

Ещин Евгений Константинович, доктор техн. наук, профессор

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия г. Кемерово, ул.Весенняя, 28

E-mail: eke_kuzstu@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ТАХОГРАММЫ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ СРЕДСТВАМИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Аннотация.

Рассматривается задача формирования тахограммы (диаграммы скорости) шахтной (рудничной) подъемной машины (ПМ). Обращается внимание, что при управлении движением подъемной установки (движением подъемного сосуда, приводного барабана, ротором (якорем) одного или нескольких электрических двигателей) основной проблемой является проблема реализации тахограммы (диаграммы скорости). Обращается внимание на направление совершенствования формы тахограмм с целью улучшить динамическое состояние электромеханической системы ПМ путем исключения, т.н. «рывков». Отмечается, что ограничение (ликвидация) величины рывка в свою очередь требует от электродвигателя возможности плавного регулирования и высокого быстродействия. Это требование означает рассмотрение возможности использования приводного асинхронного электродвигателя ПМ как источника силового управляющего воздействия на механическую часть (редуктор, барабан) ПМ при формировании нужного вида тахограммы. Говорится, что именно электрическая машина в ответ на нежелательные колебательные движения подъемного сосуда потенциально может формировать необходимое значение ее электромагнитного момента для «успокоения» колебательных движений. Подтверждается необходимость проведения исследований в части определения возможностей использования асинхронного электродвигателя при формировании задаваемой формы тахограммы ПМ и в т.ч. «безрывковой» диаграммы скорости (S -типа). Отмечается необходимость оценки возможности асинхронного электродвигателя с фазным ротором как электромеханического преобразователя энергии электропривода ПМ стать полноуправляемым источником силовых управляющих воздействий на электромеханическую систему подъемной установки (ПУ). Рассматривается решение задачи на конкретном примере. Отмечается, что задача формирования заданного вида тахограммы трансформируется в задачу управления электромагнитным моментом АД. Предлагается вариант аналитической конструкции формирования управляющего воздействия АД (напряжения питания ротора) в расчетной модели обобщенной электрической машины в неподвижной координатной системе. Представлены расчетные варианты реализации линейной и S -форм тахограмм. Установлена принципиальная возможность управления электромагнитным моментом АДФР при управлении по цепи ротора таким образом, что обеспечивается решение технологической задачи – реализации необходимой тахограммы (диаграммы скорости) при любом характере изменения момента сопротивления на валу АДФР.



Информация о статье

Поступила:

01 июня 2021 г.

Рецензирование:

29 июня 2021 г.

Принята к печати:

26 октября 2021 г.

Ключевые слова:

подъемная установка, динамическая нагруженность, электропривод, асинхронный электродвигатель, управление состоянием.

Для цитирования: Ещин Е.К. Формирование тахограммы подъемной машины средствами асинхронного электропривода // Горное оборудование и электромеханика – 2021. – № 5 (157). – С. 57-62 – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-57-62

Безусловно, шахтная или рудничная подъемная установка (ПУ) – ключевое звено технологической цепи добычи полезного ископаемого. Подъемная машина (ПМ) как часть ПУ, «...предназначенная

для создания тягового усилия и управления работой подъемной установки» по ГОСТ Р 54976 – 2012, по сути, состоит из электропривода ПУ. Заметим спра-

вочно, что отсчет истории *электропривода* ПМ ведется с 1891 года [1, стр.283], когда в составе ПМ появился именно электропривод на базе электрической машины постоянного тока. Однако если история электропривода ПУ начинается с 1891 года, то начало развития теории управления движением ПУ при помощи электропривода позднее, можно считать, что в России она началась с 1932 г. Исследования, оформленные в виде монографий, появились в 1933 г.

