

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В ГОРНО-ДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

В.Л. Кодкин*, А.С. Аникин*, М.А. Мальчер**

*** г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет**

**** г. Копейск, ОАО «Копейский машиностроительный завод»**

PROBLEMS OF IMPLEMENTATION OF FREQUENCY CONTROL IN MINING INDUSTRY

V.L. Kodkin*, A.S. Anikin*, M.A. Malcher**

*** Chelyabinsk, South Ural State University**

**** Kopeysk, JSC «Kopeysk Machine-Building Plant»**

Представлены опыт внедрения, проблемы и перспективы частотно-регулируемого асинхронного электропривода в горных машинах, а именно, реализация тягового электропривода самоходного пневмоколесного вагона В15К, построенного на одном преобразователе частоты и четырех асинхронных двигателях, подключенных параллельно, без датчиков обратных связей.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, горный транспорт, преобразователь частоты, шахтный самоходный вагон В15К, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, мотор-колесо.

In the article the following issues are observed: implementation experience, problems and perspectives of the frequency-controlled asynchronous drive in mining machines, in particular, the implementation of traction electric drive of self-propelled pneumowheel car V15K constructed with only one frequency converter and four parallelly connected asynchronous engines without feedback sensors.

Keywords: frequency-controlled electric drive, mining transport, frequency converter, mining self-propelled cat V15K, asynchronous engine with short-circuited rotor, motorized wheel.

Технический уровень и конкурентоспособность изделий машиностроения во многом определяется управляемостью, надежностью и уровнем энергопотребления (коэффициентом полезного действия) их исполнительных механизмов. По комплексу технических качеств в настоящее время явное преимущество имеют электромеханические приводы, оснащенные асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором (АД). Эти двигатели традиционно применяются в горном машиностроении, так как в них отсутствует щеточно-коллекторный аппарат. Их массогабаритные и ценовые характеристики предпочтительнее, чем у других двигателей, и они не требуют периодического обслуживания. Эти преимущества особенно важны в загрязненных, взрывоопасных условиях шахт при работе в ограниченном пространстве.

До последнего времени сложно было управлять данным типом двигателей – регулировать скорость вращения и крутящий момент. В 90-х годах появилась потенциальная возможность решить эти проблемы с помощью двухзвенных преобразователей частоты (ПЧ) на полностью управляемых транзисторах, имеющих высокие технические характеристики. Благодаря массовому произ-

водству и доступным ценам, они получили широкое распространение в промышленности.

Примером такой разработки является внедрение ПЧ мощностью 160 кВт на вновь создаваемый самоходный вагон (ОАО «Копейский машиностроительный завод»). Особенность тягового привода вагона – это четыре асинхронных мотор-колеса напряжением 660 В, которые питаются от преобразователя, установленного в станции управления самоходного вагона. В процессе пусконаладочных работ выявился ряд сложностей, преодолеть которые в рамках стандартных применений и рекомендаций фирм производителей ПЧ не удалось. К наиболее важным следует отнести:

- при движении с полной нагрузкой на одной и той же трассе полный ток ПЧ увеличивается с ростом скорости, что приводит к перегреву и срабатыванию защит. На 17 и 35 Гц токи одинаковые, на 50 Гц ток на 20 % больше. На рис. 1 представлены осциллограммы токов при движении груженого вагона на разных скоростях по одной трассе. Участок пути состоял из уклона (9–10°) протяженностью 25 м;

- колебательность суммарного полного тока двигателей I достигает 50 % от среднего значения (рис. 2);

- в режиме «поддержания скорости» соответствующий сигнал, рассчитанный преобразователем ($n_{ПЧ}$), поддерживается с точностью до 3 % при любых изменениях нагрузки, тогда как прямые измерения времени движения и расчеты скорости по электромеханическим характеристикам двигателя ($n_{РАСЧ}$) показали, что реальная скорость уменьшается на 20–30 % (рис. 3);
- из большого количества параметров, настраиваемых в ПЧ (при отсутствии датчика скорости), действительно воздействовать на работу привода можно только с помощью отношения U/f ;
- при больших токах в ПЧ включается ре-

жим токоограничения, который снижает напряжение, смягчает механическую характеристику и делает механизм в целом неработоспособным.

Необходимо указать основные тенденции, сложившиеся в частотном управлении асинхронным двигателем. Наиболее широко применяется два вида управления: скалярное и векторное.

