

УДК 622.233.6.004.13.001.5

АДАПТИВНЫЕ БУРОВЫЕ АГРЕГАТЫ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ.

Часть 3. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ПРИВОДА

А.Я. Пономарёв, А.А. Мясников

Разработана модель адаптивной электромеханической системы с несколькими управляемыми двигателями, включающая самообучающуюся информационно-поисковую систему (ИПС). Система способна определять начало процесса бурения и обеспечивать оптимальные и безаварийные параметры функционирования на всех режимах.

Ключевые слова: адаптивный электромеханический привод; привод с обратной информационной связью; частотное управление асинхронным двигателем.

Основой для создания адаптивных буровых агрегатов-роботов с элементами интеллекта может служить серийно выпускаемая элементная база, включающая: асинхронные двигатели, блоки управления двигателями, цифровые микропроцессоры и т. д.

В качестве двигателей приводов в настоящее время наиболее перспективным следует считать асинхронный короткозамкнутый двигатель, регулируемый по частоте и напряжению силовым тиристорным блоком электропривода переменного тока [1]. Электромеханические характеристики таких двигателей, управляемых тиристорным частотным блоком, показаны на рисунке 1.

Выпускаемые компанией Тошиба (Япония) тиристорные цифровые блоки управления асинхрон-

ными двигателями рассчитаны для мощностей до 8 кВт, что по мощности, крутящему моменту и частотам вращения позволяет использовать их для создания адаптивных систем с элементами интеллекта. В свою очередь номинальные значения напряжений и токов в цепях управления позволяют применять стандартную элементную базу цифровых микровычислительных систем типа "Fattek" (Toshiba), PIC16F, Atmel, Atmega (AVR (США)) и т. д.

Большая "жесткость" семейства естественных характеристик частотнорегулируемого асинхронного привода по сравнению с постоянным и пневматическим двигателями, позволяет получить больший КПД регулируемого привода в широком диапазоне. При высоких частотах питания асинхронного привода, до 400 Гц, при той же самой мощности, можно использовать двигатели меньших габаритов, что весьма существенно при заданных конструктивных ограничениях. Приемлемость подобного привода для грунтопроходческих машин, предназначенных для бестраншейной прокладки коммуникаций и работающих в конструктивно стесненных условиях, очевидна. Кроме того, применение редукторов с большим передаточным отношением – планетарных или волновых – при повышенной частоте питающей сети даёт возможность уменьшения габаритных размеров привода при той же мощности и силовых характеристиках и делает его пригодным для алмазного и шарошечного бурения.

Ротор двигателя вращателя ДВР связан с идентификационным валом шлицевым соединением, обеспечивающим передачу вращающего момента, но допускающим осевое смещение винта относительно ротора. Ротор двигателя вращателя ДВР

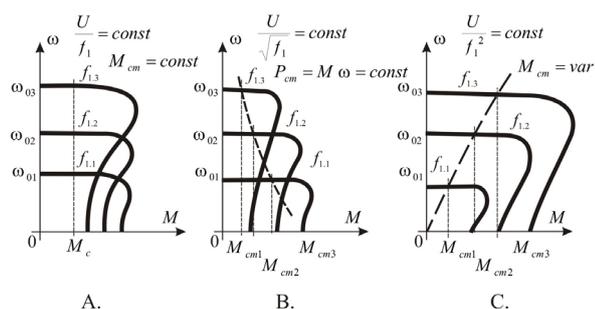


Рисунок 1 – Синтезированные электромеханические характеристики частотно-управляемого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

U – напряжение питания частотного преобразователя;
 f_n – частота сети частотного преобразователя;
 M_{cm} – крутящий момент электродвигателя;
 P_{cm} – усилие подачи привода

Таблица 1 – Весовые параметры элементов привода

Детали адаптивного бурового агрегата	Обозначение на рис. 2	Масса, кг	Обозначение веса на схеме
Винт рабочей подачи		50	G_1
Двигатель рабочей подачи	ДРП	15	G_2
Двигатель идентификационной подачи	ДИП	15	G_3
Каретка		100	G_4
Винт идентификационной подачи		30	G_5
Двигатель вращателя	ДВР	60	G_6
Штанга		60	G_7

(гайка) связан с идентификационным валом (винт) передачей “винт-гайка”, обеспечивающей строго определенное соотношение между углом поворота и осевым перемещением вала, определяемого шагом винтовой нарезки.

