

УДК 621.31

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАШИН И УСТАНОВОК ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Мелентьева И.А., Немчинов Р.А., Егоров А.Н.

Политехнический институт, филиал Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, Мирный, e-mail: kafeiagp@rambler.ru

Приведен сравнительный анализ современных систем автоматизированного электропривода, используемых для машин и установок горного производства. Описаны области применения систем электропривода, перечислены машины и установки горного производства, нуждающиеся в регулировании их режимов работы. Сформулированы основные требования, которым должны отвечать электроприводы как переменного, так и постоянного тока, выполненные на базе современной силовой преобразовательной техники. К рассмотрению были приняты системы: асинхронный вентильный каскад, электропривод с непосредственным преобразователем частоты, электропривод с преобразователем частоты и автономным инвертором напряжения, электропривод с преобразователем частоты и автономным инвертором тока, электропривод на базе вентильного двигателя. Представлены преимущества и недостатки описанных систем, приведены принципиальные электрические схемы систем электроприводов. Сделано заключение о выборе оптимальных систем для электропривода машин и установок горного производства.

Ключевые слова: система электропривода, автоматизированный электропривод, горное производство, принципиальная схема, выпрямитель, инвертор, электродвигатель

ANALYSIS OF CONTEMPORARY SYSTEMS OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE OF MACHINES AND INSTALLATIONS OF MINING INDUSTRY

Melenteva I.A., Nemchinov R.A., Egorov A.N.

Polytechnic institute, branch of North-Eastern Federal University n.a. M.K. Ammosov, Mirny, e-mail: kafeiagp@rambler.ru

A comparative analysis of modern systems of automated electric drive used for machines and installations of mining industry is given. The areas of application of electric drive systems are described, the machines and installations of mining industry that need to regulate their operating modes are listed. The main requirements are formulated, which must be met by electric drives of both AC and DC, made on the basis of modern power conversion technology. The following systems were accepted for consideration: an asynchronous valve cascade, an electric drive with a direct frequency converter, an electric drive with a frequency converter and an autonomous voltage inverter, an electric drive with a frequency converter and an independent current inverter, an electric drive based on a valve motor. The advantages and disadvantages of the described systems are presented, the basic electrical diagrams of electric drive systems are given. The conclusion is made about the choice of optimal systems for the electric drive of machines and installations of mining industry.

Keywords: electric drive system, automated electric drive, mining industry, circuit diagram, rectifier, inverter, electric motor

Современный автоматизированный электропривод представляет собой сложную электромеханическую систему, предназначенную для приведения в движение рабочего органа машины и управления её технологическим процессом. Он состоит из трёх частей: электрического двигателя, осуществляющего электромеханическое преобразование энергии, механической части, передающей механическую энергию рабочему органу машины, и системы управления, обеспечивающей оптимальное по тем или иным критериям управление технологическим процессом [1]. Диапазон изменения номинальных частот вращения электропривода имеет весьма широкие пределы. Использование средств дискретной техники в системах управления приводами постоянно тока расширяет диапазон регу-

лирования скорости до 1000–1500:1 и выше [2].

Области применения. В технологии горного производства используется ряд горных машин, главные рабочие механизмы которых оснащены регулируемым электроприводом. Они выполняют основные функции – разрушение и перемещение горной породы, транспортировка горной массы, перемещения жидкой и воздушной среды. К ним относятся добычные [3] и буровые машины, конвейерные [4] и подъемные установки [5–6], насосные и вентиляторные установки [7–8]. Оснащение комбайнов и стругов регулируемым электроприводом обусловлено определенными трудностями в связи с тем, что электрооборудование при этом должно быть выполнено в большинстве случаев во взрывобезопасном исполнении [9].

В каждом конкретном случае требуется технико-экономическое обоснование по использованию регулируемого электропривода, так как средства регулирования, в том числе и преобразовательная техника, имеют высокие стоимостные показатели [10–11]. Требования к характеристикам надежности, безопасности, экономичности, к статическим и динамическим характеристикам электроприводов машин и установок горного производства зависят от специфики технологического процесса, особенностей конструкции, способа управления машинами и механизмами, условий электроснабжения и эксплуатации. Этим требованиям должны отвечать электроприводы как переменного, так и постоянного тока, выполненные на базе современной силовой преобразовательной техники [12–13]. Их можно сформулировать следующими основными пунктами:

- электрическое оборудование машин и установок горного производства должно быть надежным, безопасным и экономичным в эксплуатации [14–16];
- электропривод должен обладать высокими перегрузочными способностями и возможностью большого диапазона регулирования скорости;
- электропривод должен обеспечивать минимальное время переходных процессов для механизмов с интенсивным повторно-кратковременным режимом работы при со-

ответствующих ограничениях на момент, ускорение и рывок;

- электропривод должен иметь высокую жесткость механической характеристики;
- электропривод должен сохранять работоспособность при глубоких просадках напряжения, характерных для карьерных и шахтных электрических сетей [17].

