют за счет обмена своими состояниями, вложенности и вызываемости. Они также могут быть одновременно вложенными и вызываемыми. Состояния автоматов в программе будут выражаться в качестве внутренних промежуточных переменных и содержаться в глобальных блоках данных. В качестве общей схемы проектируемого объекта строится схема взаимодействия автоматов, отражающая указанные типы взаимодействий. Она формализует систему взаимодействующих автоматов. Связь каждого автомата с его "окружением" формализуется схемой связей автомата, предназначенной для полного описания интерфейса автомата. В этой схеме приводятся источники и приемники информации, полное название всех воздействий и их обозначения, а также информация о том, в какие автоматы он вложен и какие автоматы вложены в него. Этап завершается построением графов переходов для каждого автомата, совокупность которых образует систему взаимосвязанных автоматов.

После завершения составления алгоритма ствольной сигнализации для клетового подъема описанным методом был осуществлен перевод его в аналитическую форму, т. е. в форму структурных формул алгебры логики. Данная процедура проводится для перехода от алгоритма к его реализации программным способом. Программа была написана на языке *Step 7* (инструментального пакета программирования ПЛК фирмы *Siemens*) в форме релейно-контакторной логики – *LAD*.

## ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА КОПАЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ ОДНОКОВШОВЫХ ЭКСКАВАТОРОВ С СИСТЕМОЙ ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ

*КОМЕЛЬСКИХ К. С., КАРЯКИН А. Л.*

ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

В системах автоматического регулирования электроприводов, наряду с регулированием скорости и положения рабочего органа, возникает необходимость регулирования усилия в исполнительных элементах и механических передачах рабочих машин. Одними из наиболее ярких представителей рассматриваемых систем являются одноковшовые экскаваторы. При работе копающих механизмов одноковшовых экскаваторов требуется высокоточное регулирование усилия в механических передачах, как в статических, так и динамических режимах работы, в диапазоне скоростей от нуля до максимальной. К данным электроприводам предъявляются следующие основные требования:

- Работа двигателя в длительном режиме при нулевых скоростях с потенциальным нагрузочным моментом;
- Высокое быстродействие, необходимое для активного демпфирования упругих колебаний в механической передаче.

Для обеспечения указанных требований необходимо с высокой точностью и быстродействием управлять электромагнитным моментом двигателя. Поэтому в основном используют электропривод постоянного тока. Но ряд общеизвестных недостатков, которыми обладают двигатели постоянного тока, приводят к снижению надежности системы управления.

Перспективным является использование электроприводов переменного тока с асинхронными двигателями, которые обладают высокими эксплуатационными характеристиками, а по динамическим показателям приближаются, а иногда и превосходят, к электроприводам постоянного тока.

В настоящее время наибольшее распространение получили два способа высококачественного управления моментом асинхронного двигателя:

1. Векторное управление.
2. Прямое управление моментом (*DTC*-управление).

Отличительной особенностью *DTC*-управления является предельное быстродействие управления моментом асинхронного двигателя без использования датчика скорости.

Системы *DTC* имеют ряд характерных признаков:

- наличие в системе релейных гистерезисных регуляторов магнитного потока статора и электромагнитного момента асинхронного двигателя;
- наличие в системе электронной модели двигателя для вычисления управляемых координат (потокосцепления статора двигателя, электромагнитного момента двигателя, а также частоты вращения ротора двигателя для бездатчиковых систем);



- наличие табличного (матричного) вычислителя оптимального вектора напряжения двигателя;
- наличие идентификатора фазового сектора, в котором в текущий момент времени находится вектор потокоцепления статора двигателя;
- отсутствие в явно выраженной форме регуляторов тока статора двигателя;
- отсутствие программной широтно-импульсной модуляции выходного напряжения преобразователя частоты.

На рис. показана функциональная схема системы DTC-управления, которая всегда содержит ряд типовых функциональных блоков. Каждый из функциональных блоков может быть реализован разными способами.