Примерные массы отдельных агрегатов электромеханического привода, показанного на рисунке 2, приведены в таблице 1 [1].

Примерные параметры асинхронных двигателей адаптивного привода при разных режимах нагрузки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Примерные параметры асинхронных двигателей адаптивного привода при разных режимах нагрузки

Загрузка, %	25	50	75	100	125
Электродвигатель 4АА63В2У3, $n = 3000 \text{ об/мин}$, $P = 0,55 \text{ кВт}$					
КПД	60,0	75,0	75,0	73,0	68,0
$\cos \varphi$	0,47	0,69	0,80	0,86	0,88
Электродвигатель 4А100S2У3, $n = 3000 \text{ об/мин}$, $P = 4,0 \text{ кВт}$					
КПД	80,0	86,0	88,0	86,5	85,0
$\cos \varphi$	0,6	0,8	0,86	0,89	0,90
Электродвигатель 4А100L4У3, $n = 1500 \text{ об/мин}$, $P = 4,0 \text{ кВт}$					
КПД	79,5	84,5	85,0	84,0	81,5
$\cos \varphi$	0,46	0,68	0,75	0,84	0,86
Электродвигатель 4А71А4У3, $n = 1500 \text{ об/мин}$, $P = 0,55 \text{ кВт}$					
КПД	55,0	67,0	70,5	70,5	67,0
$\cos \varphi$	0,29	0,46	0,59	0,70	0,75

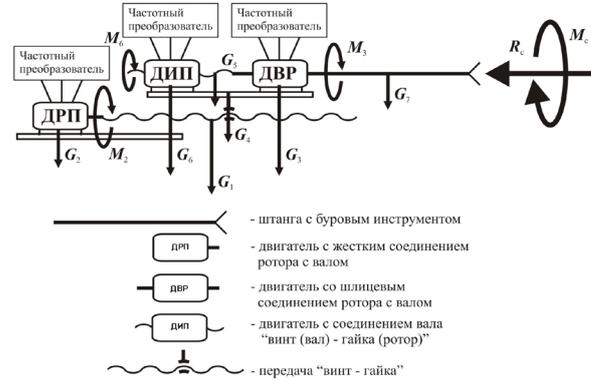


Рисунок 2 – Конструктивно-силовая схема адаптивного привода

Параметры электрических выбранных двигателей адаптивного привода приведены в таблице 3. Мощность двигателя, расходуемая на резание:

$$N_p = \frac{n \cdot M_{кр}}{975 \cdot \eta_{ep}},$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент, кг·м; n – частота вращения двигателя вращения, об/мин; η_{ep} – КПД передачи мощности от двигателя к шпинделю.

Мощность двигателя, расходуемая на подачу:

$$N_n = \frac{n \cdot h \cdot P_n}{60 \cdot 100 \cdot 102 \cdot \eta},$$

где n – частота вращения двигателя подачи, об/мин; h – толщина стружки, см; P_n – сила подачи, кг; η – КПД передачи мощности от двигателя к винту.