Описание систем электропривода. Для электропривода переменного тока одной из наиболее экономичных и относительно простых систем является схема асинхронного вентильного каскада (АВК). Принципиальная электрическая схема электропривода с АВК приведена на рис. 1.

Электропривод при такой системе содержит в роторной цепи асинхронного двигателя с фазным ротором неуправляемый выпрямитель на диодах, собранный по мостовой трехфазной схеме. В выпрямленную роторную цепь постоянного тока включается ведомый сетью инвертор на тиристорах, собранный по мостовой трехфазной схеме. Ведомый сетью инвертор позволяет генерировать энергию скольжения в сеть, из-за чего электропривод по схеме АВК является высокоэкономичным. Для согласования ЭДС инвертора с напряжением питающей сети используется согласующий трансформатор. Суммарный КПД трансформатора и инвертора составляет 0,95–0,96, постоянная времени инвертора около 0,01 секунды.

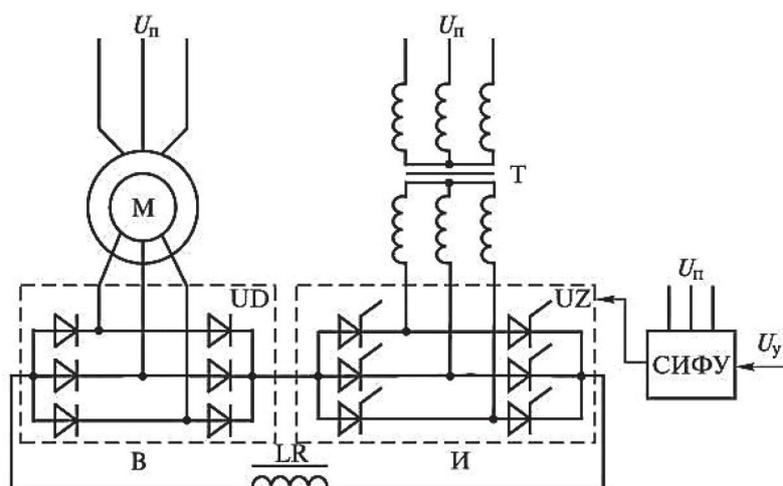


Рис. 1. Принципиальная схема электропривода с асинхронным вентильным каскадом

Наряду с электроприводом по схеме АВК для машин и установок малой и средней производительности получил применение асинхронный [18], а для машин большой производительности – синхронный частотно-регулируемый электропривод. Развитие полупроводниковой техники и микроэлектроники позволило электротехнической промышленности создать преобразователи частоты для асинхронных и синхронных электроприводов (система ПЧ-Д) с качеством регулирования, не уступающим электроприводам постоянного тока [19].

Различают два вида преобразователей частоты со звеном постоянного тока: с автономным инвертором напряжения (ПЧ-Д с АИН) и автономным инвертором тока (ПЧ-Д с АИТ) [20]. Преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения (рис. 2) содержат неуправляемый выпрямитель и инвертор.

Транзисторный вариант позволяет формировать синусоидальное напряжение переменной частоты на обмотках статора асинхронного двигателя за счет широтно-импульсной модуляции. Основные достоинства ПЧ-Д с АИН: практически синусоидальный ток нагрузки; широкий диапазон выходных частот от 0 до 1000 Гц; возможность подключения к одному преобразователю частоты несколько электродвигателей. Недостаток – невозможность получения генераторного режима с отдачей энергии в сеть из-за наличия неуправляемого выпрямителя, который имеет одностороннюю проводимость.