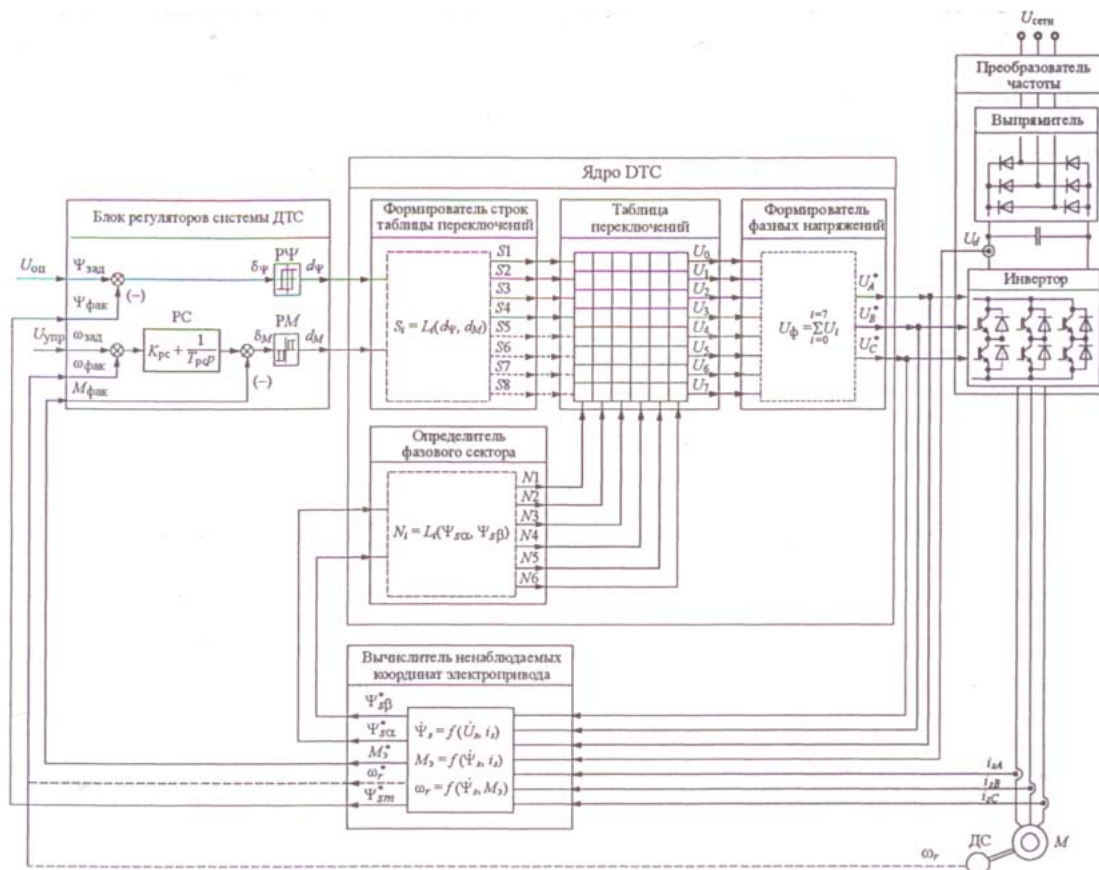


Рис. Функциональная схема системы прямого управления моментом

Основной поставленной задачей данной научной работы является такая малоизученная тема, как выбор параметра релейного регулятора момента.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО КОНВЕЙЕРА С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

КУЛТЫШЕВА Е. Н., КАРЯКИН А. Л.

ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

Разработка системы управления электроприводом для конвейеров, оборудованных несколькими электроприводами, особенно актуальна и сложна, что связано с необходимостью согласованного управления электроприводом.

В системе с многодвигательными электроприводами, взаимосвязанными конвейерной лентой, возможно согласованное управление скоростью или моментом электродвигателей.

Выбор структуры и параметров системы управления определяются механической частью электропривода.

Механизм конвейеров отличается следующими особенностями:

- наличием упругого элемента – конвейерной ленты;
- возможностью протекания волновых процессов, связанных с распределением деформации по длине, при большой длине конвейерной ленты.

Возмущение какого-либо сечения ленты представляет волновой процесс и приводит к распространению этого возмущения вдоль ленты с определенной скоростью. Скорость распространения упругой волны в ленте является одной из основных характеристик динамического процесса и во многом определяет амплитуды динамических нагрузок.

Динамические процессы в ленточных конвейерах характеризуются появлением динамических натяжений, которые, алгебраически суммируясь со статическими, значительно увеличивают результирующие натяжения в конвейерной ленте и усилия в элементах конвейера.

Известно, что выбор степени детализации математического описания зависит от решаемой задачи.

Выбор структуры и параметров системы управления выполнен для двухмассовой модели механической части конвейера, а проверка полученных результатов выполнена на математической модели, учитывающей распределенный характер параметров ленты конвейера.

Приведены результаты компьютерного моделирования в системе *SIMULINK*, входящей в пакет прикладных программ *MATLAB*.

## РАСЧЕТ СДВИГОВ ФАЗ ВХОДНЫХ ТОКОВ ИНВЕРТОРНЫХ ЯЧЕЕК ВЫСОКОВОЛЬТНОГО МНОГОУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

ОСИПОВ П. А., ЗАЙЦЕВ П. П.

ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

Многоуровневый преобразователь частоты состоит из изолированных элементарных инверторных ячеек, питаемых от гальванически развязанных источников трехфазного напряжения (рис. 1). Элементарная ячейка – независимый источник переменного управляемого напряжения, работающий в режиме ШИМ, состоящий из трехфазного мостового управляемого выпрямителя и мостового инвертора напряжения (рис. 2).

Рис. 1. Структурная схема высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты

Естественная коммутация вентилях мостового выпрямителя ячейки вызывает моменты бестоковых пауз и провалы вершин синусоид тока в фазах обмотки низшего напряжения трансформатора (рис. 3). Синфазные не синусоидальные токи инверторных ячеек создают синфазные пульсации токов вторичных обмоток входного трансформатора.

Многоуровневый преобразователь частоты вызывает пульсации тока сети, дополнительные потери мощности в электрооборудовании предприятия и работает с низким КПД.