Механический момент асинхронного двигателя определяется уравнением Клосса, связывающего момент со скольжением, используемым при расчете пусковых и тормозных режимов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

$$M_m = \frac{2 + q}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + q} M_{кр}, \text{ кг} \cdot \text{ м},$$

где q – определяет геометрические габариты машины; S – скольжение ротора; $S_{кр}$ – значение критического скольжения ротора; $M_{кр}$ – критический (опрокидывающий) момент.

$$M_{кр} = \frac{m_c U_\phi}{\omega_c \frac{r_c + \sqrt{r_c^2 + x_k^2}}{2}}, \text{ кг} \cdot \text{ м},$$

где m_c – число фаз статора; U_ϕ , В – фазное напряжение; r_c , Ом – активное сопротивление статора; x_k , Ом – индуктивное сопротивление при коротком замыкании.

Таблица 3 – Параметры электрических выбранных двигателей адаптивного привода

Двигатель асинхронный	Тип двигателя	Мощность	Частота вращения	Угловая скорость	Масса	Момент инерции ротора	Пусковой момент	Максимальный момент	Критический момент	Номинальный момент	Минимальный момент	Скольжение
		$P, кВт$	$n, об/мин$	$\omega, рад/с$	$m, кг$	$J_{др}, кг \cdot м^2$	$m_{п}, кг \cdot м$	$m_{м}, кг \cdot м$	$M_{к}, кг \cdot м$	$M_{н}, кг \cdot м$	$M_{мин}, кг \cdot м$	$S_{н}, \%$
Вращательное бурение для двигателей с номинальной частотой вращения 1500 об/мин												
Вращателя ДВР	4А100L4У3	4,0	1500	157	4	0,011	2,0	1,6	2,4			4,6
Поддачи ДИП	4А71А4У3	0,55	1500	157	1,5	0,00090	2,0	1,8	2,2			7,3
Рабочей поддачи ДРП	4А71А4У3	0,55	1500	157	1,5	0,00090	2,0	1,8	2,2			7,3
Вращательное бурение для двигателей с номинальной частотой вращения 3000 об/мин												
Вращателя ДВР	4А100S2У3	4	3000	314	4	0,0059	2,0	1,6	2,5			3,4
Поддачи ДИП	4АА63D2Y3	0,55	3000	314	1,5	0,00090	2,0	1,5.2	2,2			8,5
Рабочей поддачи ДРП	4АА63D2Y3	0,55	3000	314	1,5	0,00090	2,0	1,5.2	2,2			8,5

$$x_k = x_c + r_c,$$

где $x_c, Ом$ – реактивное сопротивление статора; $x'_p, Ом$ – приведенное реактивное сопротивление статора.

$q = 2 \frac{r_c}{R'_p} S_{кр}$ определяет геометрические габариты машины, где $R'_p, Ом$ – активное сопротивление ротора; $S_{кр}$ – критическое скольжение; $r_c, Ом$ – активное сопротивление статора.

Скольжение ротора:

$$S = \frac{\omega_c - \omega_0}{\omega_0},$$

где $\omega_0, об/мин$ – номинальная угловая скорость вращения ротора; $\omega_c, об/мин$ – синхронная скорость вращения ротора.

$$S_{кр} = \frac{\omega_{кр} - \omega_0}{\omega_0},$$

где $S_{кр}$ – значение критического скольжения ротора; $\omega_{кр}, об/мин$ – номинальная угловая скорость вращения ротора.

Электромеханический вращающий момент асинхронного двигателя определяется как

$$M_s = \frac{m_c U_\phi^2 \frac{R'_p}{S}}{\omega_c \left[\left(r_c + \frac{R'_p}{S} \right)^2 + (x_c + x'_p)^2 \right]}, кг \cdot м.$$

Эмпирически коэффициент скольжения двигателей привода инструмента при вращательном бурении, который необходимо учитывать в управлении, лежит в диапазоне от 10 до 30 %; коэффициент

полезного действия (КПД) 0,6...0,8; коэффициент передачи активной мощности ($\cos \phi$) – 0,6...0,8.

Практика показывает, что мощность на привод рабочей поддачи каретки и привод идентификационной поддачи примерно в 10 раз меньше мощности привода вращения инструмента.