Скалярное управление – это регулирование амплитуды и частоты питающего электродвигатель напряжения без контроля и управления динамическими процессами. Это самое простое и надежное управление АД. Для улучшения статических характеристик используются безынерционные положительные связи по току статора (рис. 4)

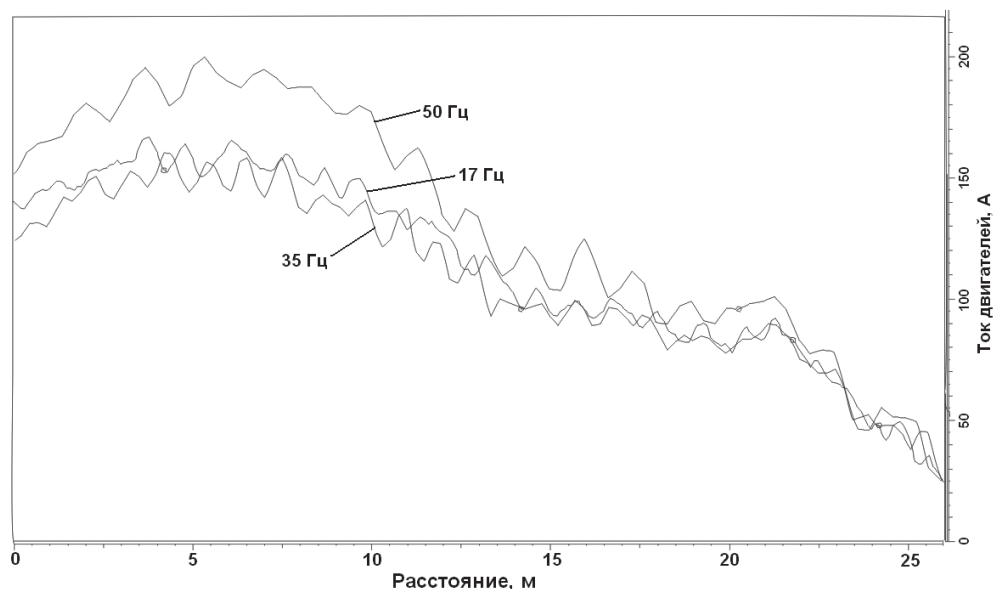


Рис. 1. Осциллограммы токов при движении на разных частотах задания

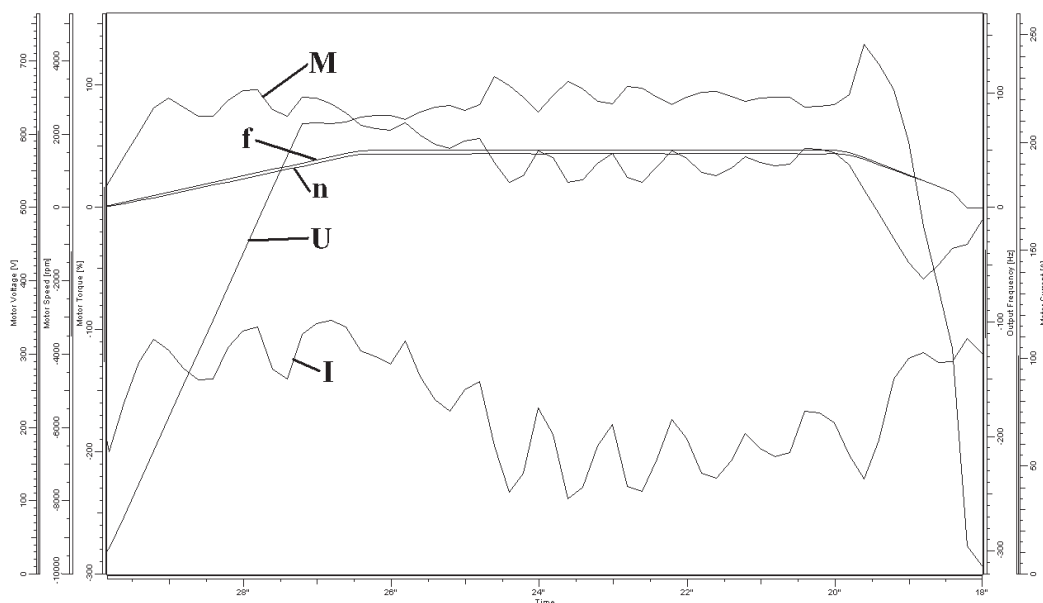


Рис. 2. Высокая колебательность электромагнитных процессов в приводе: U – напряжение двигателей, В; I – суммарный полный ток двигателей, А; M – суммарный момент двигателей, %; n – расчетная скорость двигателей, об/мин; f – частота на выходе преобразователя, Гц

[1], которые ухудшают устойчивость привода. При отсутствии методики выбора коэффициентов связи проверить работу их при изменении статической нагрузки в реальных условиях шахты невозможно.