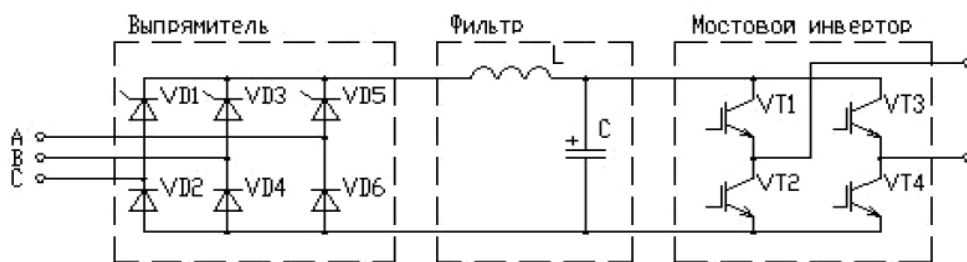
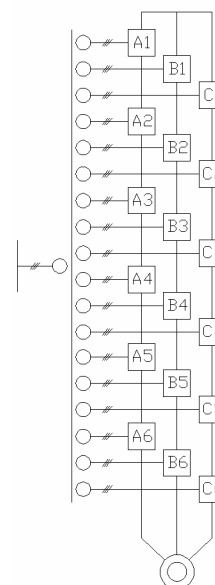


Рис. 2. Инверторная ячейка



Обмотки низшего напряжения входного трансформатора соединяются в трехфазный зигзаг (рис. 4). Соотношение витков обмоток трехфазного зигзага  $W'/W''$  определяет сдвиг фаз выходного тока относительно тока сети. Фазовый сдвиг между ячейкой фазы выходного напряжения преобразователя с наименьшим и наибольшим сдвигом не должен быть больше длительности бестоковой паузы  $\varphi^{\max} - \varphi^{\min} \leq \tau_{б.п.}$ , и суммарный входной ток ячеек фазы выходного напряжения преобразователя должен иметь квазисинусоидальную форму кривой.

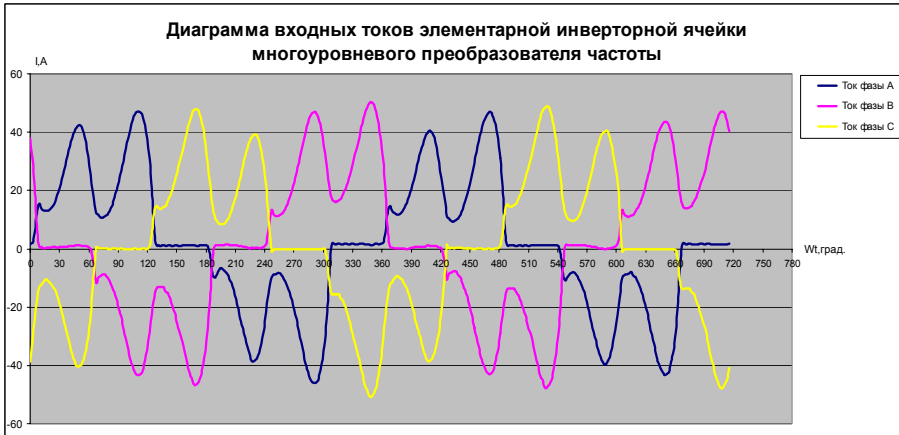


Рис. 3. Форма входных токов инверторной ячейки

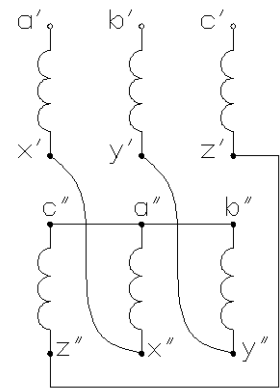


Рис. 4. Схема соединения обмоток низшего напряжения

Полученные сдвиги фаз входных токов ячеек группы относительно базисной характеристики (рис. 5) при промышленной частоте сети; числе ячеек многоуровневого преобразователя частоты, равном 18; числе фаз выходного напряжения преобразователя, равном 3, и длительности бестоковой паузы в  $60^\circ$ :  $-5^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $-25^\circ$ ,  $+5^\circ$ ,  $+15^\circ$ ,  $+25^\circ$ .

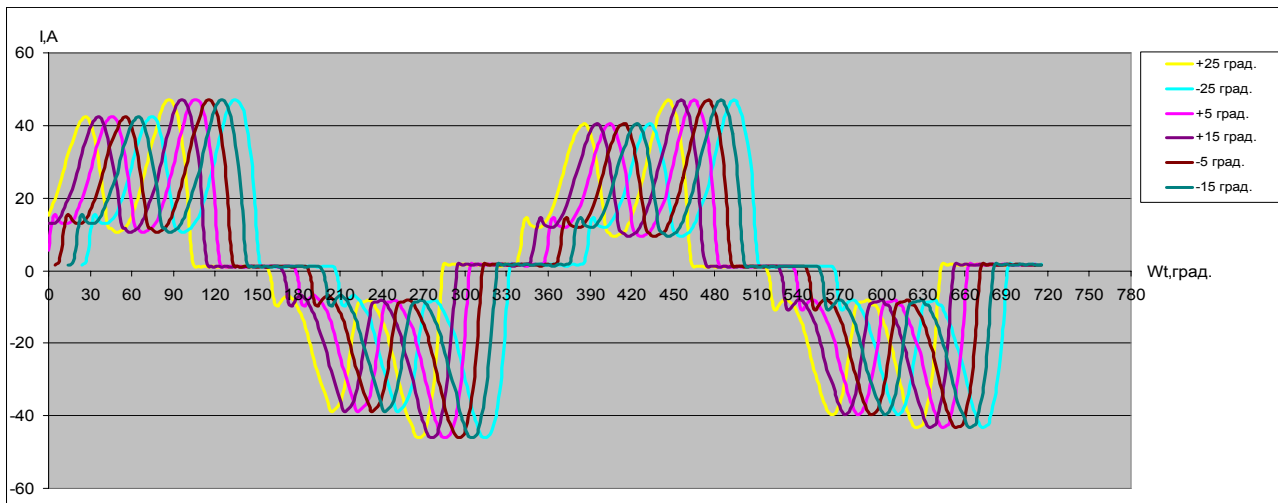


Рис. 5. Диаграмма модулированных входных токов фазы А инверторных ячеек фазы выходного напряжения

