

ISSN 2311-8342



Всемирная ассоциация выставочной индустрии
Российский союз выставок и ярмарок
Торгово-промышленная Палата РФ



УГОЛЬ и МАЙНИНГ РОССИИ

2 0 1 7



СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов



Новокузнецк
2017

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Сибирский государственный индустриальный университет»

ВК «Кузбасская ярмарка»



Посвящается 400-летию города Новокузнецка

**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№3 - 2017

Главный редактор
д.т.н., проф. Фрянов В.Н.

Редакционная коллегия:
чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Клишин В.И., д.т.н., проф. Мышляев Л.П.,
д.т.н. Павлова Л.Д. (технический редактор), д.т.н. Палеев Д.Ю.,
д.т.н., проф. Домрачев А.Н., д.э.н., проф. Петрова Т.В.

Н 340 Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов : науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2017. - № 3. – 484 с.

Рассмотрены аспекты развития инновационных наукоёмких технологий диверсификации угольного производства и обобщены результаты научных исследований, в том числе создание роботизированных и автоматизированных угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий, базирующиеся на использовании прорывных технологий добычи угля и метана, комплексной переработке этих продуктов в угледобывающих регионах и реализации энергетической продукции потребителям в виде тепловой и электрической энергии.

Журнал предназначен для научных и научно-технических работников, специалистов угольной промышленности, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

Номер подготовлен на основе материалов Международной научно-практической конференции «Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимой в рамках специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и Майнинг» (Новокузнецк, 6-9 июня 2017 г).

Конференция проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-05-20150

Основан в 2015 г.
Выходит 1 раз в год

Учредитель - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

УДК 622.2
ББК 33.1

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2017

3 – ОАО «Сибгипрошахт», г. Новосибирск, Россия	
МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ ПОДОБИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.....	278
¹ д.т.н. Евтушенко В.Ф., ² д.т.н. Бурков В.Н., ³ д.т.н. Мышляев Л.П., ³ Макаров Г.В.	
1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	
2 – Институт проблем управления РАН, г. Москва, Россия	
3 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ РЕЦИКЛОВ	281
¹ д.т.н. Мышляев Л.П., ² Циряпкина А.В., ³ д.т.н. Бурков В.Н., ⁴ к.э.н. Ивушкин К.А.	
1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия	
2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	
3 – Институт проблем управления РАН, г. Москва, Россия	
4 – Объединенная компания «Сибшахтострой», г. Новокузнецк, Россия	
ОЦЕНИВАНИЕ ПОДОБИЯ ТИПОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ УГЛЕБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК.....	285
¹ Макаров Г.В., ² к.э.н. Ивушкин К.А., ¹ д.т.н. Евтушенко В.Ф., ¹ д.т.н. Мышляев Л.П.	
1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия	
2 – Объединенная компания «Сибшахтострой», г. Новокузнецк, Россия	
ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИДЕНТИФИКАЦИИ МНОГОМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ.....	288
¹ д.т.н. Мышляев Л.П., ² Леонтьев И.А., ¹ к.т.н. Грачев В.В., ³ Васькин В.В., ¹ Раскин М.В., ³ Старченко Е.В.	
1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия	
2 – ЗАО «Стройсервис», г. Кемерово, Россия	
3 – ОФ «Матюшинская», г. Прокопьевск, Россия	
ПРОЦЕДУРА ИДЕНТИФИКАЦИИ НАТУРНЫХ СТРУКТУР ПУТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ФРАКТАЛОВ	291
д.т.н. Мышляев Л.П., Циряпкина И.В., Саламатин А.С.	
ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия	
СРЕДА ПРОГРАММИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ПРОГНОЗА ОГНЕСТОЙКОСТИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ.....	295
¹ д.т.н. Каледин В.О., ² к.т.н. Каледин Вл.О.	
1 – Новокузнецкий институт-филиал ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», г. Новокузнецк, Россия	
2 – АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Россия	
МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ РУДНИЧНЫХ МАШИН	298
д.т.н. Островляничик В.Ю., Поползин И.Ю., к.т.н. Кубарев В.А., Маршев Д.А.	
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНЫМ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ГОРНЫХ МАШИН В ГЕНЕРАТОРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ.....	305
к.т.н. Иванов А.С., к.т.н. Пугачева Э.Е., Каланчин И.Ю.	
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДРОБИЛЬНОЙ ВАЛКОВОЙ МАШИНОЙ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ.....	308
д.т.н. Никитин А.Г., к.т.н. Тагильцев-Галета К.В., Чайников К.А.	
Сибирский государственный индустриальный университет г. Новокузнецк, Россия	
ДИАГНОСТИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОДНОВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКИ	311
д.т.н. Никитин А.Г., к.ф.-м.н. Лактионов С.А., Медведева К.С.	
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	

