УДК 62-83

И. В. Шестаков, Н. Р. Сафин

Опыт создания системы управления асинхронным двигателем для гидропривода крано-манипуляторной установки

Представлена математическая модель системы управления асинхронным двигателем для гидропривода крано-манипуляторной установки, реализованная в пакете *Matlab Simulink*. Отмечены особенности выбора частоты широтно-импульсной модуляции и компонентов регулируемого электропривода в зависимости от нагрузочной диаграммы и характеристик нового электродвигателя. Приведены выходные характеристики работы электродвигателя с питанием от источника синусоидального напряжения и преобразователя частоты, являющегося источником модулированного широтно-импульсного напряжения.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, контроллер, скалярное управление, широтно-импульсная модуляция.

Области использования крано-манипуляторных установок (КМУ) достаточно широки и включают в себя промышленное производство, энергетику, строительство и т. д. Благодаря своей универсальности большинство таких установок является машинами двойного назначения [1]: они могут быть использованы в составе транспортно-заряжающих машин артиллерийских и ракетных комплексов, инженерных машин для прокладки колонных путей и дорог, оборудования артиллерийских и ракетных огневых позиций, командных пунктов и др. В данной статье под КМУ понимается крановый механизм военного назначения, использующийся для последовательного перезаряжания пусковых (ПУ) и пуско-заряжающих установок (ПЗУ). КМУ состоит из следующих основных частей, связанных между собой кинематическими связями: базы, поворотного основания, стойки, стрелы, телескопической части и оголовки (лебедки) (рис. 1).

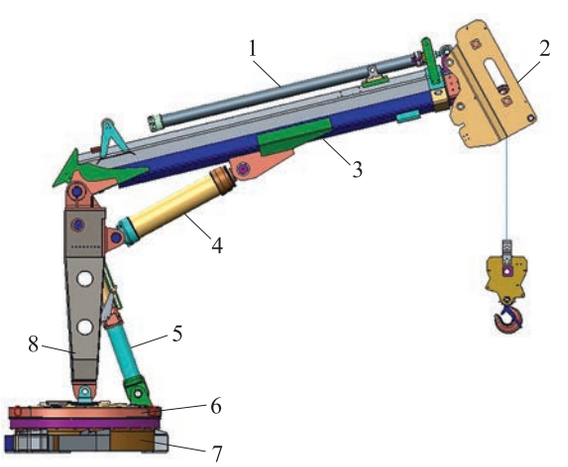


Рис. 1. Внешний вид КМУ: 1 – телескопическая часть; 2 – лебедка; 3 – стрела; 4 – выведение стрелы; 5 – выведение стойки в рабочее положение; 6 – поворотное основание; 7 – база; 8 – стойка

В самоходных грузоподъемных агрегатах распределение потока энергии от первичного двигателя и регулирование траекторий движения исполнительных механизмов с различной нагруженностью осуществляется воздействием на гидравлическую часть, в состав которой вводятся гидрораспределительное и регулирующее (дросселирующее) оборудование. В частности, на рис. 2 в качестве примера представлена работа такого гидропривода КМУ в динамике. При различных режимах возникают повышенные пульсации в гидросистеме, приводящие к местным потерям различного рода и ненужному нагреву, а это, в свою очередь, снижает эффективность, срок службы и, главное, надежность гидропривода КМУ военной техники (ВТ). В данном КМУ (патент РФ на полезную модель № 162251) в приводе применяется новый тяговый асинхронный двигатель (АД) (получен патент РФ на полезную модель № 184734) с характеристиками: мощность P_N = 15 кВт (P_{max} = 18 кВт); фазное напряжение U_{sN} = 127 В; фазный ток I_{sN} = 50,38 А; частота питающего напряжения f_N = 400 Гц; КПД η_N = 0,8651; коэффициент мощности $\cos\varphi_N$ = 0,8351; число пар полюсов z_p = 4; скольжение β_N = 0,0269; скорость вращения ротора Ω_N = 611,42 рад/с.

При условии сохранения общей гидравлической схемы трансмиссии рациональным решением представляется переход от дроссельного (дискретного) вида регулирования

© Шестаков И. В., Сафин Н. Р., 2018

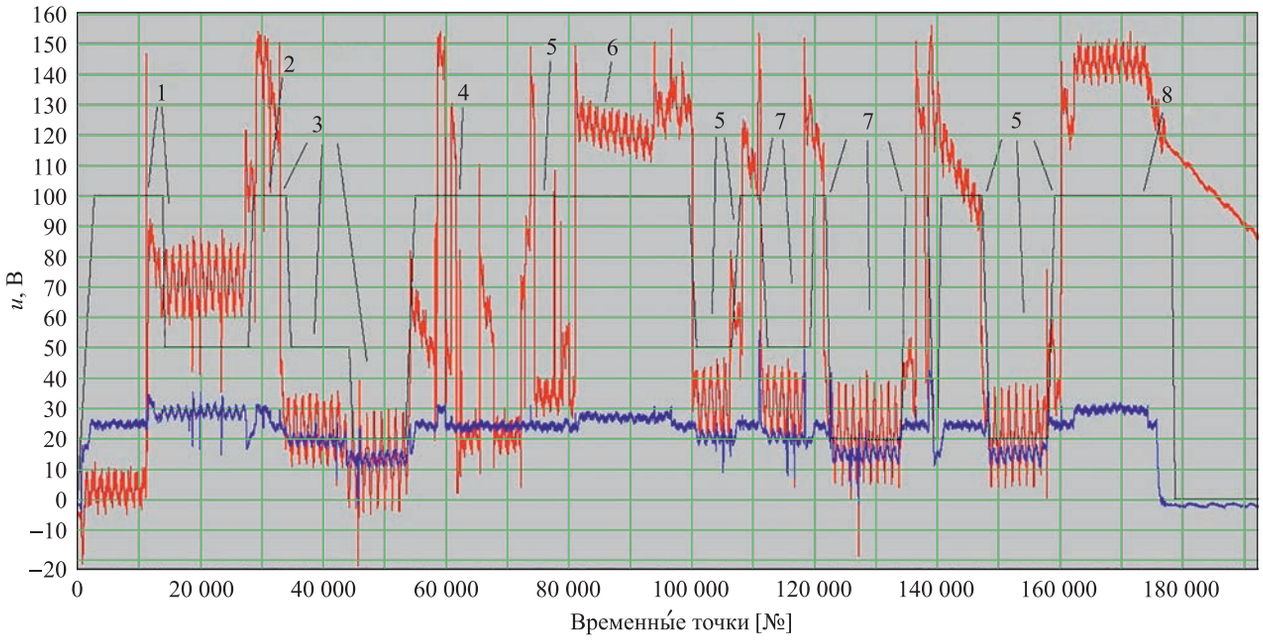


Рис. 2. Динамика работы гидропривода КМУ:
– сигнал о давлении гидроцилиндра стрелы; – сигнал о давлении гидроцилиндра поворота; 1 – подъем груза; 2 – опускание и подъем стрелы с грузом; 3 – опускание груза; 4 – манипуляция крана с крюком 50 кг; 5 – поворот основания; 6 – подъем качающейся части; 7 – поворот платформы; 8 – опускание качающейся части

к объемному регулированию, для реализации которого необходим привод насосной станции, регулируемый по скорости. Решение этой задачи оказывается возможным на основе использования АД, подключаемого к электрическому генератору трансмиссии через преобразователь частоты (ПЧ) – контроллер.

Внедрение ПЧ позволяет получить необходимый для крановых механизмов диапазон регулирования скорости (1:5–1:10) как в двигательном, так и в тормозном режимах работы. Повышается удобство управления краном, существенно увеличивается ресурс механических передач, тормозов и металлоконструкций из-за снижения динамических нагрузок при пусках и торможениях механизмов [2]. Для достижения этой цели в данной работе выполняется моделирование системы управления АД для гидропривода КМУ.

Проектирование частотно-регулируемого электропривода для крановых механизмов зачастую проводится интуитивно, без четкого обоснования выбора основных компонентов электропривода [2]. В данном случае выбор основных компонентов электропривода выполнялся на базе основных параметров (мощность, напряжение и ток) приводного АД и нагрузочной диаграммы, а также на основе теплового расчета силового модуля (выходит за рамки настоящей статьи).

В настоящее время на российском рынке превалируют импортные ПЧ. В связи со сложившейся внешнеполитической обстановкой в стране взят курс на импортозамещение. Соответственно, для расширения доли рынка российскими производителями требуется разработка отечественных конструкций и систем управления для КМУ [3]. С учетом военной специфики применения к контроллеру должны быть предъявлены значительно повышенные требования (согласно комплексам государственных военных стандартов «Климат-6» и «Мороз-7»).