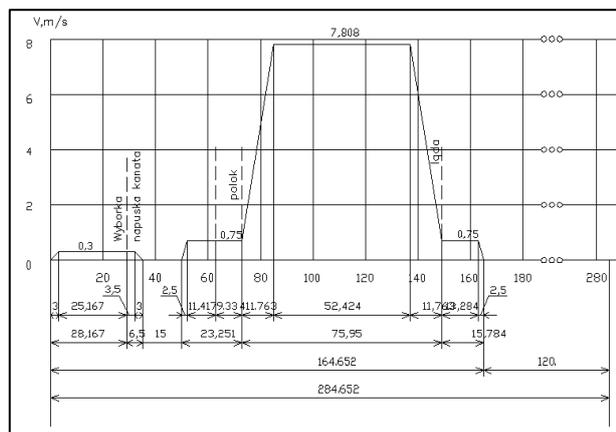


Рис. 1. Проект семипериодной линейной тахограммы скиповой ПМ с участком выбора напуска каната

Fig. 1. Project of a seven-period linear tachogram of a skip PM with a selection area

При этом обозначилось, что основной проблемой при управлении движением ПУ (движением подъемного сосуда, приводного барабана, ротором (якорем) одного или нескольких электрических двигателей) является проблема реализации т.н. тахограммы (диаграммы скорости). Сама по себе функциональная зависимость изменения скорости во времени – тахограмма со встречающимися вариантами названий – рабочего органа, движения ПМ, подъема ПМ, двигателя, скорости, движения скипов, работы скиповой ПМ и пр. чрезвычайно распространена в различных вариантах записи графической и аналитической. Применительно к ПУ – подробно в [2,3,4,5,6]. Заметим, что в современных системах моделирования динамических систем, например Matlab, графическое изображение и реализующее его математическое обеспечение объединены в отдельные блоки со «скрытой» явно математикой.

Обозначилось направление совершенствования формы тахограмм. Причина – стремление улучшить динамическое состояние электромеханической системы ПМ путем исключения, в том числе т.н. «рывков (jerk)», например, [7, стр.7], которые возникают «...из-за формы резкого изменения скорости, которое генерирует высокие значения рывка» («...sharp edges of the speed profile which would generate high value of jerk»). Поэтому желательно иметь большой радиус участков тахограммы при изменении ее при переходе от одного состояния к другому («...it is desirable to have a large radius of the speed curve when changing from rest...»)

На необходимость такой работы обращают внимание практически все исследователи. Например, раньше, чем в упомянутой [7] выше работе Степанов А.Г. [8, стр.6] предлагает формировать «...переходные режимы ускорения» машины в виде линейных зависимостей от времени.

Про тахограммы (диаграммы скорости) с «плавными переходами» (S-диаграммы) между участками упоминается в [3, стр. 23]. Практически такие же, «самые свежие» рекомендации есть в работе Зверева В.Ю. [2, стр.88, 94].

Эти рекомендации означают, что сама тахограмма, традиционно представляемая в виде (см. рис. 1 [9]) линейных зависимостей в «безрывковом» варианте должна быть гладкой функцией. Особо отметим, что если в [7] речь идет о стыковочном сопряжении участков тахограммы с использованием термина «радиус» (a large radius), т.е. частями круга, то в работе [2] линейные зависимости определяют «стыковки» участков тахограммы частями парабол.

Нужно упомянуть, что «безрывковые» диаграммы скорости экспериментально были зафиксированы И.К. Хрусталевым в 1965 г. для скиповых ПУ Кузбасса, который специально отметил, что «...ввиду *опытности* машинистов ПМ в этих установках запуск подъемных двигателей происходит плавно и быстро».

Дополнительно обратим внимание, что ограничение (ликвидация) величины рывка в свою очередь по А.Г. Степанову «...требует от электродвигателя ... возможности плавного регулирования и *высокого быстрого действия*». Это требование означает рассмотрение возможности использования приводного асинхронного электродвигателя ПМ (для ПМ, как правило, с фазным ротором -АДФР) как источника силового управляющего воздействия на механическую часть (редуктор, барабан) ПМ при формировании нужного вида тахограммы. Важно, что практически работа асинхронного электродвигателя (АД) будет происходить с заранее условно неизвестным изменяющимся моментом сопротивления на его валу. Прогнозные расчетные модели формирования его (момента сопротивления), к сожалению, не могут дать достоверной информации из-за чрезвычайно широкого диапазона изменения параметров известных динамических моделей ПУ и необходимости дополнительного учета влияющих факторов. Как, например, в [3, стр.4] при работе ПУ в стволах с нарушенной геометрией армировки.