Ключевые слова: машина двойного питания, асинхронный двигатель с фазным ротором, асинхронный режим, механические характеристики.

Машиной двойного питания (МДП) называется схема включения асинхронного двигателя с фазным ротором, в которой на ротор подается добавочное напряжение от внешнего источника питания, в качестве которого обычно выступает преобразователь частоты [1]. Важнейшими характеристиками МДП являются ее механические характеристики. Именно они определяют пригодность ее применения в электроприводе и достигаемые режимы работы машины.

В зависимости от способа формирования добавочного напряжения выделяют два режима работы МДП: асинхронный и синхронный. В асинхронном режиме частота добавочного напряжения равна частоте собственной ЭДС ротора [2, 3], в синхронном – частота добавочного напряжения задается независимо [4]. Рассмотрим асинхронный режим работы МДП.

Для этого обратимся к Т-образной схеме замещения машины (рис. 1).

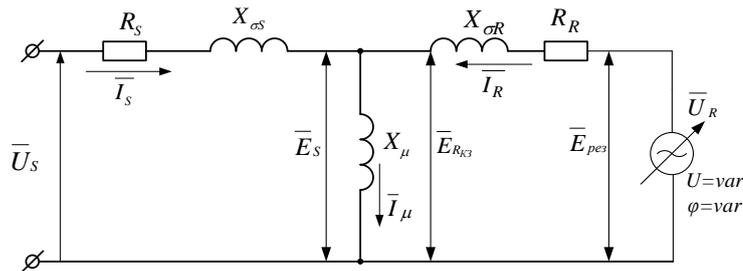


Рис. 1 – Схема замещения МДП в асинхронном режиме

На схеме замещения приняты следующие обозначения:

\bar{U}_S – комплексное значение напряжения на статоре; \bar{I}_S – комплексное значение тока статора; \bar{E}_S – комплексное значение ЭДС, наводимой вращающимся полем в статоре; $X_{\sigma S}$ – собственное индуктивное сопротивление рассеяния статора; I_μ – ток намагничивания машины; X_μ – индуктивное сопротивление контура намагничивания; $X_{\sigma R}$ – собственное индуктивное сопротивление рассеяния ротора, определяется по выражению $X_{\sigma R} = 2\pi f_s L_{\sigma R} \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$, где f_s – частота напряжения, подведенного к статору; R_S – активное сопротивление статора; R_R – активное сопротивление ротора; \bar{E}_{pes} – комплексное значение суммарной (результатирующей) ЭДС, действующей в роторе; \bar{E}_{RK3} – ЭДС ротора в режиме короткого замыкания; s – скольжение, $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$; ω_0 – угловая скорость вращения магнитного поля статора; ω – угловая скорость вращения ротора; \bar{U}_R – комплексное значение напряжения, приложенного к ротору.

При этом, как было указано выше, в асинхронном режиме частота этого напряжения равна собственной частоте ЭДС ротора: $f_R = sf_S$.