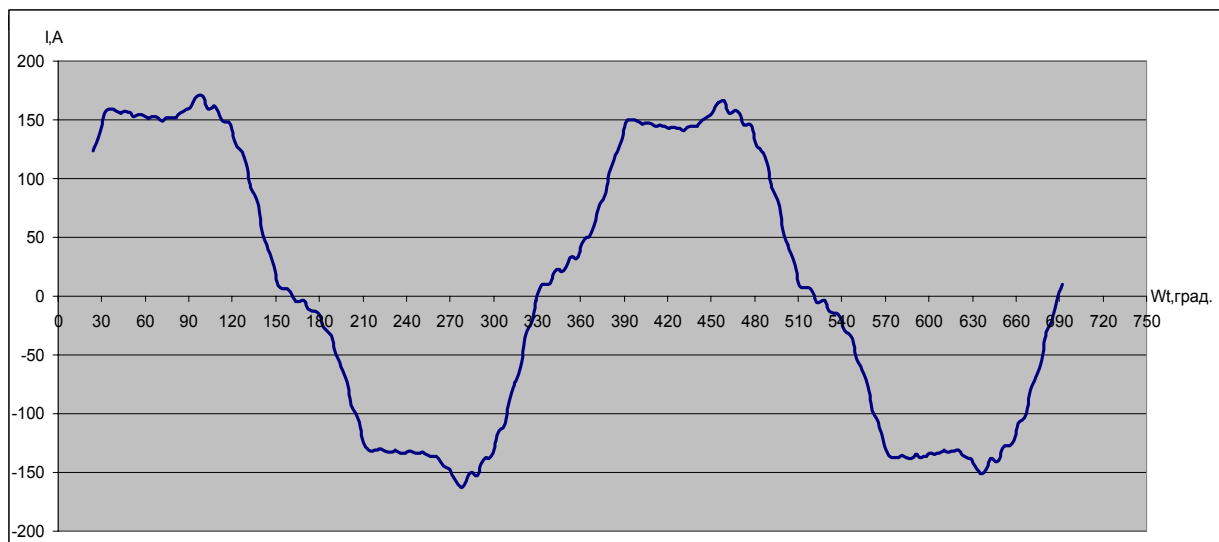


Рис. 6. Суммарный ток обмоток низшего напряжения фазы А входного силового трансформатора

Кривая суммарного фазного тока обмоток низшего напряжения входного трансформатора имеет синусоидальную форму, т. е. входной трансформатор работает в нормальном режиме работы с симметричной нагрузкой фаз, устранены искажения тока сети и увеличен КПД преобразователя.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНО РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА ДЛЯ КОМПРЕССОРОВ

ФЕДОТОВ И. В.

ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

Давление сжатого воздуха в сети воздухопроводов зависит от расхода воздуха и производительности компрессорной установки. Если производительность меньше расхода воздуха, то давление в сети снижается до тех пор, пока производительность не будет равняться расходу воздуха; если производительность больше расхода воздуха, то в сети воздухопроводов будет увеличиваться давление сверх допустимого.

Для предохранения компрессорных машин и вспомогательного оборудования от повышения давления сверх нормального необходимо регулировать подачу воздуха в сеть так, чтобы при изменении производительности компрессора в сети сохранялось постоянное рабочее давление.

Наибольшее распространение в компрессорных установках получили следующие способы регулирования: регулирование открытием всасывающих клапанов; регулирование изменением мертвого пространства путем присоединения к полости цилиндра дополнительных камер; регулирование поочередной остановкой или пуском работающих компрессоров; регулирование выпуском лишнего воздуха в атмосферу.

Все они, независимо от принципа действия компрессоров (объемного или динамического) реализуются при постоянной скорости вращения электропривода компрессоров.

Наиболее современным способом регулирования компрессоров является регулирование с помощью преобразователя частоты электропривода. В мировой практике частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) признан одной из наиболее эффективных энергосберегающих и ресурсосберегающих, экологически чистых технологий. Преобразователь частоты – это электронное устройство, позволяющее плавно менять частоту вращения  $n$  приводного двигателя компрессора, а значит и действительную производительность компрессора  $V_d$ .

Исторически сложилось, что для регулирования скорости вращения чаще использовали двигатель постоянного тока. Преобразователь в данном случае регулировал только напряжением, был прост и дешев. Однако двигатели постоянного тока имеют сложную конструкцию, критичный в эксплуатации щеточный аппарат и сравнительно дороги.

Асинхронные двигатели широко распространены, надежны, имеют относительно невысокую стоимость, хорошие эксплуатационные качества, но регуляторы скорости их вращения из-за сложности систем электронного регулирования частоты питающего напряжения стоили до начала 80-х годов дорого и не обладали качествами, необходимыми для широкого внедрения в индустрию. Быстрый рост рынка преобразователей частоты для асинхронных двигателей не в последнюю очередь стал возможен в связи с появлением новой элементной базы – силовых модулей на базе *IGBT* (биполярный транзистор с изолированным затвором), рассчитанный на токи до нескольких килоампер, напряжением до нескольких киловольт и имеющих частоту коммутации 30 кГц и выше.

Преобразователь частоты обеспечивает реализацию компрессором функции поддержания давления в пневмосети независимо от расхода сжатого воздуха пневмоприемниками.