На основе сопоставления достоинств и недостатков разных типов ПЧ [4] принимаем, что наиболее целесообразным является вариант двухзвенного преобразователя частоты (ДПЧ) с промежуточным звеном постоянного тока и автономным инвертором напряжения (АИН).

В данной работе при математическом моделировании используется система базисных величин (для обеспечения общности результатов моделирования и внесения рационального масштабирования уравнений), в долях от ко-

торых выражаются параметры и переменные состояния АД. Используя методику, представленную в работах [4, 5], приведем результаты расчета базисных величин (табл. 1).

При проектировании системы управления АД необходима информация о его параметрах для представления ее в виде Т-образной схемы замещения. Согласно источнику [5], были определены параметры схемы замещения и электромеханической модели электродвигателя, а результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты расчета базисных величин

Наименование базисной величины	Формула	Значение	Единицы измерения
Напряжение	$U_б = \sqrt{2}U_{sN}$	179,6	В
Ток	$I_б = \sqrt{2}I_{sN}$	71,25	А
Угловая частота	$\Omega_б = \Omega_{sN} = 2\pi f_N$	2513,274	рад/с
Скорость ротора	$\Omega_{rб} = \Omega_б / z_p$	628,32	рад/с
Потокосцепление	$\Psi_б = U_б / \Omega_б$	0,0715	Вб
Сопротивление	$Z_б = U_б / I_б$	2,521	Ом
Индуктивность	$L_б = \Psi_б / I_б$	$1{,}003 \cdot 10^{-3}$	Гн
Момент	$M_б = P_б z_p / \Omega_б$	24,74	Н·м
Мощность	$P_б = M_p \Omega_{rб}$	15544,1	Вт

Таблица 2

Результаты расчета параметров схемы замещения и электромеханической модели АД

Наименование	Система физических единиц			Система относительных единиц	
	Обозначение	Значение	Единицы измерения	Обозначение	Значение
Активное сопротивление обмотки статора	R_s	0,0412	Ом	r_s	0,02
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора	$X_{s\sigma}$	0,2186	Ом	$x_{s\sigma}$	0,0867
Индуктивность рассеяния обмотки статора	$L_{s\sigma}$	0,0867	мГн	$l_{s\sigma}$	0,0867
Активное сопротивление обмотки ротора	R_r	0,0743	Ом	r_r	0,0289
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора	$X_{r\sigma}$	0,1887	Ом	$x_{r\sigma}$	0,0749
Индуктивность рассеяния обмотки ротора	$L_{r\sigma}$	0,075	Ом	$l_{r\sigma}$	0,0749
Номинальное индуктивное сопротивление намагничивания	X_{mN}	5,7	Ом	x_{mN}	2,261
Номинальная индуктивность намагничивания	L_{mN}	2,27	мГн	l_{mN}	2,261
Номинальное скольжение	β_N	0,0269	–	β_N	0,0269
Коэффициенты уравнений модели электродвигателя	ζ_N	1,215	–	ζ_N	1,215
	K_s	0,9631	–	k_s	0,9631
	K_r	0,968	–	k_r	0,968
	$L_{\sigma э}$	0,165	мГн	$l_{\sigma э}$	0,1645
	A_r	31,16	$с^{-1}$	α_r	0,0124

Для разработки системы управления АД для гидропривода КМУ необходимо математическое моделирование режимов работы АД, происходящие в несколько этапов:

• прямое преобразование входных воздействий (фазных напряжений статора) к вращающейся системе координат;

• решение системы уравнений электромагнитных контуров (токов и потокосцеплений), записанных для переменных во вращающейся двумерной свободно ориентированной системе координат;

• вычисление электромагнитного момента электродвигателя;

• обратное преобразование переменных состояния электромагнитных контуров к фазным значениям для согласования модели АД с моделью АИН, которая записывается относительно мгновенных значений фазных величин.

Для реализации этих этапов электромеханическая модель АД должна включать соответствующие уравнения, которые рассмотрены далее.

Преобразование координат переменных АД включает два этапа. На первом этапе фазные напряжения преобразуются в неподвижную относительно статора двумерную ортогональную систему координат в соответствии с выражениями:

$$U_{s\alpha} = \left(2U_{sa} - U_{sb} - U_{sc}\right)/3;$$

$$U_{s\beta} = \left(U_{sb} - U_{sc}\right)/\sqrt{3},$$

где $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$ – мгновенные значения преобразованных переменных в системе координат;

U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} – мгновенные значения фазных напряжений на зажимах статора АД.

На втором этапе выполняется переход к вращающейся со скоростью ω_k системе координат $0xy$, угол поворота которой относительно неподвижной системы обозначается θ_k. На этом этапе используются формулы:

$$U_{sx} = \rho_x U_{s\alpha} + \rho_y U_{s\beta};$$

$$U_{sy} = -\rho_y U_{s\alpha} + \rho_x U_{s\beta},$$

где U_{sx}, U_{sy} – мгновенные значения преобразованных переменных в системе координат $0xy$;

$\rho_x = \cos\theta_k$, $\rho_y = \sin\theta_k$ – координатные функции. При этом $p\theta_k = \omega_k$.

Преобразованная к двумерной, свободно ориентированной системе координат система уравнений электромагнитных контуров АД в физических единицах [4]:

$$U_{sx} = R_s I_{sx} + p\Psi_{sx} - \Omega_k \Psi_{sy};$$

$$U_{sy} = R_s I_{sy} + p\Psi_{sy} + \Omega_k \Psi_{sx};$$

$$0 = R_r I_{rx} + p\Psi_{rx} - \left(\Omega_k - \Omega\right)\Psi_{ry};$$

$$0 = R_r I_{ry} + p\Psi_{ry} + \left(\Omega_k - \Omega\right)\Psi_{rx};$$

$$\Psi_{sx} = L_s I_{sx} + L_m I_{rx};$$

$$\Psi_{sy} = L_s I_{sy} + L_m I_{ry};$$

$$\Psi_{rx} = L_r I_{rx} + L_m I_{sx};$$

$$\Psi_{ry} = L_r I_{ry} + L_m I_{sy};$$

$$I_{mx} = I_{sx} + I_{rx};$$

$$I_{my} = I_{sy} + I_{ry};$$

$$\Psi_{mx} = L_m I_{mx};$$

$$\Psi_{my} = L_m I_{my},$$

где R_s, R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора;

p – оператор дифференцирования по относительному времени;

Ψ_{sx}, Ψ_{sy} – потокосцепления статора по осям x, y;

Ω – скорость вращения ротора;

I_{rx}, I_{ry} – токи ротора по осям x, y;

Ψ_{rx}, Ψ_{ry} – потокосцепления ротора по осям x, y;

Ω_k – скорость вращения системы координат;

L_s – полная индуктивность обмотки статора, $L_s = L_m + L_{s\sigma}$;

$L_{s\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмоток статора;

L_m – главная индуктивность;

L_r – полная индуктивность обмотки ротора, $L_r = L_m + L_{r\sigma}$;

$L_{r\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмоток ротора;

Ψ_{mx}, Ψ_{my} – главные потокосцепления по осям x, y;

I_{rx}, I_{ry} – токи намагничивания по осям x, y.

При вычислении электромагнитного момента АД используется соотношение [4]:

$$M = \zeta_N \left(\Psi_{ry} I_{sx} - \Psi_{rx} I_{ry} \right),$$

где ζ_N – нормирующий энергетический коэффициент, равный отношению полной мощности на зажимах обмотки статора S_N к электромагнитной мощности АД P_N.

В системе относительных единиц уравнения электромагнитных контуров АД следующие:

$$u_{sx} = r_s i_{sx} + p\psi_{sx} - \omega_k \psi_{sy}; \quad (1)$$

$$u_{sy} = r_s i_{sy} + p\psi_{sy} + \omega_k \psi_{sx}; \quad (2)$$

$$0 = r_r i_{rx} + p\psi_{rx} - (\omega_k - \omega)\psi_{ry}; \quad (3)$$

$$0 = r_r i_{ry} + p\psi_{ry} + (\omega_k - \omega)\psi_{rx}; \quad (4)$$

$$\psi_{sx} = l_s i_{sx} + l_m i_{rx}; \quad (5)$$

$$\psi_{sy} = l_s i_{sy} + l_m i_{ry}; \quad (6)$$

$$\psi_{rx} = l_r i_{rx} + l_m i_{sx}; \quad (7)$$

$$\psi_{ry} = l_r i_{ry} + l_m i_{sy}; \quad (8)$$

$$i_{mx} = i_{sx} + i_{rx}; \quad (9)$$

$$i_{my} = i_{sy} + i_{ry}; \quad (10)$$

$$\psi_{mx} = l_m i_{mx}; \quad (11)$$

$$\psi_{my} = l_m i_{my}, \quad (12)$$

где l_m – переменный коэффициент, имеющий смысл динамической намагничивающей индуктивности, который определяется по кривой намагничивания по формуле (13).