Запишем уравнения электрического равновесия машины для Т-образной схемы замещения, выразив собственные ЭДС обмоток через потокосцепления обмоток, а электромагнитный момент определим как функцию векторного произведения потокосцеплений обмоток статора и ротора:

$$\begin{cases} \bar{U}_S = j\omega_0 \bar{\Psi}_S + \bar{I}_S R_S, \\ \bar{U}_R = j\omega_0 s \bar{\Psi}_R + \bar{I}_R R_R, \\ M = -\frac{3}{2} z_{II} \frac{L_\mu}{L_S L_R - L_\mu^2} [\bar{\Psi}_S \times \bar{\Psi}_R] \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{\Psi}_S$ – комплексное значение потокосцепления статора; $\bar{\Psi}_R$ – комплексное значение потокосцепления ротора; L_μ – индуктивность намагничивания; L_S – индуктивность статора; L_R – индуктивность ротора; z_{II} – число пар полюсов машины.

Для облегчения дальнейших преобразований пренебрежем активным сопротивлением статора и его индуктивным сопротивлением рассеяния. Примем также, что комплексное значение напряжения определяется как $\bar{U}_R = U_R e^{j\delta}$.

Коэффициент рассеяния машины определяется по выражению:

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_S L_R} \quad (2)$$

Запишем выражения для связи токов и потокоцеплений обмоток машины с учетом (2):

$$\begin{cases} \bar{I}_S = \frac{1}{\sigma L_S} \bar{\Psi}_S - \frac{k_R}{\sigma L_S} \bar{\Psi}_R \\ \bar{I}_R = -\frac{k_S}{\sigma L_R} \bar{\Psi}_S - \frac{1}{\sigma L_R} \bar{\Psi}_R, \end{cases} \quad (3)$$

где k_S, k_R – коэффициенты связи статора и ротора соответственно.

Подставив выражения для токов (3) в систему (1), получим:

$$\begin{cases} \bar{U}_S = \left(\frac{R_S}{\sigma L_S} + j\omega_0 \right) \bar{\Psi}_S - \frac{R_S k_R}{\sigma L_S} \bar{\Psi}_R, \\ \bar{U}_R = -\frac{R_R k_S}{\sigma L_R} \bar{\Psi}_S + \left(\frac{R_R}{\sigma L_R} + j\omega_0 s \right) \bar{\Psi}_R, \\ M = -\frac{3}{2} p_{II} \frac{L_\mu}{L_S L_R - L_\mu^2} [\bar{\Psi}_S \times \bar{\Psi}_R] \end{cases} \quad (4)$$

Рассмотрим систему (4). Очевидно, что она является универсальной и может описывать как асинхронный двигатель (при $\bar{U}_R = 0$), так и машину двойного питания (при $\bar{U}_R \neq 0$). Произведение σL_R , называемое эквивалентной индуктивностью машины, определится по следующему соотношению:

$$\sigma L_R = L_K,$$

где $\sigma L_R = L_K$ – индуктивность машины в режиме короткого замыкания.

При $\bar{U}_R = 0$ и номинальных условиях индуктивности L_K соответствует реактивное сопротивление короткого замыкания X_K :

$$X_K = 2\pi f_C L_K = X_{S|f_C} + X_{R|f_C},$$

где f_C – номинальная частота напряжения питающей сети; $X_{S|f_C}$ – реактивное сопротивление статора при номинальном напряжении питающей сети; $X_{R|f_C}$ – реактивное сопротивление ротора при номинальном напряжении питающей сети.

Разделим обе части второго уравнения системы (4) на ω_0 :

$$\frac{\bar{U}_R}{\omega_0} = -\frac{R_R k_S}{\omega_0 \sigma L_R} \bar{\Psi}_S + \left(\frac{R_R}{\omega_0 \sigma L_R} + js \right) \bar{\Psi}_R.$$

При принятом допущении относительно эквивалентной индуктивности и номинальности условий работы машины выполнится равенство:

$$\frac{R_R}{\omega_0 \sigma L_R} \approx \frac{R_{Rn}}{X_{Kn}} = s_{KPh}, \quad (2.5)$$

где R_{Rn} – номинальное активное сопротивление ротора; X_{Kn} – номинальное реактивное сопротивление короткого замыкания машины; s_{KPh} – номинальное критическое скольжение машины на ее естественной механической характеристике (при условии $\bar{U}_R = 0$).