Все сказанное подтверждает необходимость проведения исследований в части определения возможностей использования асинхронного электродвигателя при формировании задаваемой формы тахограммы ПМ и в, т.ч., «безрывковой» диаграммы скорости (S-типа).

Высокий уровень динамической нагруженности ПУ, приводящий к нежелательным движениям подъемных сосудов, зафиксирован практически сразу после их (ПУ) появления. Эти нежелательные колебательные движения, отличающиеся от необходимых, опасны. Конечно, существуют классические работы, рассматривающие колебательные движения

подвешенных грузов (например, Я.Г. Пановко). Изучена задача об успокоении систем (Н.Н. Красовский). На каждом временном интервале развития электропривода ПМ рассматривались различные приемы управления движением ПУ в зависимости от «развитости» технических средств управления состоянием электрической машины ПМ.

Именно электрическая машина является источником силового управляющего воздействия на всю электромеханическую систему ПУ. Именно электрическая машина в ответ на нежелательные колебательные движения подъемного сосуда потенциально может и должна формировать необходимое значение ее электромагнитного момента для «успокоения», по Н.Н. Красовскому, колебательных движений.

В этой связи необходимо оценить возможности асинхронного электродвигателя с фазным ротором как электромеханического преобразователя энергии электропривода ПМ стать полностью управляемым источником силовых управляющих воздействий на электромеханическую систему ПУ.

Рассмотрим решение задачи на конкретном примере. Начнем с основного уравнения движения электропривода - $\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M - M_c)$. Здесь: ω – угловая скорость вращения ротора АД; J – момент инерции вращающихся масс; M – электромагнитный момент АД; M_c – момент сопротивления на валу АД.

При заданной диаграмме скорости (например, см. рис. 1) правила изменения ускорения ($d\omega/dt$) будут просты и выглядеть в виде ступенчатой функции с разрывами 1-го рода (см. рис.2). Это означает, что для линейной тахограммы ускорение ротора ($d\omega/dt$) должно иметь во времени постоянное значение (в т.ч. нулевое), изменяющееся «скачком» во времени, например, в соответствии с рис. 1. Обеспечить такой характер изменения ускорения ротора можно только за счет формирования задаваемого значения электромагнитного момента (M_z) АД по правилу $M_z = J \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_z + M_c = J \cdot a_z + M_c$. Здесь: $a_z = \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_z$ – задаваемое значение ускорения.

Справочно отметим, что возможности экспериментального определения (оценивания) ускорения и момента сопротивления в т.ч. для ПМ имеются, например, в [2].

Таким образом, задача формирования заданного вида тахограммы трансформируется в задачу управления электромагнитным моментом АД. Учитывая, что a_z по мере реализации диаграммы скорости должно изменять значение скачкообразно (опять см. рис. 2 – линейная диаграмма с «рывками»), мы должны еще раз обратить внимание на приведенный выше текст «...требует от электродвигателя ... высокого быстродействия».

К настоящему времени имеются хорошо разработанные решения упомянутой задачи формирования электромагнитного момента АД. Например, наиболее «продвинутые (advanced)» технологии – в [10] и в т.ч. на основе принципа максимума Л.С. Понтрягина в [11]. Вариант [11] с аналитической

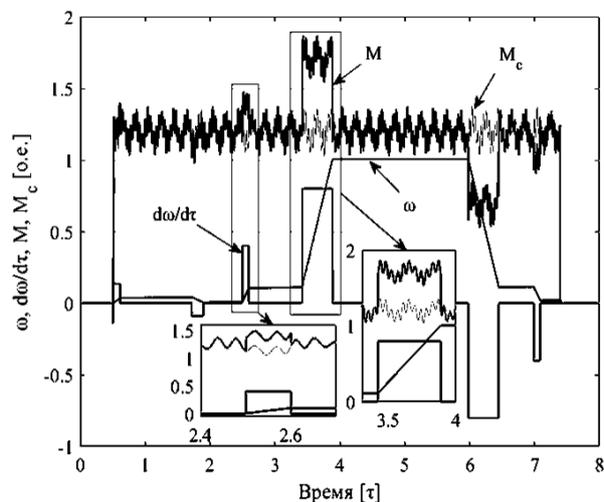


Рис. 2. Реализация линейной тахограммы ПМ при изменяющейся периодической нагрузке на валу АД
Fig. 2. Implementation of the linear tachogram of the PM with a varying periodic load on the IM shaft