Наибольшую эффективность частотно-регулируемый привод компрессора дает там, где до этого применялись способы регулирования, основанные на переводе компрессора на холостой ход, мощность потребления которого достигает 25-30 % от номинальной мощности двигателя. Учитывая довольно высокую стоимость преобразователя частоты регулируемого электропривода (150-250 \$ за 1 кВт мощности) по большей части зарубежного производства, внедрение ЧРП компрессоров носит единичный характер. Тем не менее, первый опыт внедрения ЧРП для поршневых компрессоров реализован на шахте "Черемуховская" ОАО "СУБР". На компрессор № 3 - 4BM10-120/9 в марте 2005 г. установлен преобразователь частоты фирмы *Perfect Harmony*.

О том, как влияет ЧРП на давление в пневмосети и общую работу всей компрессорной станции шахты, можно сделать вывод, исходя из графика (рис.), где представлена зависимость частоты вращения двигателя от давления воздуха в пневмосети. Четко просматривается обратная зависимость между давлением сжатого воздуха и частотой вращения: увеличение давления в пневмосети приводит автоматически к снижению скорости вращения двигателя и наоборот – снижение давления сжатого воздуха в пневмосети вызывает автоматически увеличение скорости приводного двигателя компрессора.

Кроме этого потребляемая мощность приводного двигателя с преобразователем частоты, по сравнению с таким же двигателем без регулирования, уменьшается в среднем на 15-16 кВт, что примерно составляет экономию при рабочем нормальном режиме 3-5 %.



Рис. Зависимость частоты вращения двигателя от давления воздуха в пневмосети

Таким образом, применение ЧРП для компрессоров (наработка данного оппозитного компрессора составила с марта по ноябрь 2005 г. > 6040 часов) обеспечивает поддержку стабильного давления в пневмосети независимо от расхода сжатого воздуха пневмопотребителями за счет изменения частоты вращения электродвигателя компрессора. Наряду с этим применение преобразователя частоты позволяет оптимизировать работу приводных электродвигателей, снижая непроизводительное потребление электроэнергии и, кроме того, повышает ресурс самого оборудования

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миняев Ю. Н. Энергосбережение при производстве и распределении сжатого воздуха на промышленных предприятиях. – Екатеринбург: 2006. – С. 40-49.
2. [www.barrens.ru](http://www.barrens.ru) Энергосберегающие компрессорные технологии / Электронная публикация.

### ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ГОРНОЙ МАССЫ НА КАРЬЕРЕ "МУРУНТАУ" И ПУТИ ЕЕ СНИЖЕНИЯ

САПАРОВ М. А.

ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

Карьер Мурунтау является крупнейшим золотодобывающим предприятием Республики Узбекистан. Вся горная масса перевозится карьерными автосамосвалами либо в комбинации с ленточными конвейерами (ЦПТ).

Первыми технологическими транспортными средствами карьера Мурунтау были автосамосвалы КраЗ-256 (1967 г.), на смену им практически сразу же пришли сначала автосамосвалы БелАЗ-540 (1967 г.), затем БелАЗ-548 (1972 г.), которых в 1978 г. было уже 410 ед., а в 1993 г. были внедрены первые 10 машин *Euklid R-170* и начаты испытания самосвала *HD-1200* фирмы "*Komatsu*". В 1994 г. приобретены еще 10 машин *R-170*. Автосамосвалы *Cat-785B* были поставлены в 1994 г. – 22 ед., в 1995 г. – 21 ед., а в 1996 г. – 6 ед.

Количественные изменения в парке автосамосвалов не могли компенсировать роста себестоимости, связанного с увеличением глубины горных работ, поэтому логическим продолжением эволюции технологического транспорта карьера явилось внедрение комплекса ЦПТ, предназначенного, согласно проекту, для транспортирования пород вскрыши.

Поточное звено комплекса ЦПТ карьера Мурунтау состоит из двух конвейерных линий (ширина ленты 2 м), каждая из которых включает по два наклонных, одному передаточному, магистральному и отвальному конвейеру. Наклонные конвейеры ( $\alpha = 15^\circ$ ) расположены в одной траншее. Общая длина конвейерной линии № 1 составляет 3375 м, линии № 2 – 5385 м. Проектная производительность каждой линии – 12,8 млн. м<sup>3</sup>/год, а комплекса в целом – 25,6 млн. м<sup>3</sup>/год (плотность пород 2,6 т/м<sup>3</sup>).

Технологический транспорт карьера ориентирован на дальнейшее развитие циклично-поточной технологии, в том числе с использованием крутонаклонных ( $\alpha = 38^\circ$ ) конвейеров. При этом на северо-восточном борту карьера предусматривается строительство:

- конвейерной линии № 3 производительностью 10 млн. м<sup>3</sup>/год (26 млн. т) для транспортирования вскрышных пород (вертикальная высота подъема 180 м);
- конвейерной линии № 4 производительностью 5,4 млн. м<sup>3</sup>/год (14 млн. т) для транспортирования руды (вертикальная высота подъема 270 м) [1].

Общепринятым показателем энергопотребления горных предприятий является удельный расход электроэнергии на 1 т горной массы, составляющий в глубоком карьере Мурунтау 1,33 кВт·ч (табл. 1).