Пренебрежем активным сопротивлением статора, и запишем первые два уравнения системы (4) с учетом (5) в виде:

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_S = \frac{\bar{U}_S}{j\omega_0}, \\ \bar{\Psi}_R = \frac{\bar{U}_R}{\omega_0 s_{KPh} + js} + \frac{\bar{U}_S k_S}{j\omega_0 s_{KPh} + js} s_{KPh}, \\ M = -\frac{3}{2} p_{II} \frac{L_\mu}{L_S L_R - L_\mu^2} [\bar{\Psi}_S \times \bar{\Psi}_R] \end{cases} \quad (6)$$

В полученной системе (6) присутствует неявная связь между моментом, развиваемым машиной, и скоростью вращения ротора (в форме скольжения). Данная связь выражается через пото-

косцепления машины. Непосредственное вычисление момента по (6) сложно, поскольку требует полной идентификации потокоцеплений обмоток машины (нахождения их текущих действующих значений и фаз), что является достаточно нетривиальной задачей даже при наличии встроенных в сталь машины датчиков Холла.

Обратившись к методу обобщенной двухфазной электрической машины и произведя необходимые преобразования, получим следующее выражение для момента машины:

$$M = \frac{3}{2} z_{\Pi} \frac{k_S^2 U_S^2}{\omega_0^2 \sigma L_R} \frac{s_{KP_H} s}{s_{KP_H}^2 + s^2} \left[1 - \frac{U_2^*}{s} \left(\cos \delta + \frac{s}{s_{KP_H}} \sin \delta \right) \right]. \quad (7)$$

При $\bar{U}_R = 0$ и прочих номинальных условиях выполняется следующее соотношение:

$$M_{KP_H} = \frac{3}{2} z_{\Pi} \frac{k_S^2 U_S^2}{\omega_0^2 \sigma L_R}, \quad (8)$$

где M_{KP_H} – номинальный критический момент машины на ее естественной механической характеристике.

Подставив (8) в (7), получим выражение, связывающее момент, развиваемый машиной, скольжение, фазу и относительную амплитуду напряжения в цепи ротора:

$$M = \frac{2M_{KP_H}}{s_{KP_H} / s + s / s_{KP_H}} \left[1 - \frac{U_R^*}{s} \left(\cos \delta + \frac{s}{s_{KP_H}} \sin \delta \right) \right], \quad (9)$$

где U_R^* определяется в соответствии с выражениями:

$$U_{ROTH} = \frac{U_R}{U_S},$$

$$U_R^* = U_{ROTH} / k_S.$$

где U_{ROTH} – относительное напряжение на роторе, U_R^* – уточненное относительное напряжение на роторе.

Следует отметить, что значения критического скольжения и критического момента, входящие в (9), соответствуют их номинальным значениям на естественной механической характеристике. Критические значения скольжения и момента на искусственных характеристиках при включении в цепь ротора источника добавочного напряжения не равны таковым для естественной характеристики и зависят от параметров добавочного напряжения, как будет показано ниже.

Из выражения (9) следует, что изменение амплитуды и фазы добавочного напряжения в цепи ротора позволяет регулировать развиваемый двигателем момент и скорость вращения ротора.

Как было указано выше, в асинхронном режиме, независимо могут быть заданы амплитуда напряжения, подведенного к ротору, и его фаза, а его частота всегда равна текущей частоте скольжения (частоте собственной ЭДС ротора). Таким образом, задаваясь значениями U_2^* и δ и подставляя их в выражение (9), возможно построить механические характеристики машины.