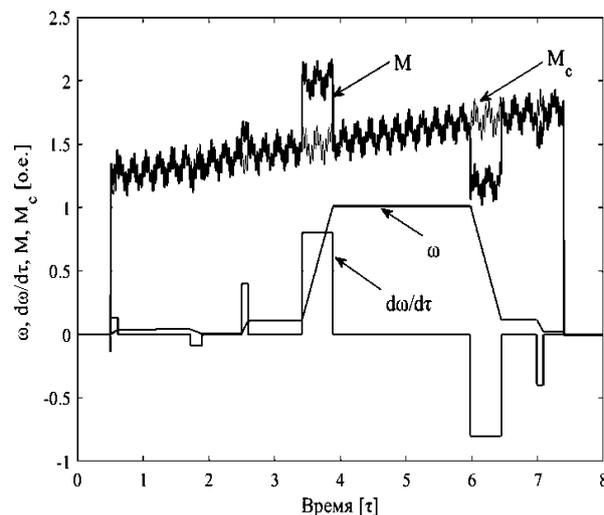


Рис. 3. Реализация линейной тахограммы ПМ при росте статической составляющей периодической нагрузки на валу
Fig. 3. Realization of the linear tachogram of the PM with an increase in the static component of the periodic load on the shaft

конструкцией формирования управляющего воздействия АД (напряжения питания ротора $U_{r\alpha}$, $U_{r\beta}$) в расчетной модели обобщенной электрической машины в неподвижной координатной системе α, β выглядит следующим образом:

$$U_{r\alpha} = \begin{cases} U_{r\max}, & \text{при } \Psi_{r\beta} (M_z - M) \geq 0; \\ -U_{r\max}, & \text{при } \Psi_{r\beta} (M_z - M) < 0; \end{cases} \quad (1)$$

$$U_{r\beta} = \begin{cases} U_{r\max}, & \text{при } -\Psi_{r\alpha} (M_z - M) \geq 0; \\ -U_{r\max}, & \text{при } -\Psi_{r\alpha} (M_z - M) < 0. \end{cases}$$

Это правило (1), по сути, предлагает здесь вариант управления ПМ к скользящим системам [12, стр.1948; 13, стр.456].

Практически это означает, что в цепи питания ротора может находиться более быстродействующая система управления по сравнению, например, с существующей и хорошо зарекомендовавшей себя системой управления, реализующей векторное

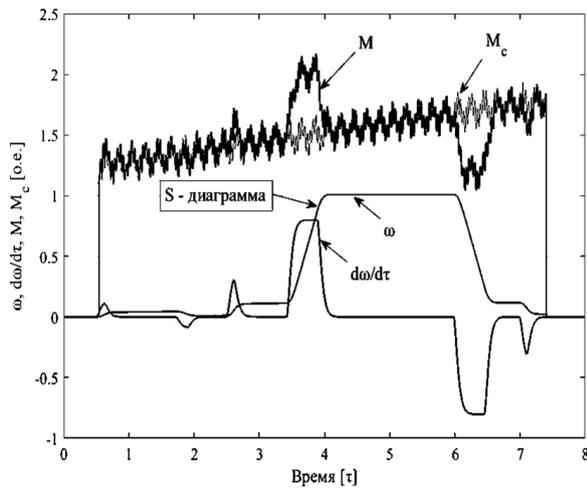


Рис. 4. Реализация безрывковой S-диаграммы ПМ
Fig. 4. Implementation of the fragmentless S-diagram of PM