Для получения корректных результатов математического моделирования режимов частотного управления АД требуется учет нелинейности характеристики намагничивания электродвигателя, т. е. насыщения главной магнитной цепи. Для этого в процессе решения уравнений электромагнитных контуров необходимо определять значения главного потокосцепления, определяющего значение коэффициента взаимоиндукции обмоток статора и ротора. В практических расчетах используют аппроксимацию нелинейной зависимости l_m от главного потокосцепления ψ_m следующим выражением:

$$l_m = \frac{1}{\left(g_1 + g_2 \psi_m^2 + g_3 \psi_m^4 + g_4 \psi_m^6 \right)}, \quad (13)$$

где g_1, g_2, g_3, g_4 – коэффициенты полиномиальной аппроксимации кривой намагничивания электродвигателя $i_m = f(\psi_m)$.

При учете насыщения (в стали статора и ротора) уравнение связи для данной системы выглядит следующим образом [4]:

$$\psi_m + l_{r\sigma} i_m = \sqrt{(\psi_{rx} + l_{r\sigma} i_{sx})^2 + (\psi_{ry} + l_{r\sigma} i_{sy})^2}.$$

Потери в стали ротора (для учета суммарных магнитных потерь) учитывались аналитически [5].

В системе уравнений переменных «потокосцепления статора – потокосцепления ротора» уравнения электромагнитных контуров в относительных единицах имеют вид [5]:

$$p\psi_{sx} = u_{sx} - \alpha_{s\sigma}\psi_{sx} + \omega_k \psi_{sy} + \alpha_{s\sigma} k_r \psi_{rx}; \quad (14)$$

$$p\psi_{sy} = u_{sy} - \alpha_{s\sigma}\psi_{sy} - \omega_k \psi_{sx} + \alpha_{s\sigma} k_r \psi_{ry}; \quad (15)$$

$$p\psi_{rx} = 0 - \alpha_{r\sigma}\psi_{rx} + (\omega_k - \omega)\psi_{ry} + \alpha_{t\sigma} k_s \psi_{sx}; \quad (16)$$

$$p\psi_{ry} = 0 - \alpha_{r\sigma}\psi_{ry} - (\omega_k - \omega)\psi_{rx} + \alpha_{t\sigma} k_s \psi_{sy}, \quad (17)$$

где $k_r = 1/(1 + l_{r\sigma}/l_m)$ – коэффициент связи ротора;

$\alpha_{s\sigma} = r_s / l_{s\text{э}}$, $\alpha_{r\sigma} = r_r / l_{r\text{э}}$;

$k_s = 1/(1 + l_{s\sigma}/l_m)$ – коэффициент связи статора.

Для расчета токов АД и электромагнитного момента в относительных единицах

$$i_{sx} = (\psi_{sx} - k_r \psi_{rx}) / l_{s\text{э}}; \quad (18)$$

$$i_{sy} = (\psi_{sy} - k_r \psi_{ry}) / l_{s\text{э}}; \quad (19)$$

$$i_{rx} = (\psi_{rx} - k_s \psi_{sx}) / l_{r\text{э}}; \quad (20)$$

$$i_{ry} = (\psi_{ry} - k_s \psi_{sy}) / l_{r\text{э}}; \quad (21)$$

$$m = \zeta_N (\psi_{sy} \psi_{rx} - \psi_{sx} \psi_{ry}) / l_{\sigma\text{э}}, \quad (22)$$

где $l_{\sigma э}$ – коэффициент потокосцепления [4], $l_{\sigma э} = l_{s\sigma} + l_{r\sigma} + l_{s\sigma} l_{r\sigma} / l_m$.

В системе уравнений переменных «токи статора – потокосцепления ротора» уравнения электромагнитных контуров имеют вид [4]:

$$l_{sэ}\, pi_{sx} = u_{sx} - r_{sэ} i_{sx} + \alpha'_r \psi_{rx} + \omega k_r \psi_{ry} + \omega_k l_{sэ} i_{sy}; \quad (23)$$

$$l_{sэ}\, pi_{sy} = u_{sy} - r_{sэ} i_{sy} + \alpha'_r \psi_{ry} - \omega k_r \psi_{rx} - \omega_k l_{sэ} i_{sx}; \quad (24)$$

$$p\psi_{rx} = k_r r_r i_{sx} - \alpha_r \psi_{rx} + \omega_k \psi_{ry} - \omega \psi_{ry}; \quad (25)$$

$$p\psi_{ry} = k_r r_r i_{sy} - \alpha_r \psi_{ry} - \omega_k \psi_{rx} + \omega \psi_{rx}, \quad (26)$$

где $l_{sэ} = l_{s\sigma} + k_r l_{r\sigma}$;

$$r_{sэ} = r_s + k_r^2 r_r + p k_r l_{r\sigma};$$

$$\alpha'_r = k_r \alpha_r - p k_r;$$

$$k_r = 1/(1 + l_{r\sigma} / l_m);$$

$$\alpha_r = k_r r_r / l_m.$$

Уравнения (1)–(12), (14)–(26) в относительных единицах закладываются в блоках электромеханической модели (*AM Model_no_iteration, Static moment*) системы управления АД в пакете *Matlab Simulink* (рис. 3).

Математическая модель АИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) для построения в пакете Matlab Simulink была реализована на основе уравнений векторно-матричных форм и связывающих мгновенные значения входных, промежуточных и выходных переменных трехфазного мостового полупроводникового коммутатора с системой управления [4, 5]. Модель ПЧ была построена с учетом компенсации влияния падения напряжения на ключах АИН и «мертвого времени» [4].

Выбор принципа управления определяется совокупностью требований к электроприводу. Электропривод кранового механизма должен ограничивать ускорение до допустимых пределов при минимальной длительности переходных процессов, а также иметь жесткие механические характеристики, чтобы скорость мало зависела от нагрузки. Скалярный принцип управления является наиболее практичным в асинхронном электроприводе ввиду

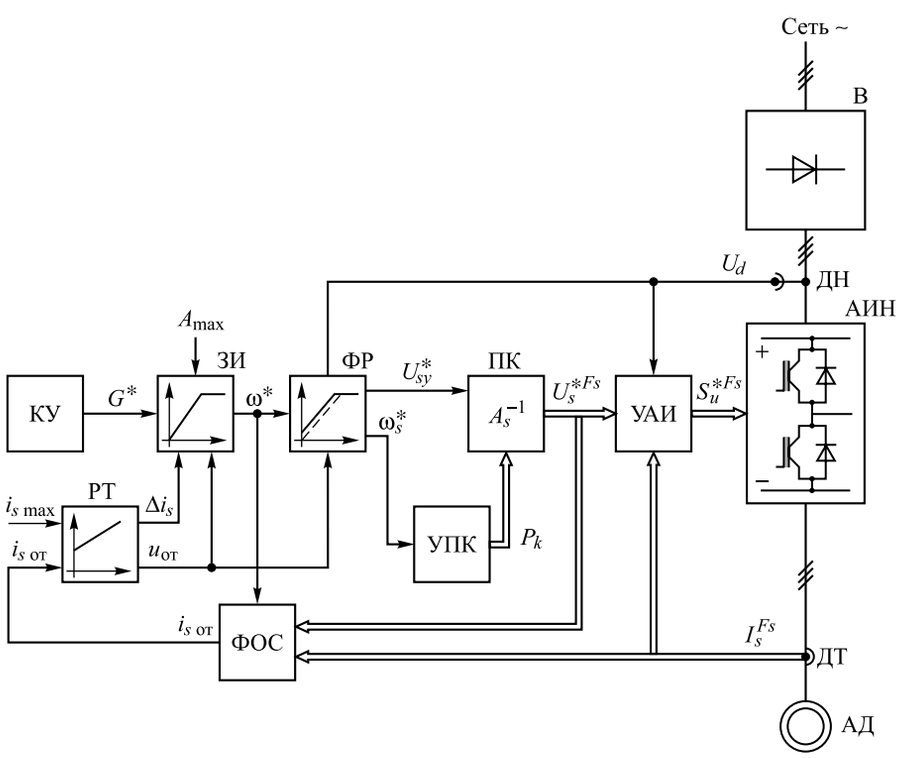


Рис. 3. Структурная схема скалярной системы управления АД гидропривода КМУ:
КУ – командное устройство; ЗИ – задатчик интенсивности; ФР – формирователь режимов; ПК – преобразование координат; УПК – блок управления преобразователем координат; УАИ – блок управления АИН; ФОС – блок формирования сигнала обратной связи по току статора; РТ – регулятор тока статора