Для определения оптимальных параметров напряжения, подведенного к ротору (амплитуды и фазы), проанализируем выражение (9). В соответствии с (9) момент, развиваемый машиной, является функцией трех переменных: скольжения, амплитуды напряжения на роторе и его фазы. Анализ функции трех переменных затруднен, поэтому будем рассматривать скольжение s как параметр, и, соответственно, (9) как функцию двух переменных с параметром:

$$M = f(U_R^*, \delta) = \frac{2M_{KP}}{s_{KP_H} / s + s / s_{KP_H}} \left[1 - \frac{U_R^*}{s} \left(\cos \delta + \frac{s}{s_{KP_H}} \sin \delta \right) \right]. \quad (10)$$

Анализ (10) показывает, что данная функция является периодической по переменной δ с периодом 2π , что позволяет ограничиться при рассмотрении функции только одним периодом ее изменения. Из соображений физической реализуемости достаточно ограничиться рассмотрением интервала изменения фазы $[-\pi \leq \delta \leq \pi]$.

В выражении (10) можно выделить две части:

1) Часть, описывающая естественную механическую характеристику асинхронного двигателя с фазным ротором, к ротору которого не подведено добавочное напряжение $\frac{2M_{KP}}{s_{KP_H} / s + s / s_{KP_H}}$;

2) Часть, описывающую изменение механической характеристики машины при подключе-

нии к ротору источника напряжения $\left[1 - \frac{U_R^*}{s} \left(\cos \delta + \frac{s}{s_{KP_H}} \sin \delta \right) \right]$.

В часть $\left[1 - \frac{U_R^*}{s} \left(\cos \delta + \frac{s}{s_{KP_H}} \sin \delta \right) \right]$ включены два параметра напряжения на роторе – ам-

плитуда (относительная амплитуда) и фаза. Изменение обоих параметров приводит к изменению механической характеристики машины. Примем, как было указано выше, что при напряжении, направленном встречно собственной ЭДС ротора, U_R^* положительна, а при направленном согласно – отрицательна. Тогда из выражения (10) следует, что увеличение амплитуды встречно направленного напряжения на роторе ведет к уменьшению электромагнитного момента при том же скольжении, а увеличение амплитуды согласно направленного напряжения – к его увеличению. Это легко объясняется, если обратиться к схеме замещения машины (рис. 1). Действительно, включение в роторную цепь источника напряжения, направленного встречно собственной ЭДС ротора, приведет к уменьшению тока ротора в соответствии со вторым законом Кирхгофа, а, следовательно – к уменьшению развиваемого двигателем момента. Соответственно, включение согласно направленного напряжения приводит к увеличению тока роторной цепи и росту электромагнитного момента.

Если влияние амплитуды приложенного к ротору напряжения достаточно легко предсказать непосредственно по выражению (10), то анализ влияния изменения фазы этого напряжения требует проведения математического анализа выражения. В рамках этого анализа также можно найти значения амплитуды и фазы, при которых достигаются оптимальные значения электромагнитного момента.

Для нахождения значений переменных U_R^* и δ , при которых значение (10) максимально, необходимо определить точки экстремума функции (10). Поскольку (10) является функцией двух переменных и одного параметра, точки экстремума следует определять с помощью частных производных по указанным переменным. При этом достаточно ограничиться рассмотрением множителя

$$k_y = 1 - \frac{U_R^*}{s} \left(\cos \delta + \frac{s}{s_{KP_H}} \sin \delta \right). \quad (11)$$

Найдем значения фазы δ , при которых (11) принимает максимальные значения. Для этого найдем частную производную (11) по δ , принимая s и U_R^* постоянными, и приравняем ее к 0:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_y}{\partial \delta} &= 0, \\ -\frac{U_R^*}{s_{KP_H}} \cos \delta + \frac{U_R^*}{s} \sin \delta &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Решив уравнение (12) относительно δ , получим условие, определяющее максимум (3.35) по фазе:

$$\delta = \arctg \left(\frac{s}{s_{KP_H}} \right) \quad (13)$$

Найдя производную (12) по амплитуде напряжения, можно прийти к выводу о том, что выражение не имеет экстремума по амплитуде напряжения:

$$\frac{\partial k_y}{\partial U_R^*} = 0. \quad (14)$$

Из (11) – (14) следует, что максимум механической характеристики определяется значением фазы напряжения на роторе, а его максимальное значение зависит от амплитуды.