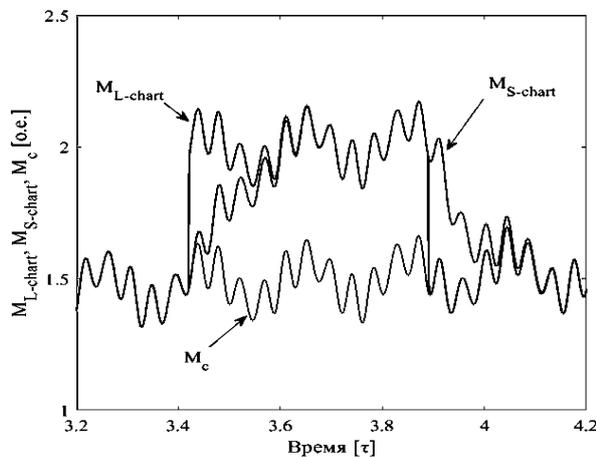


Рис. 5. Сравнительный характер изменения электромагнитного момента АД при реализации линейной ($M_{L-chart}$) и S-диаграмм ($M_{S-chart}$)
Fig. 5 Comparative nature of changes in the electromagnetic moment of blood pressure during the implementation of linear ($M_{L-chart}$) and S-diagrams ($M_{S-chart}$)

управление моментом с использованием преобразователя частоты «ЭРАТОН-ФР» [14].

На рис. 2, 3 представлены расчетные варианты реализации линейной формы тахограммы по рис. 1. Сразу отметим, что все значения исследуемых величин на графиках приведены в относительных единицах. Для исключения наложения графиков друг на друга зависимости для M и M_C искусственно смещены вверх.

Разумеется, введено масштабирование по времени. Реальное время (t) тахограммы по рис. 1 ≈ 164 с. заменено «машинным» временем (τ) ≈ 7 т. Это вызвано тем, что вычисление параметров, определяющих динамическое состояние системы в скользящем режиме работы, должно вестись с достаточно малым шагом интегрирования.

В частности, если динамическую механическую характеристику прямого пуска АД можно получить при шаге $\Delta t = 10^{-3}$ с., то для скользящего режима необходимо иметь $\Delta t = 10^{-6}$ с из-за высокой частоты

переключения напряжения в цепи ротора (т.н. квазиШИМ-модуляция). Последняя величина (шаг интегрирования) определяет объем расчетных данных.

Например, для данных по рис. 2 число расчетных точек в «машинном» времени – $32 \cdot 10^6$.

Исследование режимов электропривода ПМ на базе АД производилось в инструментальной системе динамического моделирования Matlab/Simulink. В качестве АД был принят 4АНК355М6У3.

Так как частота колебаний усилия в канате ПУ может варьироваться в широких пределах (например, для скиповой ПУ в диапазоне $-0.02 \div 1.1$ Гц [2]), то расчетная частота изменения основной гармоники M_C – 5 Гц принята с учетом масштабирования в машинном времени т.

При включении АД в начальный момент времени (режим – выборка напуска каната при $\tau \in \{0.5, \dots, 1.9\}$) даже при уже включенной системе управления в цепи ротора происходят известные «выбросы» значений электромагнитного момента АД. Чтобы их устранить, система управления дополнительно при первоначальном пуске использует технологию подавления колебаний электромагнитного момента, возникающих при пуске АД по [15]. Дальнейшая работа по (1) обеспечивает практически мгновенное следование значения M за моментом сопротивления (см. увеличенные фрагменты на рис. 2) и точное воспроизведение линейной тахограммы, начиная с режима выборки напуска каната. Наблюдается практическое мгновенное изменение M при необходимости обеспечения линейного роста угловой скорости ротора как при ее увеличении ($M - M_C = \Delta M = \text{const} > 0$),

так и при уменьшении ($M - M_C = \Delta M = \text{const} < 0$) во всем диапазоне $\tau \in \{2.5, \dots, 7.09\}$.

Понятно, что такой вариант формирования тахограммы обеспечивает возникновение рывков (см. увеличенные фрагменты на рис. 2) и поэтому на практике реализуются безрывковые S-диаграммы (см. рис. 4). Сравнительный характер изменения электромагнитного момента АД (M) при формировании линейной диаграммы скорости и S-диаграммы (M_{opt}) приведен на рис. 5. Вариант формы безрывковой S-диаграммы обеспечивается за счет прохождения сигнала с блока формирования линейной диаграммы через апериодическое звено 2-го порядка.

Рис. 6 дает графическую сравнительную оценку трансформации формы линейной диаграммы (ω -L-chart') в S-диаграмму (ω -S-chart'). Преимущество использования динамического звена 2-го порядка – в отсутствии необходимости в операциях сопряжения линий в виде участков круга или парабол с линейными участками S-диаграмм.