Таблица 1

**Структура электропотребления в карьере Мурунтау**

Технологический процесс	Удельный расход электроэнергии	
	кВт·ч/т	%
Бурение	0,11	8,3
Экскавация	0,20	15,0
Комплекс ЦПТ	0,78	58,6
Сгрузка руды	0,11	8,3
Вспомогательные процессы	0,13	9,8
Всего по карьере	1,33	100

На карьерах с цикличной технологией наиболее энергоемкими являются процессы транспортирования горной массы электрифицированным железнодорожным транспортом, а также дробление и транспортирование горной массы конвейерными линиями ЦПТ.

Внедрение схем циклично-поточной технологии влечет за собой структурные и количественные изменения в формировании электрических нагрузок карьеров. Доля электропотребления комплексами ЦПТ в общем расходе электроэнергии по карьере изменяется от 15,5 % (ЮГОК) до 40,9 % (ИнГОК).

Энергия дизельного топлива является вторым по значимости видом энергии, используемой в горнорудном производстве. Основной расход дизельного топлива (около 95 %) связан с транспортированием горной массы.

Потребление дизтоплива на карьерном автотранспорте в карьере Мурунтау представлено в табл. 2.

Таблица 2

**Расход дизтоплива технологическим автотранспортом на карьере Мурунтау**

Показатель	2007 г.
Объем перевозок, млн. т	76,736
Грузооборот, млн. км	253,165
Среднее расстояние транспортирования, км	3,3
Расход дизтоплива, тыс. т	22,7
Удельный расход дизтоплива, г/ткм	104
Коэффициент использования парка, %	45,7

Общепринятым показателем энергопотребления карьерных автосамосвалов является удельный расход дизтоплива на единицу грузооборота (г/ткм) или на 1 т перевезенной горной массы (г/т). Он определяется факторами, которые можно разделить на две основные группы.

1. Горнотехнические и организационные условия эксплуатации автосамосвалов, включающие: расстояние транспортирования, высоту подъема горной массы, руководящий и средневзвешенный уклоны автодорог, состояние и транспортно-эксплуатационные качества дорожного покрытия, продолжительность погрузо-разгрузочных и маневровых операций в транспортном цикле, коэффициенты использования пробега, грузоподъемности и др.

2. Конструктивные параметры, включающие: удельную мощность, коэффициент тары, коэффициент полезного действия трансмиссии, удельный расход топлива при номинальной нагрузке двигателя и др. [2].

Среди технологических факторов сокращения расхода дизельного топлива в транспортных системах карьеров особое внимание должно уделяться поддержанию объемов и расстояний автоперевозок на минимальном технологически необходимом уровне, а также перераспределению части объемов со сборочного на магистральные транспорта (конвейерный), характеризующиеся более высокими показателями энергетической эффективности. Это обеспечивается внедрением мобильных комплексов ЦПТ, крутонаклонных конвейеров.

Существенной мерой снижения энергопотребления комплексов ЦПТ является повышение их загрузки путем координации работы смежных транспортных звеньев. Для конвейеров такое же повышение производительности приводит к сокращению расхода электроэнергии на 20-30 % [3].

Главным направлением совершенствования процесса перемещения горной массы является изыскание технологических решений, обеспечивающих сокращение расстояния транспортирования и энергозатрат на его осуществление. В этих условиях необходима реконструкция поточного звена ЦПТ IV очереди карьера, позволяющая снизить себестоимость транспортирования горной массы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

3. Мариев П. Л., Кулешов А. А., Егоров А. Н., Зырянов И. В. Карьерный автотранспорт стран СНГ в XXI веке. – СПб.: Наука, 2006. – 387 с.
4. Тангаев И. А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. – М.: Недра, 1986. – 231 с.
5. Смирнов В. П., Лель Ю. И. Теория карьерного большегрузного автотранспорта. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 355 с.

### ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ РАСПРЕДЕЛЕНИИ СЖАТОГО ВОЗДУХА РУДНИЧНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВОК

*УГОЛЬНИКОВ А. В.*

ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

Сжатый воздух является одним из основных видов энергии на шахтах и рудниках для приведения в действие бурильных, буросбоекных, добычных, проходческих и погрузочных машин, вентиляторов местного проветривания, насосов, а также в эрлифтных установках при откачке воды и пульпы.

Кроме того, сжатый воздух находит применение для пневмозакладки горных выработок, для приведения в действие толкателей, стопоров, затворов и других устройств технологического комплекса предприятия.

Рудничные компрессорные установки являются энергоемким оборудованием. Их удельный вес в электропотреблении горных предприятий с подземным способом добычи полезного ископаемого составляет значительную долю, особенно для рудных шахт.

Такое широкое применение пневматической энергии обусловлено высокой степенью безопасности пневматического оборудования, что особенно важно для шахт, опасных по газу или пыли, где применение электрической энергии при подземной разработке ископаемых является опасным при внезапных выбросах угля и газа.

Транспортирование сжатого воздуха от компрессорной станции до пневмоприемников осуществляется по воздухопроводным сетям или пневмосетям.

В настоящее время именно пневматические сети являются обычно местом наибольших потерь энергии при эксплуатации компрессорных установок, поэтому правильное проектирование и особенно грамотная эксплуатация пневмосетей – неременное условие эффективности работы всего пневмохозяйства промышленного предприятия.

Различают три вида потерь энергии в пневмосетях:

- тепловые, связанные с охлаждением воздуха, протекающего по пневмосети;
- гидравлические, связанные с преодолением различного рода сопротивлений при движении сжатого воздуха по пневмосети;
- объемные, связанные с утечками, обусловленными негерметичностью пневмосетей.