Номинальный момент электромеханического привода буровой установки

$$M_{ном} = 9570 \frac{P_{ном}}{n_c (1 - S_{ном})}, кг \cdot м,$$

где $P_{ном}, кВт$ – номинальная мощность привода; $n_c, об/мин$ – синхронная скорость вращения; $S_{ном}$ – номинальное скольжение.

Принято считать, что скольжение $S = 1$ при начальном пусковом моменте M_n , при минимальном вращающем моменте $M_{мин}$ скольжения имеет значения в диапазоне 0,7...0,9; при критическом (опрокидывающем) моменте $S = S_{кр}$.

В каталогах принято приводить безразмерные параметры, соответствующие отношениям значений пускового, минимального и максимального моментов к величине номинального момента:

$$m_n = \frac{M_n}{M_{ном}}, m_{мин} = \frac{M_{мин}}{M_{ном}}, m_{кр} = \frac{M_{кр}}{M_{ном}}.$$

Предельно допускаемый момент инерции масс, связанных с валом электродвигателя, приведенный к его оси $I_{д.мах}, кг \cdot м^2$, учитывающий момент сопротивления определяется формулой:

$$I_{д.мах} = k k_m P_{ном}^2 p^\gamma,$$

Таблица 4 – Значения параметров k , k_m , λ , γ для электродвигателей серии 4А

Диапазон высот оси вращения, мм*	k_m при					k	λ	γ
	$m_c = \left(\frac{n}{n_c}\right)^2$	$m_c = \frac{n}{n_c}$	$m_c = 1$	$m_c = 0,9$	$m_c = 0,8$			
50–132	0,90	0,80	0,40	-		0,045	1	2,0
160–250	0,85	0,70	0,20	-				
280			-	0,15				
315–355	0,80	0,65	-	-	0,15			

* параметр, определяемый конструктивным исполнением по способу монтажа двигателей с короткозамкнутым ротором для двигателей серии 4А, см [1, таблица 1.3, рис. 10].

где $P_{ном}$, кВт – номинальная мощность двигателя; p – число пар полюсов двигателя; k – коэффициент нагрузки; k_m – коэффициент максимальной нагрузки; λ , γ – некоторые действительные числа.

Значения k , k_m , λ , γ определяются экспериментально и приводятся в каталогах или справочниках, например, [1] (таблица 4). Коэффициент k_m учитывается при расчете работы двигателей в условиях переменных нагрузок. Одному из таких режимов соответствует *вентиляторная* характеристика (рисунок 1, С), когда статический момент может быть определен формулой

$$m_c = \left(\frac{n}{n_c}\right)^2,$$

где n и n_c , об/мин – соответственно номинальная и синхронные частоты вращения.

Вторым расчетным режимом является случай, когда момент сопротивления постоянный, $m_c = const$, но управление осуществляется изменением питающей частоты (рисунок 1 А).

Третьим является режим линейной зависимости момента сопротивления от частоты вращения (рисунок 1 В):

$$m_c = \frac{n}{n_c}.$$

При отсутствии статического момента сопротивления $m_c = 0$, значение коэффициента равно единице, $k_m = 1$.

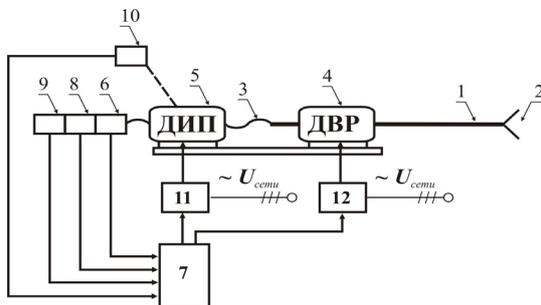


Рисунок 3 – Электрическая схема управления двигателями адаптивного привода

Предельно допускаемый динамический момент инерции можно приближенно определять исходя из увеличения температуры обмотки статора за один пуск θ_n [1]:

$$\theta_n = v_T T_n.$$

Скорость нарастания температуры при пуске v_T , °C/c в первом приближении может быть принята равной начальной скорости нарастания температуры при заторможенном роторе:

$$v_T = \frac{(i_n J)^2}{N},$$

где i_n – пусковой ток; J – момент инерции ротора; $N = 200$, если пуск начат при холодном состоянии двигателя; $N = 165$ – при расчетной рабочей температуре двигателя для изоляционной системы класса нагревостойкости B; $N = 146$ – при расчетной рабочей температуре двигателя, для изоляционной системы класса нагревостойкости F.