Заключение. Число публикаций и в т.ч. диссертационных работ по проблемам улучшения динамического состояния подъемных установок не снижается. Последнее просто объясняется естественным изменением во времени качественных и количественных характеристик ПУ. Изменяются глубины стволов (горно-геологические условия), параметры механических передач ПМ и исполнительных органов, мощности и типы электродвигателей ПМ, системы управления электроприводами.

Это естественный процесс развития. Поэтому также естественным является поиск новых вариантов реализации каждой компоненты ПМ. Это касается (может быть, в первую очередь) электрической

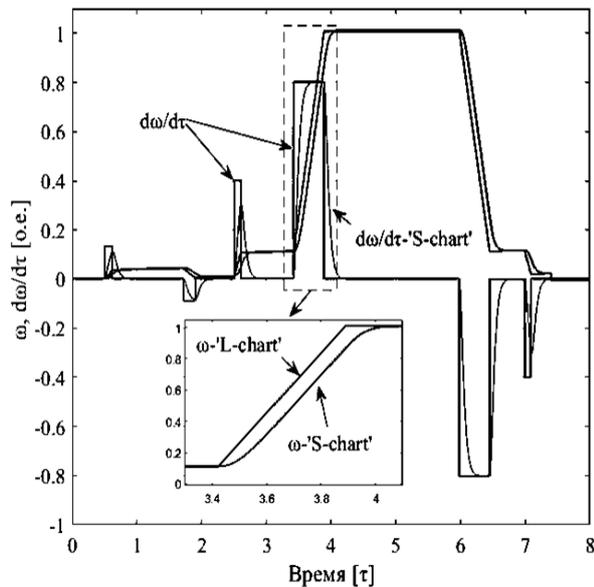


Рис. 6. Трансформация линейной тахограммы в безрывковую S-диаграмму скорости

Fig. 6. Transformation of a linear tachogram into a seamless S-speed diagram

машины (машин) электропривода ПМ. Управление состоянием электрической машины – непростая задача. Она определяется как наличием физических средств реализации управления ЭМ (вспомним путь от управляемых ртутных выпрямителей до многоуровневых инверторов на IGBT транзисторах), так и теорией отыскания лучших решений – теорией оптимального управления.

Применительно к рассмотренной в этой работе установке принципиальная возможность управления электромагнитным моментом АДФР при управлении по цепи ротора таким образом (1), что обеспечивается решение технологической задачи – реализации необходимой тахограммы (диаграммы скорости) при *любом* характере изменения момента сопротивления на валу АДФР. Правило (1) определяет *полную управляемость* электродвигателя в смысле обеспечения значения его электромагнитного момента M заданному M_z .

Разумеется, применительно к ПУ рассмотренная задача – первый этап. Следующий – «подключение» к модели электрической машины моделей механической передачи (редуктора), еще одного АДФР и каната (канатов) с подъемным сосудом. Здесь есть свои особенности. Например, одна из них – при пусках и торможениях ПМ проблематично использовать приведенные расчетные схемы механических передач из-за непостоянства мгновенных значений передаточных отношений в этих режимах.

1. Копытов А.И. История развития горного дела / А.И.Копытов, Ю.А.Масаев, В.В.Першин // Новосибирск: Наука. – 2009. – 511 с.

2. Зверев В.Ю. Обоснование параметров тахограммы скиповых подъемных установок, обеспечивающих снижение динамических нагрузок в головных канатах: Дис...канд. техн. наук / Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. 2018. – 152 с.

3. Ильин С.Р. Влияние параметров диаграммы скорости подъема и эксцентриситета груза на динамику системы «сосуд – армировка» шахтных стволов // Межд. Сб-к. науч. тр. «Геотехническая механика». Вып. 98, Днепропетровск. – 2012. – С. 322-348.

4. Корняков М.В. Защита шахтных подъемных установок от динамических нагрузок при движении сосуда: Автореф. дис...докт. техн. наук / Иркутск: Иркутский государственный технический университет. – 2008. – 42 с.

5. Кубарев В.А. Структуры и алгоритмы систем логического управления автоматизированным электроприводом шахтных подъемных установок: Дис...канд. техн. наук / Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет. – 2013. – 179 с.