**Децентрализация при снабжении пневматической энергией шахтных потребителей сжатого воздуха.** Традиционная схема обеспечения сжатым воздухом всех шахтных пневмоприемников предполагает устройство централизованной компрессорной станции, расположенной на дневной поверхности, как правило, не слишком далеко от ствола шахты.

При этом она оборудована стационарными, в основном, поршневыми и центробежными компрессорами с большой производительностью, эксплуатация которых требует постоянного наблюдения и обслуживания.

Шахтная пневматическая сеть является соединительным звеном между компрессорной станцией, вырабатывающей сжатый воздух, и горными машинами и механизмами с пневмоприводом – потребителями

сжатого воздуха. На шахтах, где широко используется пневматическая энергия для приводов забойных и проходческих машин, общая протяженность сети может достигать десятков километров. Вследствие динамики горных работ происходит изменение топологии пневмосети и длины ее отдельных участков во времени. Прокладываемый по горным выработкам трубопровод сжатого воздуха эксплуатируется в неблагоприятных условиях, характеризующихся высокой влажностью окружающего воздуха, вызывающей высокую коррозию труб, а также возможность деформации крепи выработок, на которой монтируются трубы, приводящей к нарушению герметичности их соединений. Кроме того, реальные условия монтажа труб в горных выработках не всегда позволяют выдержать уклон трубопровода, необходимый для сбора конденсата в местах установки водоотделителей.

Все это приводит к тому, что именно пневматические сети являются местом наибольших потерь энергии при эксплуатации шахтных пневмоустановок. Устранение этих потерь может быть осуществлено децентрализацией при снабжении пневматической энергией шахтных потребителей сжатого воздуха.

Для реализации этого предложения были приняты винтовые компрессоры маслозаполненного типа, которые в настоящее время являются наиболее надежными и экономичными при производстве сжатого воздуха. Но применение винтовых компрессоров в подземных условиях потребовало провести целый ряд организационно-технических мероприятий.

Рассмотрев материалы экспертизы промышленной безопасности и акт эксплуатационных испытаний винтовых компрессоров, Госгортехнадзор России выдал разрешение на применение винтовых воздушных компрессоров 6ВВ-25/9 и 6ВВ-32/7, изготавливаемых ОАО "Казанькомпрессормаш", в подземных условиях шахт ОАО "СУБР", при этом камеры для размещения компрессоров должны быть оборудованы вентилятором местного проветривания, включение которого должно предшествовать включению компрессоров.

С учетом вышеуказанного замечания, два винтовых компрессора 6ВВ-32/7 эксплуатируются уже в течение года на шахте 14-14 бис, гор. – 740 м ОАО "СУБР". Поскольку эти компрессоры установлены вблизи шахтных пневмоприемников, практически отсутствуют гидравлические и объемные потери энергии при транспортировании сжатого воздуха, составляющие до 40 % при централизованном воздухомоснабжении.

**Гидропневматические аккумуляторы (ГПА) сжатого воздуха.** ГПА позволяют значительно уменьшить расход электрической энергии на выработку сжатого воздуха в условиях рудников и шахт.

ГПА представляют собой две горные выработки (камеры), расположенные на различных горизонтах. В пневмокамере (нижняя) устанавливается герметичная перемычка. Пневмокамера предназначена для вмещения и хранения в течение определенного времени сжатого воздуха, находящегося под постоянным давлением. Во время расхода сжатого воздуха постоянное давление в пневмокамере поддерживается поступающей в нее из гидрокамеры водой по соединительному трубопроводу или скважине.

Назначение ГПА – компенсация неравномерности потребления сжатого воздуха шахтными механизмами, для чего в аккумуляторах создается запас сжатого воздуха, расходуемый потребляющими агрегатами в часы пик или кратковременной остановки компрессоров. ГПА выполняет также роль автоматического регулятора электрической нагрузки шахт, для чего требуется строить такие камеры, вместимость которых обеспечивает отключение компрессоров в периоды утреннего и вечернего максимума электрической нагрузки энергосистемы.

Внедрение предлагаемых разработок приведет к существенному энергосбережению действующих компрессорных установок ОАО "Севералюбокситруда".

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миняев Ю. Н. Энергетическое обследование пневмохозяйства промышленных предприятий. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. – 131 с.
2. Миняев Ю. Н. Энергосбережение при производстве и распределении сжатого воздуха на промышленных предприятиях. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2002. – 131 с.

#### ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НАБЛЮДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

*ШИМКОВ А. В., КАРЯКИН А. Л.*

ГОУ ВПО "Уральский государственный горный университет"

В ряде случаев необходимо использовать обратную связь по переменной, непосредственное измерение которой невозможно или технически затруднено. За счет этого может существенно улучшиться качество управления объектом. Отсюда возникает задача искусственного воспроизведения этих переменных или, как говорят, восстановления с помощью наблюдающих устройств (наблюдателей). В частности, существуют проблемы с нахождением потокосцепления двигателя переменного тока.



Эти переменные труднодоступны измерению с помощью датчиков, которые являются достаточно дорогими и технически сложными устройствами. Поэтому можно применить косвенный способ измерения с помощью наблюдателя.

Принцип работы наблюдателя строится на том, что между неизмеряемыми и измеряемыми переменными существует взаимосвязь, т. е. изменение неизмеряемых координат приводит к изменению координат измеряемых. Эта взаимосвязь основана на математических уравнениях, описывающих модель электродвигателя.