простоты измерения и регулирования переменных АД. Управляемость АД при этом может обеспечиваться совместным регулированием либо частоты и напряжения, либо частоты и тока статорной обмотки. Первый способ управления принято трактовать как частотное управление, второй – как частотно-токовое управление [6]. При частотно-токовом управлении АД питается от ПЧ, работающего в режиме источника тока, как правило, реализуемого на основе автономного инвертора тока (АИТ). Положительные свойства АД при его питании от ПЧ на базе АИТ могут быть реализованы лишь в замкнутой системе с использованием датчика скорости [6]. В тяжелых условиях эксплуатации наличие датчика скорости снижает определенную надежность и лимитирует область применения (в условиях ограниченного пространства). При использовании частотного управления, изменение скорости АД достигается путем воздействия на частоту напряжения на статоре при одновременном изменении модуля (амплитуды) этого напряжения. В системе регулирования электроприводом закладывается определенное соотношение между амплитудой и частотой напряжения на зажимах обмотки статора, основой для которых является закон пропорционального частотного управления (U / f-регулирование). При формировании данного закона учитываются особенности [5]: при понижении частоты (в сравнении с номинальной) следует пропорционально уменьшать амплитуду питающего напряжения статора, так как это предотвращает насыщение главной магнитной цепи АД (перегрев); увеличение частоты при неизменной амплитуде напряжения приводит к уменьшению магнитного потока, т. е. ослаблению магнитного поля АД во второй зоне регулирования скорости.

Оптимальный выбор частоты модуляции ШИМ является вариационной задачей.

Увеличение частоты ШИМ дает ряд положительных эффектов: повышает динамическую точность воспроизведения широтно-импульсными модуляторами входных задающих воздействий (в системах частотного управления это переменные величины, изменяющиеся не только в переходных, но и в установившихся режимах работы); уменьшает амплитуды модуляционных пульсаций токов, потокосцеплений и электромагнитного момента АД, а также зависящие от них составляющие модуляционных потерь в электродвигателе и цепи питания; создает условия для повышения быстродействия и их использования для управления технологическими процессами с повышенными требованиями к электроприводу.

Вместе с этим повышение частоты ШИМ усугубляет ряд отрицательных эффектов, а именно: вследствие повышения частоты коммутаций пропорционально увеличиваются коммутационные потери в АИН и снижается его допустимая полезная мощность; увеличиваются действующие значения емкостных токов в кабелях питания и элементах конструкции АД; усложняется проблема ограничения перенапряжений от наложения блуждающих электромагнитных волн в цепи нагрузки.

Уменьшение частоты ШИМ дает обратный эффект – снижает коммутационные потери, увеличивает полезную мощность АИН, уменьшает потери от емкостных токов и упрощает задачу ограничения перенапряжений от блуждающих волн. Однако при этом сужается диапазон рабочих частот, возрастают пульсации токов, потокосцеплений и электромагнитного момента и уровень акустического давления при работе АД. Для снижения этих факторов требуются материальные затраты на дополнение ПЧ выходными фильтрами и ухудшается использование выходного напряжения преобразователя.

На рис. 4 приведена структурная схема скалярной системы управления электроприводом гидрогенератора электрогидравлической трансмиссии КМУ в программном обеспечении (ПО) *Matlab Simulink*. Используется решатель *ode*23 (*Bogacki-Shampine*). Шаг интегрирования 0,000001 с. Построенная модель позволяет моделировать режим работы АД при питании от источника синусоидального напряжения (*NOT INVERTER*) и ПЧ (*INVERTER*). В структурной схеме ЗИ (блок *Intensity Control Device*) представляет собой нелинейное устройство, которое включается в цепь задания регулируемых величин и ограничивает темп (интенсивность) изме-

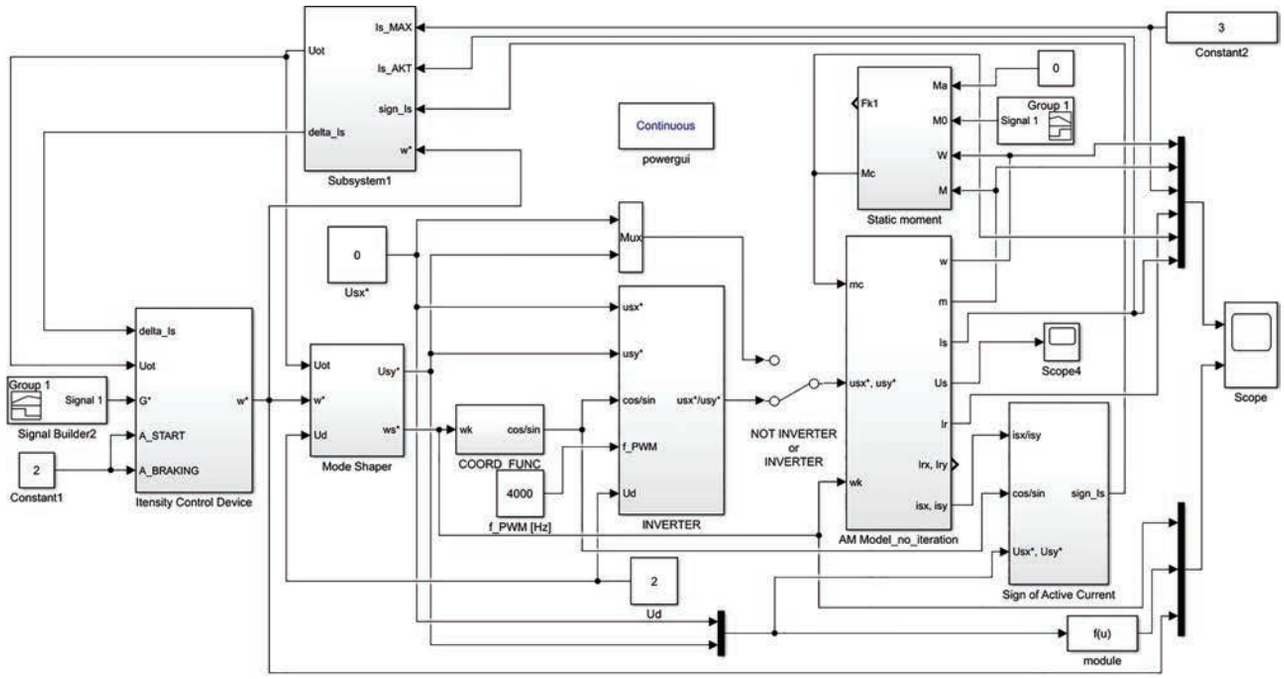
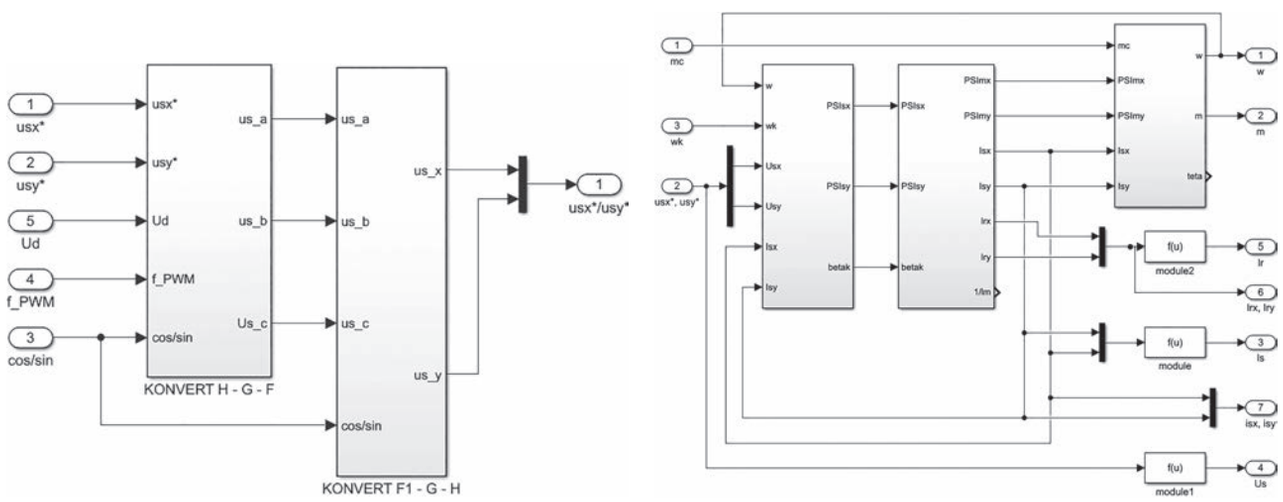


Рис. 4. Структурная схема скалярной системы управления АД в пакете *Matlab Simulink*

нения во времени сигнала задания на входе системы регулирования. ЗИ формирует плавное изменение задающего воздействия по внешнему командному сигналу, поступающего с командного устройства. В структурной схеме формирователь режимов (блок *Mode Shaper*) позволяет задать необходимый закон частотного управления, т. е. зависимость амплитуды питающего АД напряжения от частоты. Также в структурной схеме для формирования сигнала отсечки по току используются блоки *Sign of Active Current* и *Subsystem1*.