6. Кусильдин Р.Б. Снижение динамических нагрузок на канат при осуществлении предохранительного торможения на шахтных подъемных установках: Дис...канд. техн. наук / СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 2016. – 98 с.

7. Lutfi Al-Sharif. Variable Speed Drives in Lift Systems // Lift Report and Elevator and Elevator World · September 2001 pp.1-20. (All content following this page was uploaded by Lutfi Al-Sharif on 26 June 2015).

8. Степанов А.Г. Динамические процессы шахтной подъемной установки с двигателем постоянного тока // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – С.36-44.

9. Островляничик В.Ю. Алгоритмическая структура системы управления электроприводом подъемной машины с двигателем двойного питания / Островляничик В.Ю., Поползин И.Ю. // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. №5. – 2019. – С.307-312.

10. Fengxiang Wang. Advanced Control Strategies of Induction Machine: Field Oriented Control, Direct Torque Control and Model Predictive Control / Fengxiang Wang, Zhenbin Zhang, Xuezhu Mei, José Rodríguez, Ralph Kennel // Energies 2018, 11, 120; DOI: 10.3390/en11010120

11. Патент № 2395157 РФ. Способ управления величиной электромагнитного момента электрической машины переменного тока (варианты) / Ещин Е.К., Григорьев А.В., Соколов И.А. Опубл. 20.07.2010. Бюл. № 20.

12. Heide Brandtstädter. Control of Electromechanical Systems using Sliding Mode Techniques / Heide Brandtstädter, Martin Buss // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference. 2005. Seville, Spain, December 12-15, 2005.

13. Vadim I. Utkin. Sliding Mode Control on Electro-Mechanical Systems / Vadim I. Utkin, Hao-chi Chang // Mathematical Problems in Engineering, 2002, vol. 8(4-5). – Pp.451-473.

14. Электропривод шахтной подъемной машины на основе роторного транзисторного преобразователя частоты «ЭРАТОН-ФР» <https://erasib.ru/otraslvevresheniya/ugol/shakhtnaya-podemnaya-mashina/eratonfr-hoist/> (Дата обращения: 27.04.2020)

15. Патент № 2572097 РФ. Ещин Е.К. Способ пуска асинхронного электродвигателя / Ещин Е.К., Соколов И.А. Опубл. 27.12.2015. Бюл. №36.

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-57-62

Evgeny K. Eshchin, Dr. Sc. in Engineering, Professor

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

FORMING THE TACHOGRAM OF THE WINDER BY MEANS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

Abstract.

The problem of forming a tachogram (speed diagram) of a mine winder (MW) is considered. It is noted that when controlling the movement of the mine winding plant (the movement of the lifting vehicle, the driving drum, the rotor (anchor) of one or more electric motors), the main problem is the problem of implementing a tachogram (speed diagram). Attention is drawn to the direction of improving the shape of tachograms in order to improve the dynamic state of the electromechanical MW system by eliminating the so-called jerking. It is noted that limiting (eliminating) the size of the jerk, in turn, requires smooth control and fast response time from the electric motor. This requirement means consideration of the possibility of using a MW induction motor drive as a source of power control action on the mechanical part (gearbox, drum) of the MW when forming the desired type of tachogram. It is said that it is an electric machine that in response to undesirable oscillatory movements of a lifting vehicle can potentially form the necessary value of its electromagnetic moment for "calming" the oscillatory movements. The need for research is confirmed in terms of determining the possibilities of using an asynchronous electric motor in the formation of a given form of a MW tachogram and, in particular, a «gearless» speed diagram (*S* - type). It is noted that it is necessary to assess the possibility of an asynchronous phase-rotor electric motor as an electromechanical energy converter of a MW electric drive to become a fully controlled source of power control actions on a MW electromechanical system. The solution of the problem is considered on a concrete example. It is noted that the task of forming a given type of tachogram is transformed into the task of controlling the electromagnetic moment of induction motor. A variant of the analytical design of the formation of the control action of the motor drive (rotor supply voltage) in the calculation model of a generalized electric machine in a fixed coordinate system is proposed. Design options for the implementation of linear and *S* - forms of tachograms are presented. The fundamental possibility of controlling the electromagnetic moment of wound-rotor induction motor when controlling along the rotor chain is established in such a way that it provides a solution to the technological problem of realizing the necessary tachogram (velocity diagram) for any type of change in the moment of resistance on the wound-rotor induction motor shaft.