Фазовая поверхность функции (10) приведена на рис. 2. Как видно по построенной поверхности, величина электромагнитного момента машины определяется амплитудой и фазой добавочного напряжения, при этом при различных комбинациях амплитуды и фазы машина может развивать как положительный, так и отрицательный момент, а, следовательно, работать как в двигательном, так и в тормозном режимах.

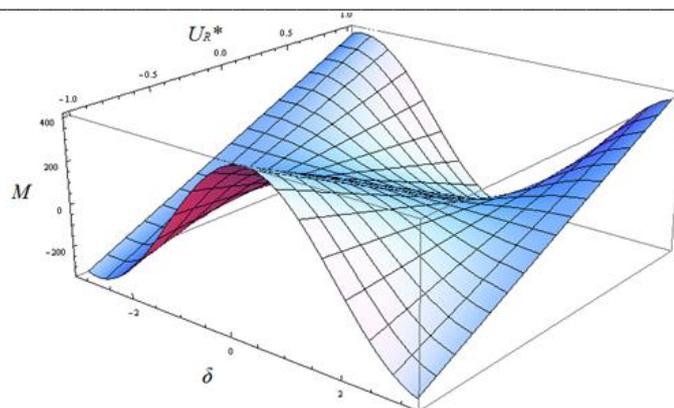


Рис. 2. Фазовая поверхность функции момента машины двойного питания

Основное уравнение движения привода (уравнение д'Аламбера) в общем случае записывается как

$$\pm M \mp M_C = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (15)$$

где M , M_C – электромагнитный момент машины и момент нагрузки соответственно; $\pm M \mp M_C = M_{дин}$ – динамический момент; J – приведенный к ротору машины момент инерции рабочего механизма.

В зависимости от знаков ω и $M_{дин}$ машина может работать в различных квадрантах механической характеристики. Так, например, рассмотрим работу шахтной подъемной установки, диаграмма усилий и тахограмма которой приведены на рис. 3.

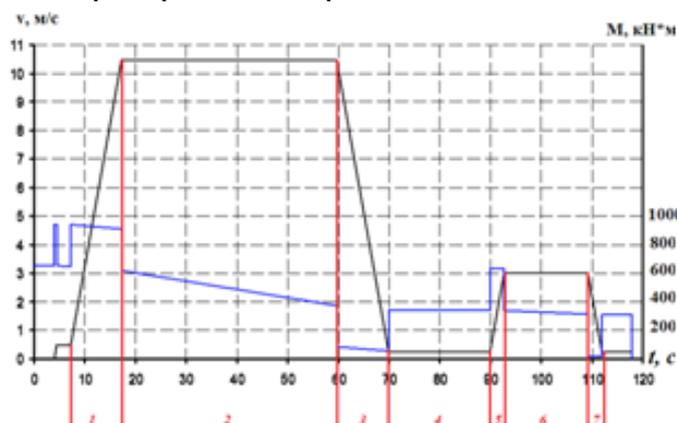


Рис. 3. Типовая тахограмма и диаграмма нагрузки шахтной подъемной установки

Ускорение на участках 1, 5 положительно. В этом случае выражение (15) с учетом знака скорости примет вид:

$$\begin{cases} M_{ДВ} - M_C = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} > 0, \\ \omega > 0. \end{cases} \quad (16)$$

Из выражения (16) следует, что на указанных участках приводной двигатель разгоняется в двигательном режиме.

Ускорение на участках 3, 7 отрицательно, соответственно, выражение (15) примет вид:

$$\begin{cases} -M_{ДВ} - M_C = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} < 0, \\ \omega > 0. \end{cases} \quad (17)$$

В этом случае на указанных участках двигатель работает в тормозном режиме.

На участках 2, 4, 6 ускорение равно 0, выражение (17) примет вид:

$$\begin{cases} M_{ДВ} - M_C = 0, \\ \omega > 0. \end{cases} \quad (18)$$

В этом случае на указанных участках двигатель работает в установившемся двигательном режиме.