Векторное управление обеспечивает динамическое и статическое регулирование автоматизированного электропривода (АЭП) с точностью до 1 %. Для его реализации требуется знание точных параметров двигателя, его скорости. Данный тип управления не допускается для многодвигательного ЭП и в идеале требует прямого измерения магнитного потока в двигателе и его скорости вращения или точный расчет этих переменных.

Математический аппарат, применяемый при анализе АЭП – это линейные векторные и операторные методы исчисления, которые справедливы при постоянной частоте питающего напряжения и скорости АД. При переменной частоте результаты расчетов можно получить только при

очень серьезном упрощении. В [2] АЭП со скалярным управлением сводится к звену второго порядка без каких-либо нелинейностей, а векторное управление подразумевает очень точную линеаризацию асинхронного двигателя. Применяемый математический аппарат не позволяет учесть сложный характер нагрузки, как это имеет место в случае с вагоном.

Для оценки возможности создания ТЭП вагона с частотным управлением целесообразно использовать инженерный метод синтеза САУ – метод частотных характеристик. АД с ПЧ может быть представлен семейством частотных характеристик, зависящих от частоты питающего напряжения и скорости вращения двигателя. Подобный подход изложен в ряде работ, в том числе в описании патента [3]. В [4] приведены результаты экспериментов, подтверждающие правомерность данного подхода. Динамические свойства отдель-

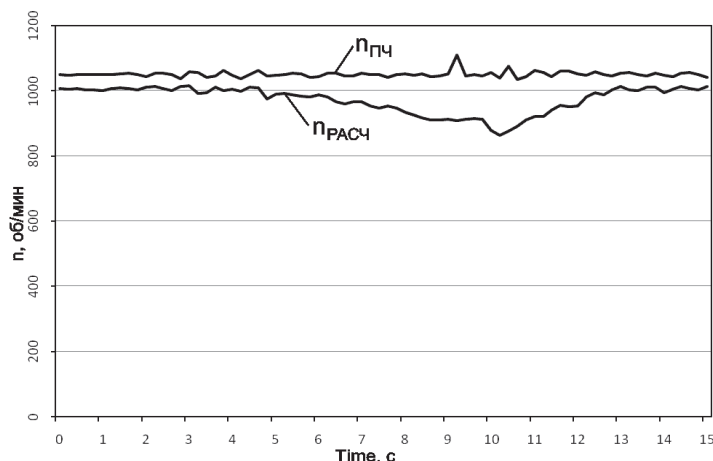


Рис. 3. Уточненная осциллограмма скорости

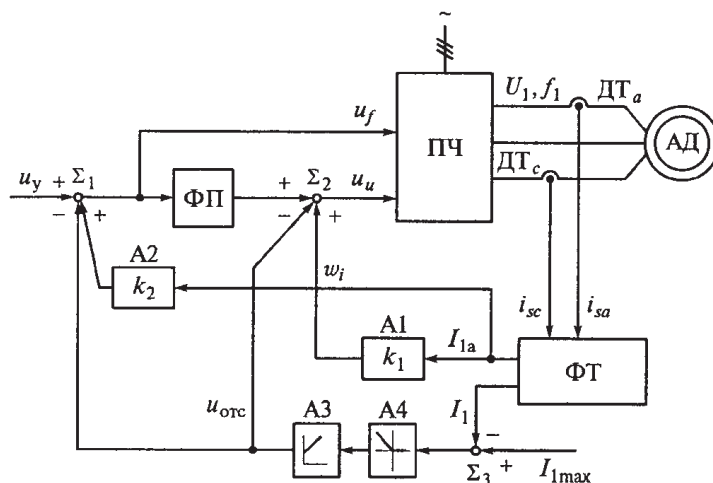


Рис. 4. Структура скалярного управления с положительной обратной связью по току статора [1]:

АД – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; ПЧ – преобразователь частоты; ДТ_a и ДТ_c – датчики фазных токов; ФТ – функциональный преобразователь токов; ФП – функциональный преобразователь; $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ – суммирующие элементы; А1, А2 и А3 – усилительные элементы; А4 – нелинейный элемент; u_y – напряжение задания; k_1, k_2 – коэффициенты усиления; u_f, u_u – задание выходных напряжения и частоты преобразователя; i_{sa}, i_{sc} – мгновенные значения токов фаз А и С; $I_{\max}$ – максимально допустимый тока статора АД; I_1 – действующее значение тока статора; I_{1a} – активная составляющая тока статора; U_1, f_1 – напряжение и частота питания АД; $u_{отс}$ – сигнал отсечки

ных звеньев и каскадов асинхронного электропривода с векторным управлением были представлены на примере амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) (рис. 5).

Применение этого метода позволит получить семейство интегральных частотных характеристик привода, в целом, учитывающих сложный характер нагрузки и нелинейности АД и ПЧ. Метод позволил оценить результаты экспериментов на вагоне и сравнить их с результатами проведенных параллельно испытаний на стенде и на модели.

Колебательность в приводе вагона правильнее всего оценивать по току статора как наиболее точно измеряемой величине, а также с учетом перегрузок привода по току как одной из важнейших переменных в приводе.

Как показано в [3, 4] АД является существенно нелинейным звеном, характеристика которого зависит от частоты питающего напряжения и скорости вращения вала двигателя. При скалярном управлении эти нелинейности полностью сохраняются, а структура АД «склонна» к колебательности. При определенном соотношении U/f или значительном увеличении суммарного момента инерции за счет нагрузки амплитуда колебаний тока статора и момента становится существенной. Компенсации, применяемые в стандартных ПЧ, только усиливают колебательность. Поскольку приводы чаще всего не имеют датчиков скорости, эти колебания незаметны. При стендовых испытаниях АЭП со скалярным управлением с помощью прямого измерения скорости выявлена зависимость колебаний от соотношения напряжения к частоте (U/f) и от коэффициентов компенсаций. Колебательность удалось значительно ослабить существенным изменением параметров двигателя, вносимым в преобразователь (рис. 6).

При росте скорости двигателя (и частоты f) доля реактивного тока в полном токе статора возрастает в соответствии с частотной характеристикой привода, что и приводит к наблюдаемым в приводах стенда и вагона увеличениям полного тока статора при сохранении момента нагрузки и активного тока статора.

В АД существенно нелинейными характеристиками являются также механические и электро-механические характеристики. Поэтому для ЭП, работающего с переменной нагрузкой, целесообразно формировать переменное отношение U/f . При малой нагрузке снижение напряжения приведет к снижению тока холостого хода и соответственно полного тока статора жесткости контура и амплитуды колебаний токов. При нагрузках выше номинальной усиление потока (отношение U/f) позволит снизить полный ток статора.

Увеличение потока за счет отношения U/f сохраняет структуру АД с ПЧ и менее отрицательно влияет на устойчивость привода по сравнению с положительными обратными связями, принятыми в стандартных преобразователях. Увеличение магнитного потока происходит при увеличении нагрузки, что обеспечивает по сравнению со стандартными алгоритмами скалярного управления снижение статорных токов на 20–30 % и увеличение фактической скорости двигателя на 5–10 % за рабочий цикл за счет повышения жесткости механической характеристики.

В ТЭП самоходного вагона В15К реализованы алгоритмы работы ЭП с усиленным потоком, изложенные в [5]. Реализация в преобразователе частоты алгоритма управления с увеличением магнитного потока двигателя при увеличении нагрузки позволила повысить грузоподъемность самоходного вагона до 14–16 т с сохранением скорости