Article info

Received:

01 June 2021

Revised:

29 June 2021

Accepted:

26 October 2021

Keywords: mine winding plant, dynamic loading, electric drive, asynchronous electric motor, state control.

For citation Eshchin E.K. Forming the tachogram of the winder by means of asynchronous electric drive. Mining Equipment and Electromechanics, 2021, no.5 (157), pp. 57-62. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-57-62

REFERENCES

1. Kopytov A.I. The history of mining / A.I. Kopytov, Yu.A. Masaev, V.V. Pershin // Novosibirsk: Science. – 2009. 511 p.
2. Zverev V.Yu. Justification of the parameters of the tachogram of skip hoisting installations, providing a reduction in dynamic loads in the head ropes: Dis... kand. tekhn. nauk. / Perm: Perm National Research Polytechnic University. – 2018. – 152 p.
3. Ilyin S.R. The influence of the parameters of the diagram of the lifting speed and the eccentricity of the load on the dynamics of the vessel-reinforcement system of mine shafts // Mezhd. Sat scientific tr «Geotechnical mechanics». Vol. 98, Dnepropetrovsk. – 2012. – C.322-348.
4. Korniyakov M.V. Protection of mine hoisting installations from dynamic loads during vessel motion: Avtoref. dis... doct. tekhn. nauk. / Irkutsk: Irkutsk State Technical University. – 2008. – 42 p.
5. Kubarev V.A. Structures and algorithms of logical control systems for an automated electric drive of mine winding plant: Dis... kand. tekhn. nauk. / Novokuznetsk: Siberian State Industrial University. – 2013. – 179 p.
6. Kuskildin R.B. Reducing dynamic loads on the rope during the implementation of safety braking on mine winding plant: Dis... kand. tekhn. Nauk. / St. Petersburg: National Mineral Resources University "Mining". – 2016. – 98 p.
7. Lutfi Al-Sharif. Variable Speed Drives in Lift Systems // Lift Report and Elevatori and Elevator World · September 2001 pp.1-20. (All content following this page was uploaded by Lutfi Al-Sharif on 26 June 2015).
8. Stepanov A.G. Dynamic processes of a mine winder with a DC motor. Mining equipment and electromechanics. – 2010. – P.36-44.
9. Ostrovlyanchik V.Yu. Algorithmic structure of a control system for an electric drive of a winder with a dual-feed engine / Ostrovlyanchik V.Yu., Popolzin I.Yu. // High technology development and use of mineral resources. – No. 5. – 2019. – P.307-312.
10. Fengxiang Wang. Advanced Control Strategies of Induction Machine: Field Oriented Control, Direct Torque Control and Model Predictive Control / Fengxiang Wang, Zhenbin Zhang, Xuezhu Mei, José Rodríguez, Ralph Kennel // Energies 2018, 11, 120; DOI:10.3390/en11010120
11. Patent N 2395157 of the RF. The way to control the magnitude of the electromagnetic moment of an electric AC machine (options) / Eshchin E.K., Grigoryev A.V., Sokolov I.A. Opubl. 07.20.2010. Byul. N 20.
12. Heide Brandtstädter. Control of Electromechanical Systems using Sliding Mode Techniques / Heide Brandtstädter, Martin Buss // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference. 2005. Seville, Spain, December 12-15, 2005.
13. Vadim I. Utkin. Sliding Mode Control on Electro-Mechanical Systems / Vadim I. Utkin, Hao-chi Chang // Mathematical Problems in Engineering, 2002, vol. 8(4-5). – Pp.451-473.
14. Elektroprivod shahtnoj pod'emnoj mashiny na osnove rotornogo tranzistorного preobrazovatelya chastoty «ERATON-FR» <https://erasib.ru/otraslevye-resheniya/ugol/shakhtnaya-podemnaya-mashina/eratonfr-hoist/> (Data obrashcheniya: 27.04.2020)
15. Patent № 2572097 RF. Eshchin E.K. Sposob puska asinhronnogo elektrodvigatelya / Eshchin E.K., So-kolov I.A. Opubl. 27.12.2015. Byul. №36.