Преобразователи частоты с автономным инвертором тока (рис. 3) содержат управляемый выпрямитель и инвертор, выполненный на запираемых тиристорах типа ГТО, за счет чего добиваются высокого коэффициента мощности [21]. Основными достоинствами ПЧ-Д с АИТ являются: возможность рекуперации энергии в сеть; близкое к синусоидальному выходное напряжение; безаварийность режима КЗ по выходу. К недостаткам следует отнести: ограниченность верхнего диапазона регулирования выходной частоты (обычно $f_{\max \text{ вых}} = 70$ Гц); коммутационные перенапряжения на тиристорах АИТ, которые возрастают с увеличением частоты. Суммарный КПД выпрямителя и автономного инвертора составляет 0,96–0,97, постоянная времени около 0,005 секунд.

Меньшее распространение в электроприводах машин и установок горного производства получила система с непосредственным преобразователем частоты (НПЧ). Трехфазная система электропривода с НПЧ содержит три реверсивных тиристорных преобразователя постоянного тока, управление которыми осуществляется модулирующим напряжением. Частота и амплитуда этого напряжения определяют частоту и напряжение на выходе НПЧ. С помощью реверсивного тиристорного преобразователя формируются положительный и отрицательный полупериоды выходного напряжения. На рис. 4 показана схема простейшего НПЧ, в котором тиристорные преобразователи постоянного напряжения в каждой фазе (+A, –A; +B, –B; +C, –C) выполнены по трехфазной нулевой схеме.

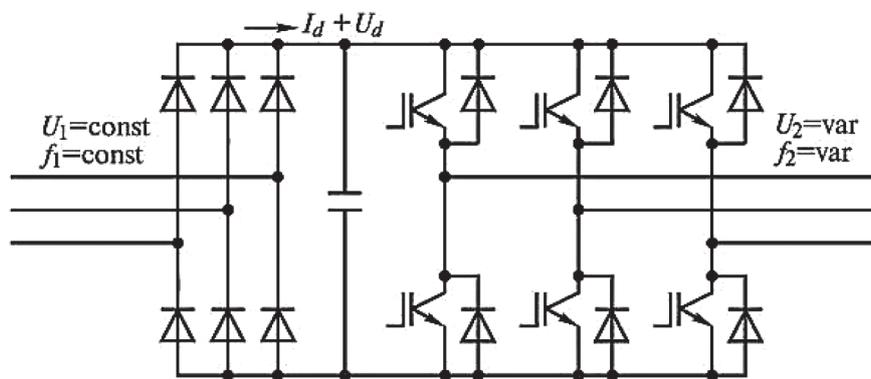


Рис. 2. Принципиальная схема преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения

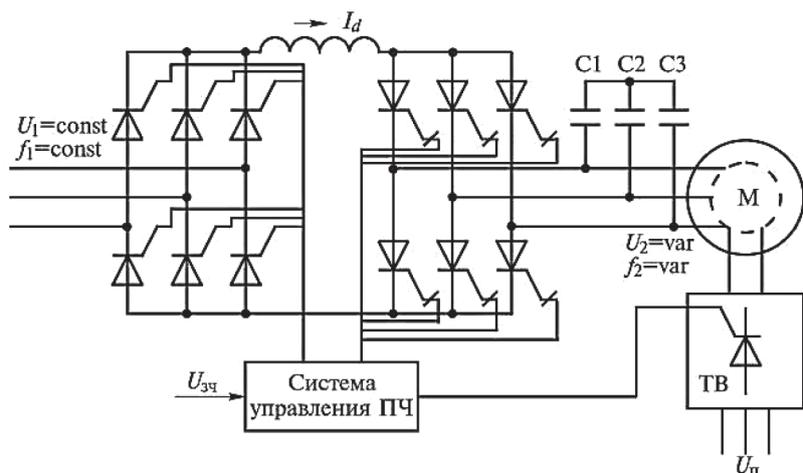


Рис. 3. Принципиальная схема электропривода на базе синхронного двигателя с автономным инвертором тока