Сам наблюдатель строится на основе известных структуры и параметров линейного объекта. Допустим, объект описывается матричными уравнениями:

$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

$$y = Cx,$$

где  $A$  –  $(n \times n)$  – матрица коэффициентов;  $B$  –  $(n \times m)$  – матрица управления;  $C$  –  $(r \times n)$  – матрица выходного сигнала.

Для того чтобы наблюдатель соответствовал объекту управления, т. е. переходные процессы в нем соответствовали переходным процессам в объекте, он должен описываться уравнением:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu,$$

где  $\hat{x}$  – восстановленный вектор состояний (его оценка).

Вектор ошибки восстановления измеряемых переменных  $\tilde{y} = \hat{y} - y$  размерности  $r$  вводится на входы наблюдателя через матрицу коэффициентов наблюдателя  $K$  ( $m \times n$ ) (рис., а).

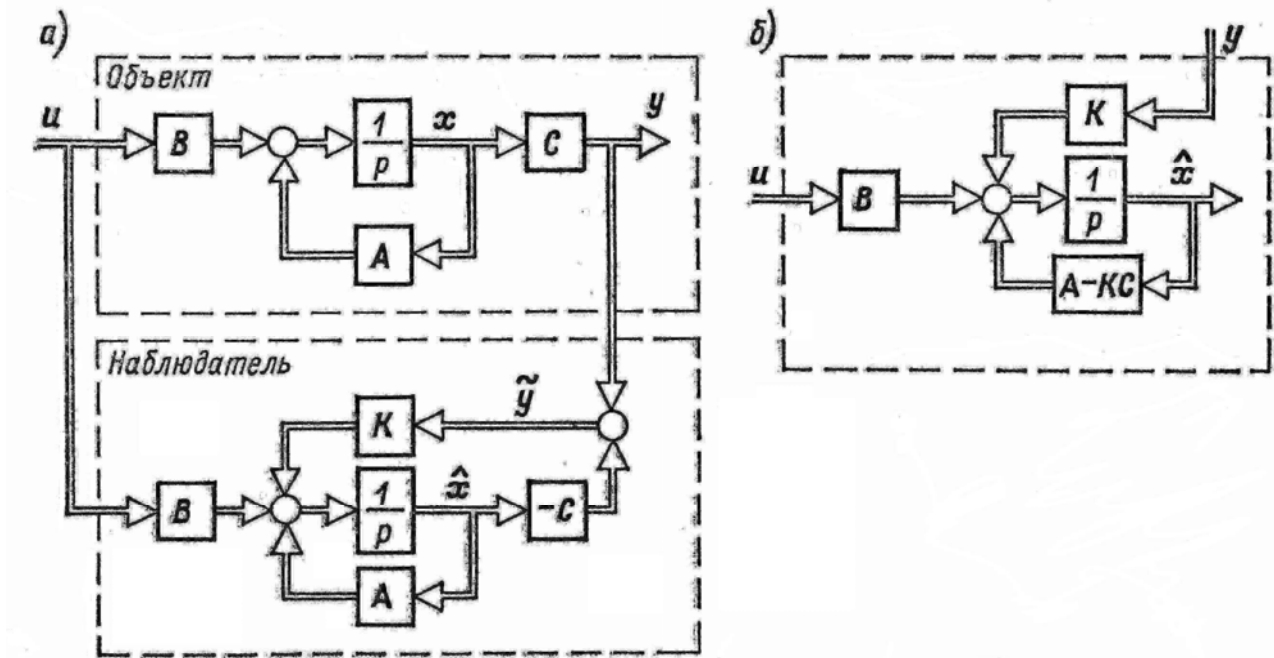


Рис. Структурная схема наблюдателя

Чтобы рассматривать наблюдатель как замкнутую систему необходимо данную структуру преобразовать к виду, представленному на рис. 1, б. На основании матричной структурной схемы можно записать:

$$p\hat{x} = (A - KC)\hat{x} + Bu + Ky,$$

или

$$[pI - (A - KC)]\hat{x} = Bu + Ky,$$

где  $I$  — единичная матрица.

Переходный процесс в системе будет определяться видом характеристического уравнения, как следствие, значениям элементов матрицы  $K$ , т. е.:

$$\det[(pI - (A - KC))\hat{x}] = 0.$$

Выбор корней характеристического уравнения основан на использовании одной из многочисленных стандартных форм. Две наиболее распространенные из них:

1) биномиальная форма, когда при порядке системы, равном  $n$ , предлагается записывать полином  $H(p)$  в виде:

$$H(p)=(p+\omega_0)^n,$$

где  $\omega_0$  – собственная частота наблюдателя (выбирается из расчета, чтобы быстродействие наблюдателя было несколько выше быстродействия системы, замкнутой через наблюдатель);

2) форма Баттерворта, при которой  $H(p)$ , в зависимости от порядка системы, выбирается в виде:

$$p+\omega_0,$$

$$p^2 + 1,4\omega_0 p + \omega_0^2,$$

$$p^3 + 2,0\omega_0 p^2 + 2,0\omega_0^2 p + \omega_0^3,$$

... и т. д.

Таким образом, синтез наблюдателя сводится к определению характеристического уравнения, выбору одной из стандартных форм распределения корней этого уравнения. Приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях оператора  $p$ , можно определить требуемые значения коэффициентов связей наблюдателя, являющихся элементами матрицы  $K$ .