Идея заключается в использовании эффекта: при увеличении нагрузки на одном из двигателей происходит падение реактивного сопротивления на его обмотках и, следовательно, к падению напряжения на них. Но, поскольку два двигателя включены последовательно и суммарное напряжение на их обмотках равно напряжению сети, происходит перераспределение напряжений, т. е. в данном случае увеличение напряжения на обмот-

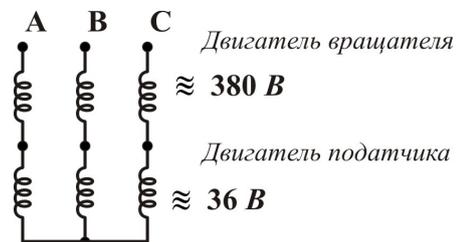


Рисунок 4 – Электрический дифференциал ВПС

ках второго двигателя. Следствием этого является уменьшение его скольжения, т. е. увеличение скорости вращения ротора.

Идею построения системы идентификации физико-механических свойств буримой горной породы при вращательном бурении, обеспечивающую безаварийные режимы работы путем пофазно-последовательного включения обмоток двух асинхронных короткозамкнутых двигателей, работающих на один вал шпинделя, высказал проф. Л.Т. Дворников при постановке задач исследования А.А. Пономареву в 1991 г.

На рисунке 3 показана схема управления двигателями адаптивного привода [2]. Буровая штанга 1 с инструментом 2 жёстко связана с винтом-шпинделем 3. Винт-шпиндель приводится в действие двумя асинхронными двигателями: ДВР 4, передающими вращение шпинделю через шлицевую связь ротора со шпинделем, но допускающими осевое смещение шпинделя относительно ротора; ДИП 5, передающего шпинделю как вращение, так и осевое смещение, поскольку ротор двигателя связан со шпинделем передачей типа “винт (шпиндель) – гайка (ротор двигателя)”. На шпинделе установлен датчик скорости вращения 6, сигнал от которого подается на контроллер блока управления 7. На шпинделе установлены датчики осевого усилия 8 и крутящего момента 9, сигналы от которых также подаются на контроллер 7. Статоры двигателей жестко связаны друг с другом, что

исключает перемещение друг относительно друга. На контроллер подается также сигнал с датчика частоты вращения ротора 10 двигателя подачи. В выходную цепь контроллера 7 введены частотные преобразователи 11 и 12, через которые выходы контроллера электрически связаны со статорами короткозамкнутых асинхронных двигателей вращения 4 и подачи 5.

Двигатель вращателя ДВР имеет рабочее трехфазное переменное напряжение 380 В, а двигатель идентификационной подачи – трехфазное переменное напряжение 36 В (рисунок 4).

Система автоматически осуществляет управление двигателями, одновременно отслеживая заданные режимы работы.

С целью компенсации моментов трения, возникающих в кинематических парах винт-гайка, как в идентификационном, так и в рабочем приводе подачи и настройки главного двигателя (вращателя) на необходимую нагрузку, все сопротивления в кинематических цепях гаек преодолеваются соответственно двигателями идентификационной и рабочей подач (рисунок 4).

Литература

1. Асинхронные двигатели серии 4А / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин и др. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
2. А. с. на изобретение СССР № 1357563. Кл. Е21 С 1/10 / Л.Т. Дворников. 1985.