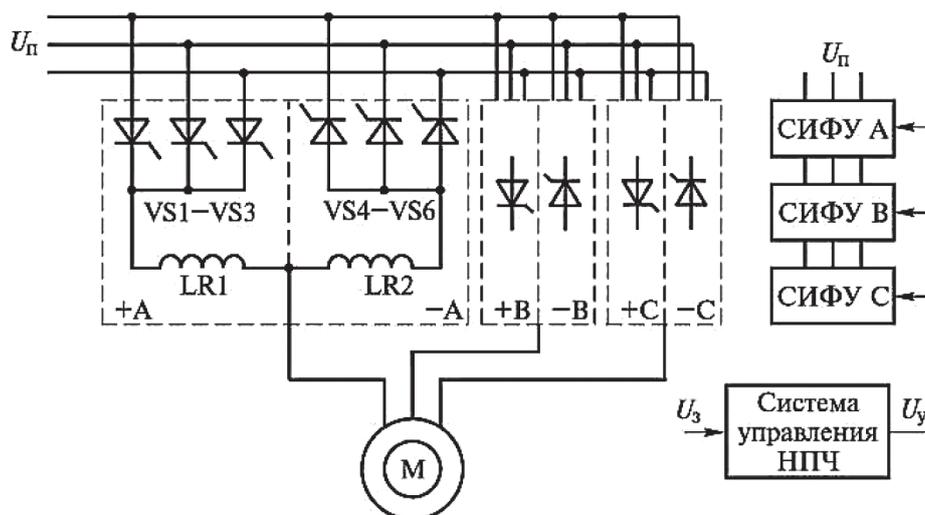


Рис. 4. Принципиальная схема электропривода с непосредственным преобразователем частоты

Основные достоинства НПЧ: естественная коммутация тока сетевым переменным напряжением, благодаря чему используются простые однооперационные тиристоры; полная реверсивность схемы; минимальное количество вентилей, одновременно включенных между сетью и двигателем. Основным недостатком НПЧ: ухудшение формы выходного напряжения при увеличении частоты. Максимальную выходную частоту ограничивают обычно частотой 12,5 Гц. Переход

от нулевой трехфазной схемы к мостовой шести- или двенадцатипульсовой расширяет рабочий диапазон выходных частот до 25 Гц. Так как НПЧ по схемному решению соответствует системе УВ-Д, то энергетические показатели и постоянная времени такие же, как у тиристорного преобразователя.

Наряду с традиционным частотным управлением, когда электродвигатель получает питание от инвертора с независимым заданием частоты, для машин и установок

горного производства начали применять, пока в единичном случае, систему управления электроприводом, зависящую от угла поворота ротора, когда частота выходного напряжения или тока автономного инвертора задается с помощью датчика угла положения ротора. В качестве приводного двигателя при этом применяется синхронный электродвигатель. По принципу действия такая система аналогична электродвигателю постоянного тока, у которого функции механического коллектора и щеточного аппарата выполняют электронный коммутатор в виде автономного инвертора и датчик положения ротора в пространстве. Синхронный двигатель с автономным инвертором представляет собой обращенный двигатель постоянного тока, в котором неподвижный статор является якорем, а вращающийся ротор – источником магнитного поля. Двигатель по данной схеме включения называется вентильным двигателем (ВД).

Существующие системы электропривода на базе вентильных двигателей подразделяют на мощные и маломощные. Мощные системы электропривода на базе вентильных двигателей являются высоковольтными, поэтому они присущи рудничным подъемным установкам, мельницам, мощным турбомашинам и по схемным решениям отличаются от маломощных систем. Электроприводы на базе вентильных двигателей обычно используют с применением автономных инверторов тока.

Электропривод на базе вентильного двигателя является достаточно сложным, крупногабаритным и не самым дешевым при малых мощностях. Использование этого вида привода в высоковольтных (6–10 кВ) установках сравнительно большой мощности (800–3500 кВт) позволяет снизить удельную стоимость. По сравнению с коллекторными двигателями постоянного тока регулируемый электропривод по схеме ВД обладает лучшими динамическими и статическими свойствами. При этом могут быть использованы простые структуры управления электропривода постоянного тока, обеспечивающие высокие регулировочные свойства и динамические показатели [22].

Заключение. Рассмотренные в работе системы электроприводов широко применяются в горной промышленности. Одни системы являются наиболее простыми и экономичными, другие более сложными, но наиболее действенными. По мнению авторов, из рассмотренных систем, наиболее оптимальной для использования, является

система электропривода с преобразователем частоты с автономным инвертором тока. Одним из основных достоинств данной системы является её универсальность, поскольку возможно её применение как с асинхронными электродвигателями с фазным, так и с короткозамкнутым ротором. Так же следует отметить, что при применении системы ПЧ с АИТ достигается очень высокое значение коэффициента активной мощности, что является не маловажным показателем в современной энергетике. Конечно, нельзя упускать перспективность более широкого распространения вентильных двигателей, но это станет возможно с уменьшением стоимости при использовании их на малых мощностях.