На рис. 5 представлены структурная схема подсистемы ПЧ (блок *INVERTER*, см. рис. 4) и структурная схема подсистемы АД (блок AM Model_no_iteration, см. рис. 4). В модели управляемыми переменными состояниями электропривода являются модуль вектора напряжений на зажимах обмотки статора и угловая частота вращения этого вектора относительно статора. На рис. 5 внутри подсистем ПЧ и АД определены уравнения математической модели в относительных единицах по данным из табл. 1 и 2.



а б

Рис. 5. Структурные схемы в пакете *Matlab Simulink*:
а – подсистемы ПЧ; б – подсистемы АД

В математической модели системы управления АД гидропривода КМУ реализуется условный тестовый график работы электропривода, включающий, согласно экспериментальным данным (см. рис. 2): частотный пуск до номинальной частоты и амплитуды питающего напряжения (0...0,5 с); холостой ход – $0{,}2m_N$ (0,5...1,0 с); опускание каната лебедки – $0{,}225m_N$ (1,0...2,5 с); подъем груза – $0{,}425m_N$ (2,5...4,5 с); опускание стрелы с грузом – $0{,}625m_N$ (4,5...6,0 с); подъем стрелы с грузом – $0{,}7m_N$ (6,0...8,0 с); опускание груза – $0{,}35m_N$ (8,0...9,5 с) и $0{,}25m_N$ (9,5...11,0 с); манипуляции крана с крюком весом 50 кг – $0{,}3m_N$ (11,0...12,0 с), $0{,}275m_N$ (12,0...13,0 с) и $0{,}3m_N$ (13,0...14,0 с); поворот основания – $0{,}4m_N$ (14,0...16,0 с); подъем качающейся части – $0{,}75m_N$ (16,0...18,0 с); поворот основания – $0{,}4m_N$ (18,0...20,0 с).

На рис. 6 и 7 приведены выходные характеристики АД гидропривода КМУ с условным тестовым циклом при питании АД от ПЧ с частотой ШИМ ($f_{\text{ШИМ}}$), равной 1 и 4 кГц (также были получены выходные характеристики при $f_{\text{ШИМ}}$, равной 2 и 8 кГц). На графиках приведены кривые: тока статора, тока ротора,

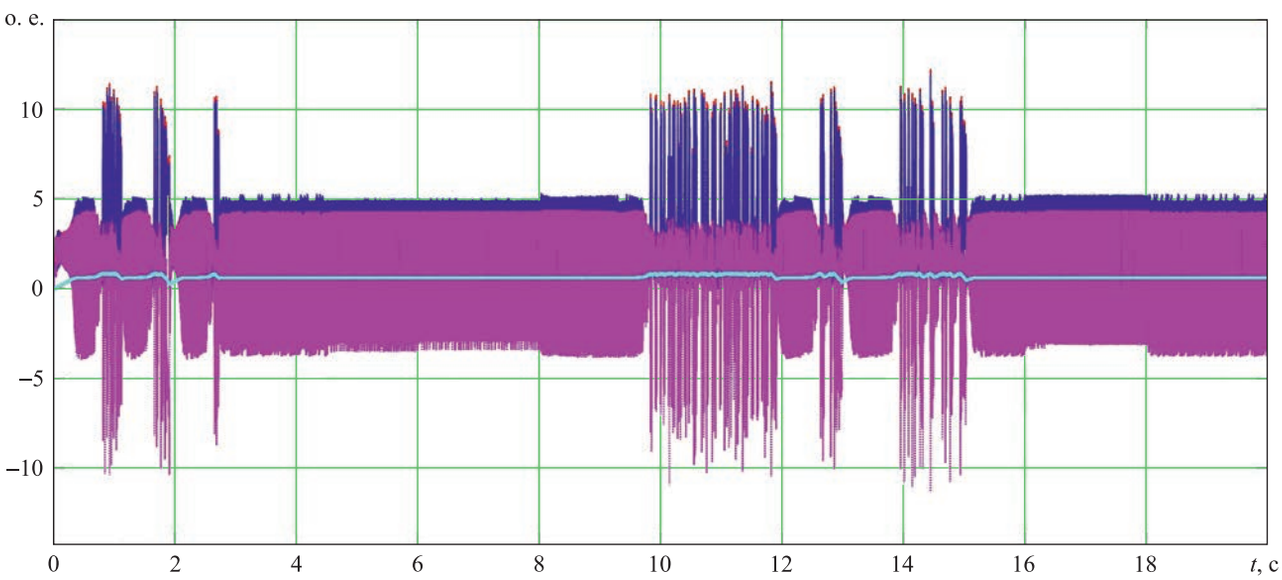


Рис. 6. Выходные характеристики АД при питании от ПЧ с частотой ШИМ $f_{\text{ШИМ}}$ = 1 кГц:
– ток статора; – ток ротора; – электромагнитный момент; – частота напряжения

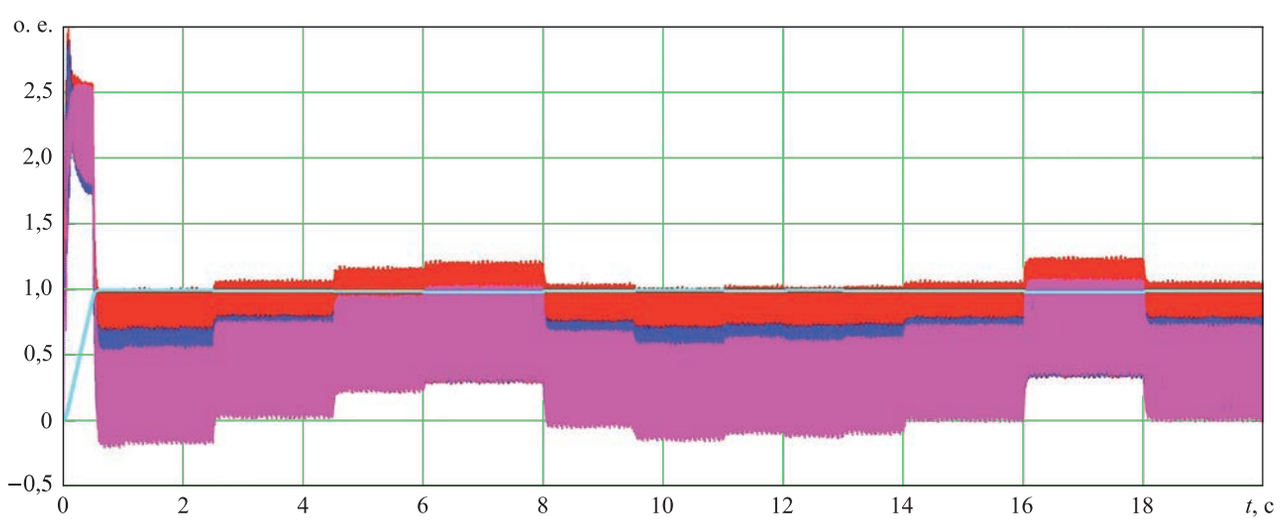


Рис. 7. Выходные характеристики АД при питании от ПЧ с частотой ШИМ $f_{\text{ШИМ}}$ = 4 кГц:
– ток статора; – ток ротора; – электромагнитный момент; – частота напряжения

электромагнитного момента и частоты напряжения. Значения по оси ординат отмечены в относительных единицах (о. е.), по оси абсцисс приведено время в секундах.

Ввиду импульсного характера питающего напряжения появляются высокочастотные пульсации токов статора и, соответственно, составляющие электромагнитного момента с основными высшими гармониками в области 2...6 кГц (рис. 8). Причем с изменением нагрузки размах пульсаций несколько варьируется, что особенно видно при работе АД от ПЧ с частотой ШИМ 1 кГц (см. рис. 6 и 8). В относительно нагруженных режимах, например подъем стрелы с грузом (6,0...8,0 с) и подъем качающейся части (16,0...18, 0 с), размах пульсаций электромагнитного момента ниже, чем при работе в малонагруженных режимах, в том числе холостой ход (0,5...1,0 с), опускание каната лебедки (1,0...2,5 с) и манипуляции крана с крюком весом 50 кг (11,0...14,0 с), в которых амплитуды пульсаций токов статора и электромагнитного момента АД местами превышают 10 о. е.