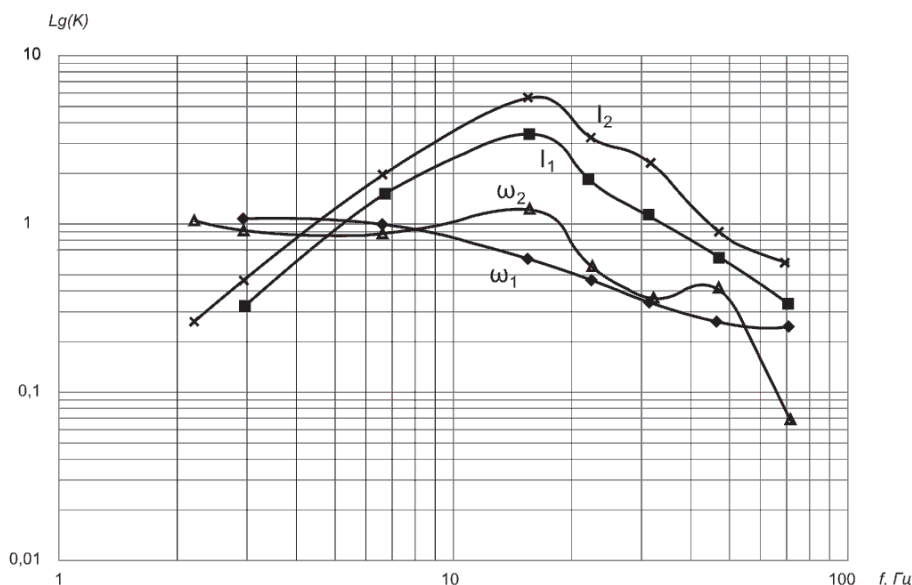


Рис. 5. ЛАЧХ привода с выходом по скорости (ω_1 и ω_2) и полному току статора (I_1 и I_2) при различных постоянных составляющих сигнала задания (40 % и 80 % соответственно) на холостом ходу [4]; K – коэффициент усиления



Рис. 6. Осциллограммы скорости для различных частот задания при различных параметрах асинхронного двигателя, вводимых в ПЧ со скалярным управлением

при углах возвышения 10–13°, что не обеспечивали стандартные алгоритмы скалярного управления, при которых предельная нагрузка составляла 8–9 т, в результате чего производительность вагона была увеличена практически в 2 раза.

Литература

1. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: АCADEMIA, 2006 – 177 с.
2. Усольцев, А.А. Векторное управление асинхронными двигателями: учебное пособие / А.А. Усольцев. – СПб.: СПбГИТМО, 2002 – 120 с.
3. Пат. 2336624 Российская Федерация, МПК⁶ Н 02 Р 27/04, Н 02 Р 27/06. Устройство прямого управления скоростью двигателя переменного тока / В.Л. Кодкин, Э.Р. Хайбиков. – № 2006106477/09; заявл. 02.03.2006; опубл. 20.10.2008, Бюл. № 29. – 11 с.
4. Орлов, Д.А. Амплитудно-частотные характеристики асинхронного электропривода с векторным управлением координат / Д.А. Орлов, О.И. Осипов, В.В. Поздняков // Сборник трудов IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития», Магнитогорск, 14–17 сентября 2004 г. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2004. – Т. 1. – С. 203–205.
5. Пат. 2412526 Российская Федерация, МПК⁶ Н 02 Р 23/00. Устройство частотного управления асинхронным электроприводом / В.Л. Кодкин, А.С. Аникин. – № 2010108563/07, заявл. 09.03.2010; опубл. 20.02.2011, Бюл. № 5. – 12 с.

Поступила в редакцию 22.03.2012 г.

Кодкин Владимир Львович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – автоматическое управление, нелинейные системы, автоматизированный электропривод. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

Kodkin Vladimir Lvovich – Doctor of Science (Engineering), Professor of “Electric Drive and Production Units Automation” Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: automatic control, nonlinear systems, automated electric drive. Contact telephone number: 8 (351) 267-93-21.

Аникин Александр Сергеевич – доцент кафедры «Электротехника и возобновляемые источники энергии», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – силовая электроника, автоматизированный электропривод. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

Anikin Aleksandr Sergeevich – Associate Professor of “Electrical Engineering and Renewable Energy Sources” Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: power electronics, automated electric drive. Contact telephone number: 8 (351) 267-93-21.

Мальчер Марк Алексеевич – главный конструктор ОАО «Копейский машиностроительный завод», г. Копейск. Область интересов – проектирование горной техники для подземной разработки месторождений угля, калийной руды и каменной соли. Контактный телефон: 8 (35139) 7-34-07.

Malcher Mark Alekseevich – Chief designer of JSC “Kopeysk Machine-Building Plant”, Kopeysk. Research interests: designing of mining machines for underground mining of coal deposit, potash mineral and rock salt. Contact telephone number: 8 (35139) 7-34-07.