Список литературы

1. Ляхомский А.В. Автоматизированный электропривод машин и установок горного производства. Часть 1. Автоматизированный электропривод механизмов циклического действия: учебное пособие / А.В. Ляхомский, В.Н. Фащенко. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – 477 с.
2. Егоров А.Н., Семенов А.С., Федоров О.В. Практический опыт применения преобразователей частоты Power Flex 7000 в горнодобывающей промышленности // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2017. – № 4 (119). – С. 86–93.
3. Семёнов А.С., Хазиев Р.Р. Выбор электродвигателя проходческого комбайна путём математического моделирования // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 5–5. – С. 694–698.
4. Черенков Н.С., Семёнов А.С. Модернизация и оптимизация автоматизированных конвейеров в горной промышленности // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3–4. – С. 417–419.
5. Петрова А.А., Семёнов А.С. Модернизация электропривода шахтной подъемной установки // Международный студенческий научный вестник. – 2017. – № 4–2. – С. 158–161.
6. Решетняк С.Н. Особенности применения высоковольтных преобразователей частоты для питания синхронных двигателей используемых в качестве приводов подъемных установок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – № 10. – С. 66–71.
7. Рушкин Е.И., Семёнов А.С. Анализ энергоэффективности системы электропривода центробежного насоса при помощи моделирования в программе MATLAB // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8–2. – С. 341–342.
8. Семёнов А.С., Кугушева Н.Н., Хубиева В.М. Моделирование режимов работы частотно-регулируемого электропривода вентиляторной установки главного проветривания применительно к подземному руднику по добыче алмазосодержащих пород // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8–5. – С. 1066–1070.
9. Решетняк С.Н., Фащенко В.Н., Федоров О.В. Особенности применения преобразовательной техники на горнодобывающих предприятиях России // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 6. – С. 331–334.
10. Федоров О.В. Оценки эффективности частотно-регулируемых электроприводов: монография. / О.В. Федоров. – М.: Издательский Дом «Инфра-М», 2011. – 144 с.
11. Федоров О.В. Частотно-регулируемый электропривод в экономике страны: монография. / О.В. Федоров. – М.: Издательский Дом «Инфра-М», 2011. – 142 с.
12. Мальчер М.А., Аникин А.С. Проблемы внедрения частотного регулирования в горнодобывающей отрасли //

Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 40–46.

13. Кодкин В.Л., Аникин А.С., Мальчер М.А. Проблемы внедрения частотного регулирования в горнодобывающей отрасли // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2012. – № 18. – С. 45–49.

14. Голубцов Н.В., Ефремов Л.Г., Федоров О.В. Проблема эффективности использования энергоресурсов // Вестник Чувашского университета. – 2014. – № 2. – С. 18–22.

15. Кузнецов Н.М. Рациональное электропотребление на горных предприятиях // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 4. – С. 128–135.

16. Кузнецов Н.М., Егоров А.Н., Егоров Н.В. Особенности электропотребления и пути его оптимизации при подземной разработке кимберлитов // Горный журнал. – 2010. – № 7. – С. 87–89.

17. Семёнов А.С., Бондарев В.А. Анализ показателей качества электрической энергии при работе асинхронного двигателя от преобразователя частоты // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 4-1. – С. 112–117.

18. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в пакете программ MATLAB // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2014. – Т. 11. – № 1. – С. 51–59.

19. Семёнов А.С. Моделирование автоматизированного электропривода: методические указания по выполнению лабораторных работ. – М.: «Издательство «Спутник+», 2012. – 60 с.

20. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя при прямом пуске и с преобразователем частоты в пакете программ MATLAB // Естественные и технические науки. – 2013. – № 4 (66). – С. 296–298.

21. Рушкин Е.И., Семёнов А.С., Саввинов П.В. Анализ применения протокола MODBUS для управления электроприводом на горных предприятиях // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–12. – С. 2615–2619.

22. Матул Г.А., Семёнов А.С. К вопросу о комплексной автоматизации открытых горных работ в алмазодобывающей промышленности // Естественные и технические науки. – 2016. – № 12 (102). – С. 265–268.