В табл. 3 приведены количественные результаты спектрального анализа при питании АД от ПЧ с частотами ШИМ 1, 2, 4 и 8 кГц, полученные посредством блока *Powergui – FFT Analysis* (БПФ – быстрое преобразование Фурье).

По результатам спектрального анализа (см. табл. 3) усредненные коэффициенты высших гармоник напряжения $K_{\text{ВГН}}$ и тока $K_{\text{ВГТ}}$ в зависимости от частоты ШИМ равны:

- $K_{\text{ВГН}}$ = 1,4344 и $K_{\text{ВГТ}}$ = 0,8584 при $f_{\text{ШИМ}}$ = 1 кГц;
- $K_{\text{ВГН}}$ = 0,7944 и $K_{\text{ВГТ}}$ = 1,5856 при $f_{\text{ШИМ}}$ = 2 кГц;
- $K_{\text{ВГН}}$ = 0,6933 и $K_{\text{ВГТ}}$ = 0,5504 при $f_{\text{ШИМ}}$ = 4 кГц;
- $K_{\text{ВГН}}$ = 0,7086 и $K_{\text{ВГТ}}$ = 0,2394 при $f_{\text{ШИМ}}$ = 8 кГц.

Соответственно, наиболее оптимальными (с точки зрения минимума коэффициентов высших гармоник напряжения и тока статора)

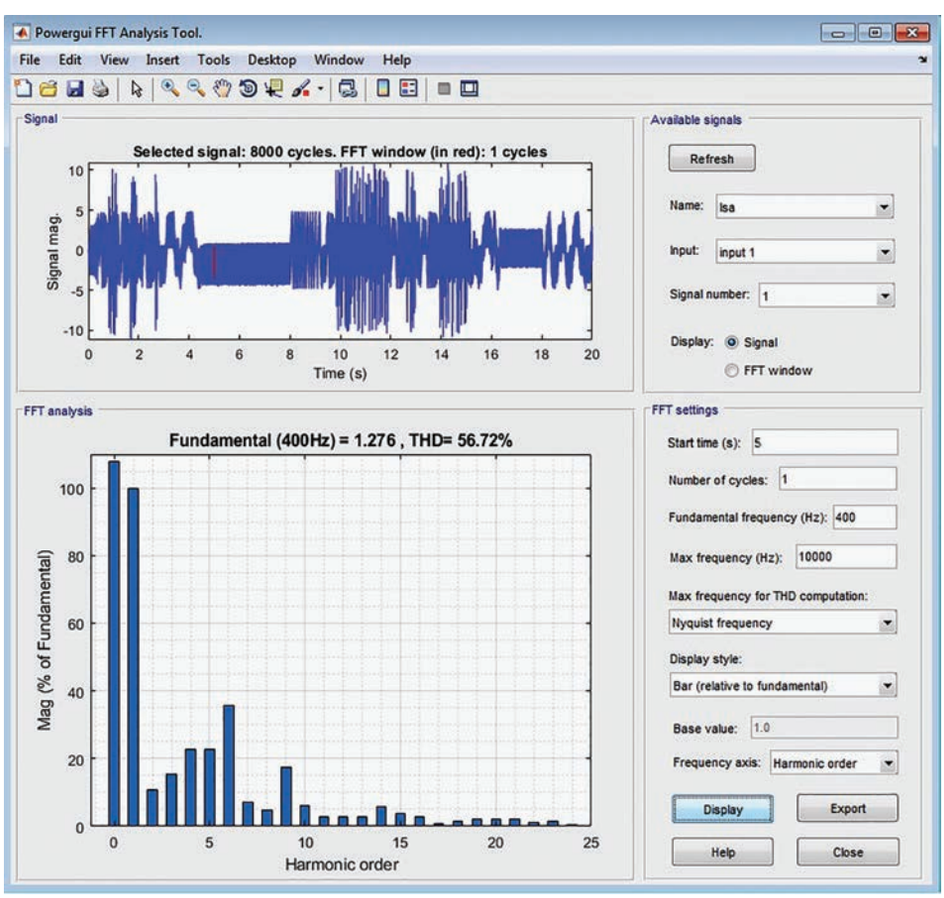


Рис. 8. Спектральный анализ тока статора при работе АД от ПЧ с частотой ШИМ $f_{\text{ШИМ}}$ = 1 кГц

Таблица 3

Данные спектрального анализа при работе АД от ПЧ

Параметр	Моменты нагрузок на валу АД согласно условному циклу КМУ, о. е.													Среднее значение, о. е.
	0,2	0,225	0,425	0,625	0,7	0,35	0,25	0,3	0,275	0,3	0,4	0,75	0,4	
$f_{ШИМ}$ = 1 кГц														
$K_{ВГН}$, о. е.	0,9333	1,7746	1,152	1,1117	1,116	1,611	2,122	0,7465	1,762	2,066	1,089	1,876	1,2875	1,4344
$K_{ВГТ}$, о. е.	0,418	0,5718	0,631	0,5672	0,5766	0,5986	1,448	0,4158	0,6968	2,243	0,5989	1,6164	0,7775	0,858
$f_{ШИМ}$ = 2 кГц														
$K_{ВГН}$, о. е.	0,7788	0,7807	0,7864	0,7899	0,7946	0,7947	0,7969	0,8001	0,7999	0,7996	0,8009	0,8022	0,8023	0,7944
$K_{ВГТ}$, о. е.	1,5873	1,5549	1,2343	0,9937	0,9555	1,5555	1,9098	1,8652	1,9724	1,9834	1,8016	1,1477	2,0515	1,5856
$f_{ШИМ}$ = 4 кГц														
$K_{ВГН}$, о. е.	0,6904	0,6953	0,6894	0,6971	0,6985	0,6926	0,6954	0,6836	0,6947	0,6920	0,6927	0,6974	0,6940	0,6933
$K_{ВГТ}$, о. е.	0,6024	0,5937	0,4859	0,3988	0,3731	0,5185	0,5789	0,5440	0,5636	0,5601	0,5044	0,3494	0,5036	0,5504
$f_{ШИМ}$ = 8 кГц														
$K_{ВГН}$, о. е.	0,7060	0,7092	0,7083	0,7094	0,7093	0,7019	0,7051	0,7104	0,7076	0,7084	0,7108	0,7126	0,7128	0,7086
$K_{ВГТ}$, о. е.	0,2823	0,2864	0,2315	0,1870	0,1730	0,2411	0,2723	0,2642	0,2653	0,2640	0,2386	0,1632	0,2437	0,2394

являются частоты с ШИМ $f_{ШИМ}$ = 4 и 8 кГц. При этом следует учитывать, что вследствие повышения частоты коммутаций пропорционально увеличиваются коммутационные потери в инверторе и снижается его допустимая полезная мощность. Поэтому в настоящей работе, для данного КМУ по результатам моделирования наиболее оптимальной частотой ШИМ при питании АД от ПЧ принята $f_{ШИМ}$ = 4 кГц, так как при данной частоте ШИМ также возникают относительно меньшие коэффициенты высших гармоник (напряжения и тока статора) в АД.

Согласно техническим характеристикам АД по обеспечению требуемого напряжения силовой части, диапазона регулирования скорости электродвигателя (1:5), а также необходимых интенсивности разгона (10 Гц/с) и торможения электродвигателя, для системы управления контроллером выбран инвертор – силовой *IGBT* модуль М2ТКИ-100-12К. Силовая часть контроллера представляет собой систему неуправляемый выпрямитель – автономный инвертор напряжения. В качестве неуправляемого выпрямителя выбрана модель М6Д-100.

На рис. 9 представлена принципиальная электрическая схема системы управления АД для гидропривода КМУ. Плата управления включает микроконтроллер *AT90CAN128-16AU*. Параметры модели электропривода в пакете *Matlab Simulink* могут быть загружены в микроконтроллер. В системе управления применяется отсечка по току статора, обеспечивающая эффективное токоограничение в переходных режимах на валу АД. Компоновка была выполнена на плате датчика тока, включающей три датчика (*UI*1, *UI*2 и *UI*3, подключенные к входам *X*9, *X*10 и *X*11 платы управления *A*1, см. рис. 9).