Из выражений (15)-(18) следует, что электропривод должен обеспечивать работу в различных режимах, которым соответствуют все координатные квадранты плоскости «скорость-момент».

Механические характеристики экспериментальной МДП на основе двигателя МТФ-111 Н6 приведены на рис. 4.

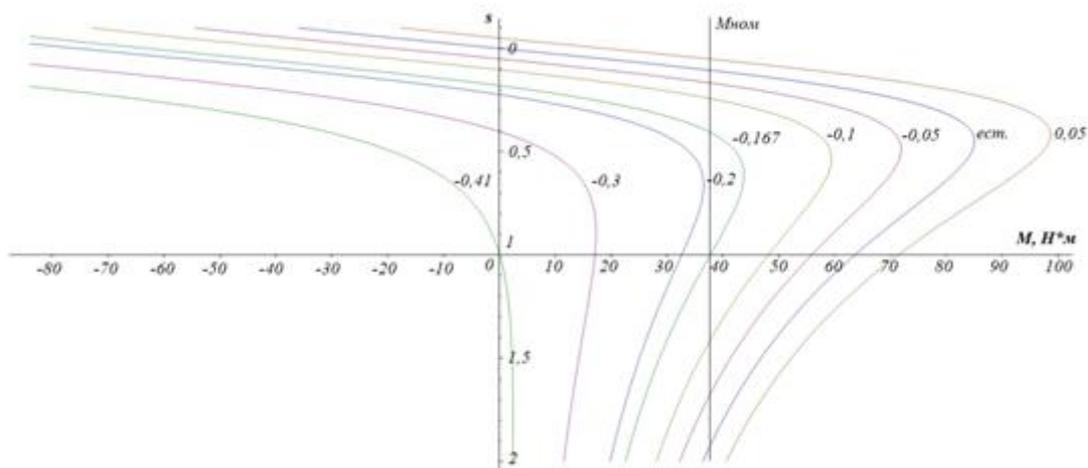


Рис. 4. Семейство механических характеристик МДП на базе двигателя МТФ-111-Н6 при условии максимизации момента по условию (13)

Цифры у характеристик обозначают значение относительного напряжения на роторе, при котором получена соответствующая характеристика. По характеристикам приведенным на рисунке 3 видно, что при максимизации момента по условию (13) рабочие участки механических характеристик машины практически параллельны и жесткость в их пределах сохраняется. По приведенным механическим характеристикам (I и II квадранты) МДП в асинхронном режиме видно, что диапазон регулирования скорости вниз при номинальном моменте нагрузки в двигательном режиме ограничен максимальным значением амплитуды добавочного напряжения на роторе, т.е. чрезмерным падением критического момента машины при достижении амплитуды встречно направленного добавочного напряжения на роторе определенного значения. В общем случае диапазон регулирования скорости вниз зависит от вида естественной механической характеристики АД ФР, на основе которого строится МДП; его максимальная оценка составляет 1:2 – 1:2,5. Как было установлено авторами, сделанные выводы для квадрантов I и II справедливы и для квадрантов III и IV. Для организации работы машины в этих квадрантах необходимо изменение направления вращения магнитного поля статора.

Достижимый в асинхронном режиме диапазон регулирования скорости МДП вполне удовлетворителен для механизмов, не требующих глубокого регулирования скорости (вентиляторов, насосов, компрессоров). Однако этот диапазон недопустимо мал для электропривода шахтных подъемных установок (см. тахограмму на рисунке 3). Для расширения диапазона регулирования скорости МДП целесообразно применять комбинированный режим работы МДП, представляющий собой сочетание асинхронного и синхронного режимов работы машины на различных участках тахограммы.

Библиографический список

1. Онищенко Г. Б. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания / Г. Б. Онищенко, И. Л. Локтева. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
2. Фираго Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2006. – 363 с.
3. Островлянич В.Ю., Поползин И.Ю. Асинхронный электропривод шахтной подъемной установки, построенный по схеме машины двойного питания с комбинированным управлением // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. – 2016. - №3. – с. 303-309.
4. Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.