В целях апробации результатов математического моделирования были разработаны и изготовлены опытные образцы (3 шт.) силового контроллера. Для минимизации затрат при их изготовлении были применены компоненты, не входящие в перечень ЭКБ, такие как М2ТКИ-100-12К, М6Д-100 и *AT90CAN128-16AU*. В изделиях гражданской техники (ГТ)

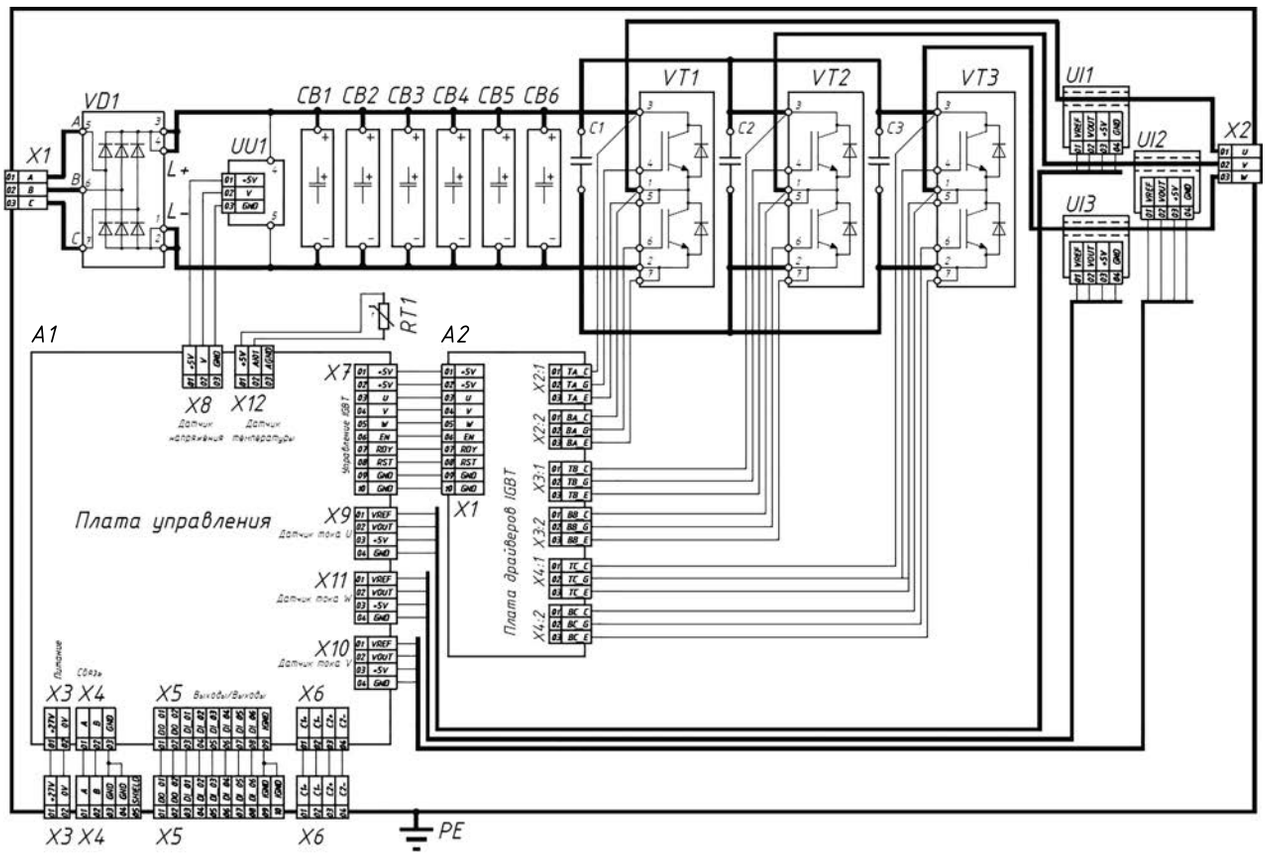


Рис. 9. Принципиальная электрическая схема системы управления АД для гидропривода КМУ: *VD*1 – выпрямительный модуль М6Д-100; *VT*1–*VT*3 – силовой *IGBT*-модуль М2ТКИ-100-12К; *A*1 – плата управления с принципом скалярного управления; *A*2 – плата драйверов *IGBT* с выбранной частотой ШИМ $f_{\text{ШИМ}}$ = 4 кГц

можно использовать компонентную базу, реализованную на опытных образцах. В изделиях ВТ приведенные компоненты могут быть заменены на аналоги, входящие в перечень ЭКБ, в частности, силовой IGBT-модуль можно заменить на аналог производства АО «Ангстрем» (*AnM100HBA12M*), а микроконтроллер – на аналог производства АО «ПКК Миландр» (серия 1886*BE*).

При ШИМ выходное напряжение формируется в виде импульсов переменной длительности, модулированных по синусоидальному закону. Регулирование напряжения осуществляется изменением длительности импульсов при сохранении закона модуляции.

Диапазон модуляции современных транзисторных ПЧ с ШИМ для электропривода лежит в пределах от единиц до десятков килогерц. По результатам моделирования отмечается, что уменьшение момента сопротивления на валу АД гидропривода КМУ приводит к возрастанию пульсаций электромагнитного момента электродвигателя, а увеличение частоты ШИМ позволяет их снизить. Следовательно, автоматическая подстройка частоты ШИМ на максимальную при уменьшении нагрузки на АД, и наоборот, когда нагрузка на АД высокая, – снижение частоты ШИМ (для уменьшения коммутационных потерь при включение/отключении силовых ключей, и как следствие, снижения энергопотребления и тепловыделения силового модуля), позволит уменьшить пульсации электромагнитного момента на валу АД и оптимизировать энергопотребление.

На рис. 10 приведена структурная схема электрогидропривода КМУ, реализованная с помощью библиотеки *Simscape*. В данной схеме подсистема *Model Inverter_Asynchronous motor* включает модель электропривода, разработанную на предыдущем этапе (см. рис. 4 и 5). Следующим шагом было моделирование

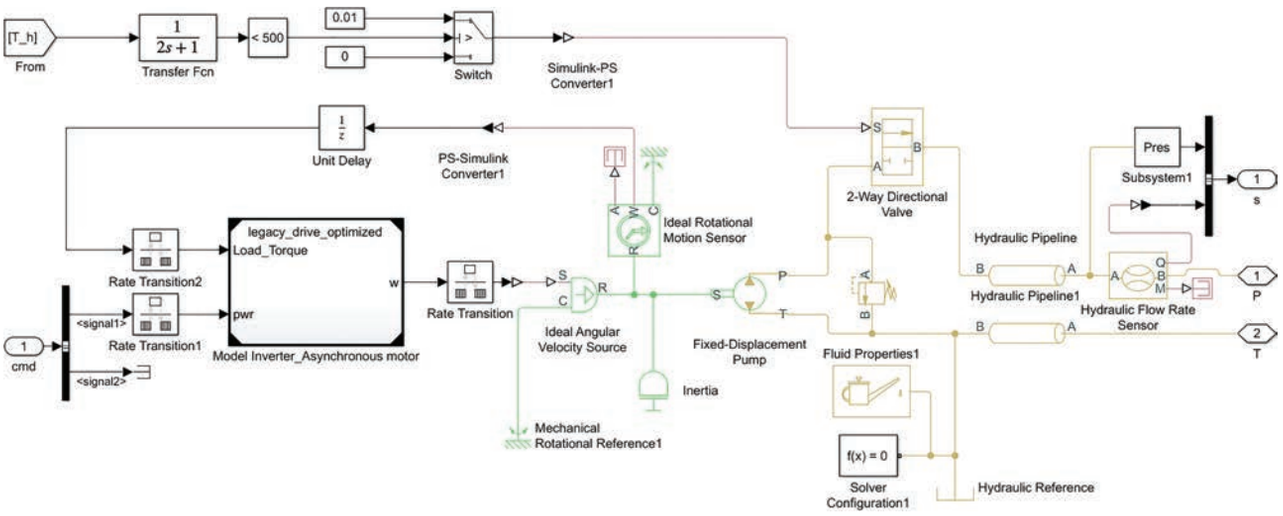


Рис. 10. Структурная схема электрогидропривода КМУ в пакете *Matlab Simulink*

совместной работы гидросхемы, механической части и созданной модели электропривода.

На рис. 11 показаны выходные характеристики работы системной модели КМУ по скорости и перемещениям отдельных агрегатов.

Построенная в пакете *Matlab Simulink* имитационно-математическая модель КМУ позволяет исследовать в зависимости от изменения нагрузки, параметров и элементов механизма характеристики и переходные процессы

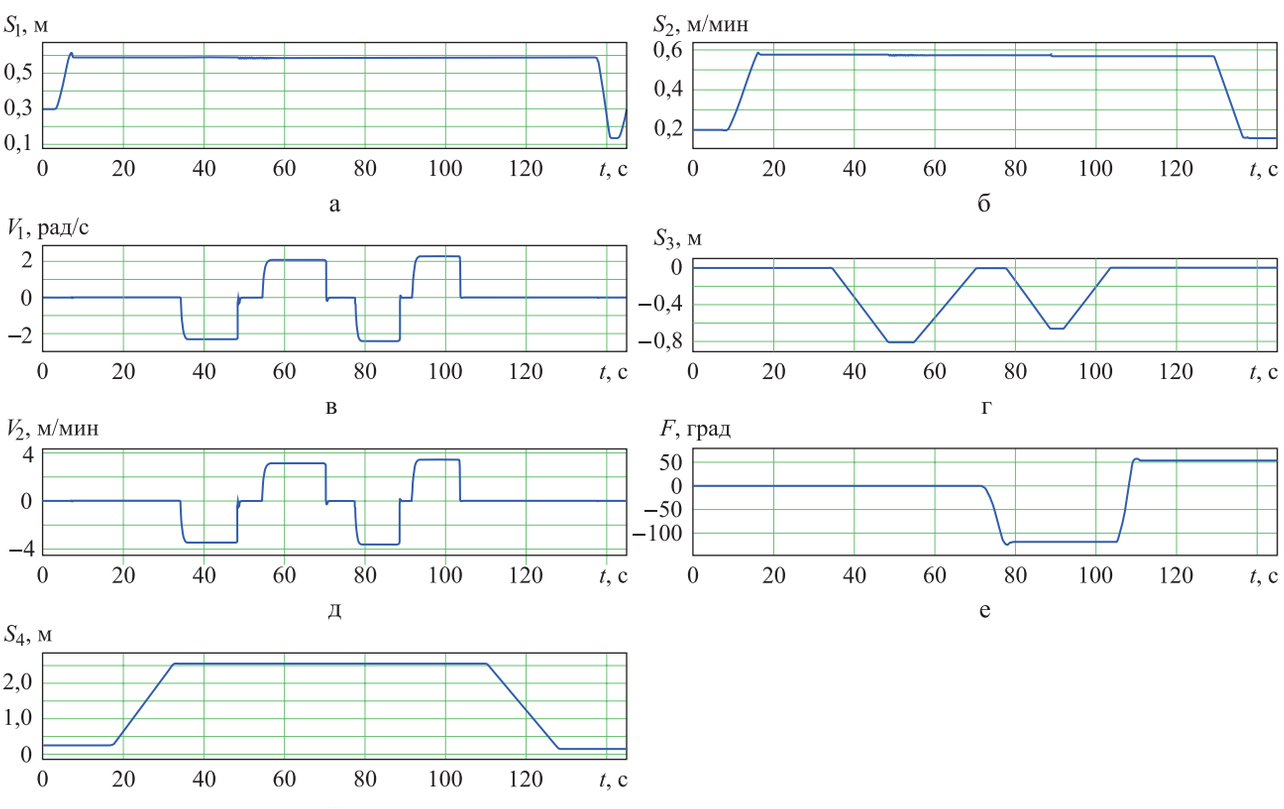


Рис. 11. Выходные характеристики работы системной модели КМУ:
а – S_1, перемещение штока в цилиндре стойки, м; б – S_2, перемещение штока в цилиндре стрелы, м; в – V_1, скорость навивки каната на барабан лебедки, рад/с; г – S_3, перемещение каната лебедки (опускание/подъем), м; д – V_2, скорость подъема каната лебедки, м/мин; е – F, угол поворота основания, град.; ж – S_4, перемещение штока в цилиндре телескопа, м

гидропривода (давление, расход), механической части (траектории перемещений, реакции в шарнирах, скорость подъема груза, нагрузочный момент от лебедки), электромагнитные характеристики и переходные процессы электропривода (силового контроллера и АД) до стадии натурных стендовых испытаний (и, соответственно, без возникающих реальных затрат на их проведение).

Таким образом, после проведения всего комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ были спроектированы, изготовлены и испытаны опытные образцы силового контроллера. На ПО управлением частотным преобразователем (силовым контроллером) получено свидетельство Роспатента о госрегистрации программы для ЭВМ № 2016617322. По результатам испытаний опытных образцов силового контроллера погрешность матмодели электропривода составляет не более 5 % по сравнению с фактическими показателями. В процессе испытаний отмечался локальный перегрев корпуса силового контроллера, связанный как с особыми внешними условиями эксплуатации (в ограниченном термонагруженном отсеке), так и с отсутствием системы принудительного охлаждения (для охлаждения используется оребренный радиатор).

В дальнейшем силовой контроллер может применяться в составе мобильной ВТ, он отвечает требованиям комплексов государственных военных стандартов «Климат-6» и «Мороз-7» и имеет практические возможности для совершенствования и модификации. Следует также добавить, что изделия ВТ, для которых планируется введение данного силового контроллера, являются экспортными.

В «Перечне поручений по реализации Послания Президента РФ Федеральному собранию» от 5 декабря 2016 г. № Пр-2346 (п. 1 ж) указано, что Правительству Российской Федерации необходимо с учетом ранее данных поручений обеспечить увеличение доли высокотехнологичной продукции гражданского и двойного назначения в общем объеме продукции, выпускаемой организациями оборонно-промышленного комплекса, к 2020 г. – не менее чем до 17 %, к 2025 г. – не менее чем до 30 %, к 2030 г. – не менее чем до 50 %.

В связи с этим предполагается модернизация разработанной системы управления АД для использования также в составе конверсионной ГТ. Кроме того, планируется модификация системы управления АД гидропривода КМУ для снижения пульсаций высших гармонических составляющих напряжений и токов с целью дальнейшего снижения энергопотребления и нагрева системы электропривода при работе как в составе ВТ, так и в составе ГТ.

Список литературы

1. *Лагерев И. А.* Сравнительный анализ гидравлических кранов-манипуляторов транспортно-технологических машин и гидравлических манипуляторов промышленных роботов // Научно-технический вестник БГТУ. 2016. № 3. С. 16–49.

2. *Попов Е. В., Онищенко Г. Б.* Частотно-регулируемый электропривод механизмов грузоподъемных кранов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. Вып. 3. С. 179–184.

3. *Бандурин Р. А.* Рынок кранов-манипуляторов в России // Проблемы современной экономики. 2015. № 26. С. 138–142.

4. *Шрейнер Р. Т.* Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.

5. *Шрейнер Р. Т., Костылев А. В., Кривовяз В. К., Шилин С. И.* Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления. Екатеринбург: ГОУ ВПО РГППУ, 2008. 361 с.

6. *Терехов В. М., Осипов О. И.* Система управления электроприводов. М.: Академия, 2006. 304 с.

Поступила 04.10.18

Шестаков Игорь Владимирович – заместитель главного конструктора по науке и инновациям ОКБ Публичного акционерного общества «Машиностроительный завод имени М. И. Калинина», г. Екатеринбург.

Область научных интересов: теория управления наукоемкими бизнес-процессами, математическое моделирование, динамика и прочность конструкций, регулируемый электропривод.

Сафин Наиль Рамазанович – кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор бюро расчетов и компьютерного моделирования ОКБ Публичного акционерного общества «Машиностроительный завод имени М. И. Калинина», г. Екатеринбург.
Область научных интересов: математическое моделирование, динамика и прочность конструкций, регулируемый электропривод.

The experience of creating an asynchronous motor control system for the hydraulic drive of a crane-manipulator

The study introduces a mathematical model of an asynchronous motor control system for a hydraulic drive of a crane-manipulator, the model being implemented in the *Matlab Simulink* package. The choice of the frequency of the pulse-width modulation and the components of the controlled electric drive depends on the load diagram and the characteristics of a new electric motor. The paper emphasizes some features of this choice and also demonstrates the output characteristics of the motor powered by a sinusoidal voltage source and a frequency converter, which is a source of modulated pulse-width voltage.

Keywords: asynchronous motor, frequency converter, controller, scalar control, pulse-width modulation.

Shestakov Igor Vladimirovich – Deputy Chief Designer for Science and Innovation, Public Joint-Stock Company "Kalinin machinery plant Yekaterinburg", Yekaterinburg.
Science research interests: theory of science-based business process control, mathematical simulation, structural dynamics and integrity, controlled electric drive.

Safin Nail Ramazanovich – Candidate of Engineering Sciences, Leading Design Engineer, bureau of calculations and computer simulation, Public Joint-Stock Company "Kalinin machinery plant Yekaterinburg", Yekaterinburg.
Science research interests: mathematical simulation, structural dynamics and integrity, controlled electric drive.