

УДК 681.5:62-5

А. В. Ванин, В. А. Польский

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ

*Приведены постановка задачи и описание подхода, примененного при разработке универсального исследовательского стенда для испытания электромеханических приводных модулей манипуляционных роботов. Рассмотрены вопросы организации процесса управления и исследования приводов с использованием модели и с помощью распределенной системы полунатурного моделирования, которая имитирует динамику нагружения приводов в соответствии с заданными алгоритмами управления и параметрами динамической модели системы.*

**E-mail:** [polsky-slava@rambler.ru](mailto:polsky-slava@rambler.ru), [vanin.alexey@gmail.com](mailto:vanin.alexey@gmail.com)

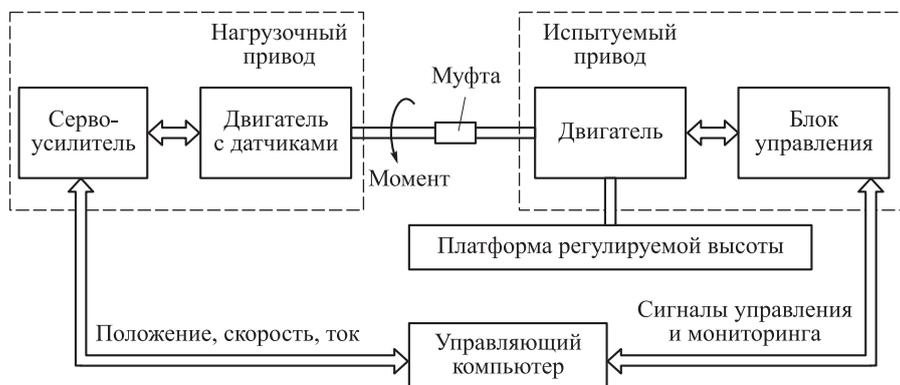
**Ключевые слова:** манипулятор, динамическая модель, управление, полунатурное моделирование, нагружение, привод.

**Предпосылки создания стенда.** При разработке манипуляционных, в том числе мобильных, робототехнических систем очень важно провести испытания электроприводов отдельных степеней подвижности на этапе, когда еще нет самого манипулятора. Но данные испытания будут неполноценными, если приводы работают без нагрузки. Поэтому задача создания стенда, имитирующего всевозможные статические и динамические нагрузки на испытуемый привод, является весьма актуальной. Данную задачу можно решить традиционными методами, используя различные механические и электромеханические тормозные устройства, противовесы, пружинные механизмы, маховики и гидравлические демпферы. Однако такой подход не позволяет создать универсальную нагрузочную систему, поскольку при изменении законов нагружения требуется механическая переналадка системы. Кроме того, указанные устройства осуществляют пассивное нагружение и не способны воспроизвести активное влияние нагрузки на привод, которое имеет место, например, в многозвенных исполнительных механизмах манипуляторов. В связи с этим предлагается создать универсальный исследовательский стенд на базе регулируемого электропривода, способного воспроизводить всевозможные нагрузки на испытуемый привод и оперативно изменять законы и параметры

нагружения путем не механической переналадки, а изменения параметров управляющей программы.

Предлагаемый стенд представляет собой регулируемый электропривод, который с помощью муфты механически соединяется с испытуемым приводным модулем и создает активный нагрузочный момент, действующий на испытуемый модуль. Благодаря тому что нагружающий привод оснащен датчиками положения, скорости и момента, можно реализовывать различные законы нагружения испытуемого модуля: имитировать шарнирные моменты, моменты вязкого и сухого трения, инерционные моменты, ударные нагрузки, а также проводить имитацию нагрузок с учетом упругих свойств и люфтов механических передач. Имея несколько нагрузочных стендов, можно провести полунатурное моделирование многосвязного исполнительного механизма манипулятора с учетом статического и динамического силового взаимодействия приводов различных степеней подвижности.

**Состав и требования к стенду.** На рис. 1 показан состав стенда. Как видно из рисунка, работа стенда основана на согласованном управлении нагрузочного и испытуемого приводов от единого блока управления – персонального компьютера.



**Рис. 1. Состав испытательного стенда**

Мощность нагрузочного привода должна быть соизмерима с мощностью испытуемого привода, что, в частности, позволит снимать механические характеристики с испытуемых приводов во всех четырех квадрантах. То же касается максимальных скоростей и моментов: у нагрузочного привода они должны быть выше, чем у испытуемых приводов.

Для имитации высокودинамичных и ударных нагрузок нагрузочный привод должен обладать высоким быстродействием.

Система управления нагрузочного привода должна иметь три режима работы: управление скоростью, положением и моментом. В режиме управления скоростью можно осуществлять снятие механических характеристик, в режиме управления моментом – имити-

ровать различные динамические нагрузки, а в *режиме управления положением* – осуществлять точное позиционирование стэнда и имитацию нагрузок типа «шарнирный момент».

Электродвигатель загрузочного привода должен иметь хорошую перегрузочную способность, обладать возможностью длительное время развивать момент при неподвижном роторе и позволять с достаточной точностью получать информацию о развиваемом моменте путем измерения токов, протекающих по его обмоткам.

Таким образом, можно сформулировать следующие *основные требования* к элементам испытательного стэнда:

мощности нагрузочного и испытуемого приводов должны быть соизмеримы;

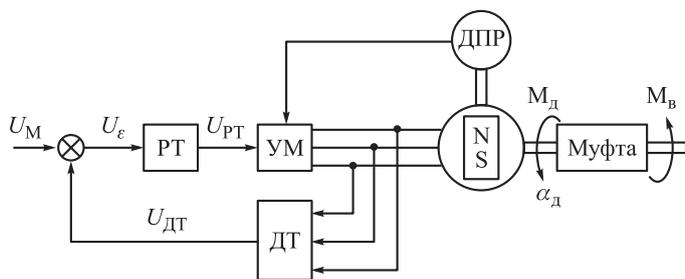
управление приводами должно быть согласованным;

система управления нагрузочного привода как минимум должна иметь режимы управления по скорости и моменту;

система управления нагрузочного привода должна предоставлять максимально точную информацию о фактическом моменте, развиваемом приводом в каждый момент времени.

На наш взгляд, наилучшими показателями, удовлетворяющими перечисленным выше требованиям, обладают современные приводы на базе вентильных двигателей с синусоидальным токовым векторным управлением, имеющие высокую линейность и стабильность характеристики «момент – ток». Для построения нагрузочного стэнда можно использовать комплектный сервопривод, построенный по трехконтурной схеме подчиненного регулирования с внешним позиционным контуром положения и внутренними контурами скорости и тока (момента). Данные сервоприводы выпускаются многими фирмами и имеют высокоточные встроенные датчики положения, скорости и тока.

На рис. 2 показана функциональная схема нагрузочного привода.



**Рис. 2. Функциональная схема нагрузочного привода:**

ДПР – датчик положения ротора; РТ – регулятор тока; УМ – усилитель мощности (инвертор); ДТ – датчик тока;  $U_M$  – управляющий сигнал, задающий ток (момент), с которым нагрузочный привод действует на испытуемый привод;  $U_ε$  – сигнал ошибки;  $U_{ДТ}$  – сигнал, пропорциональный эквивалентному току статора вентильного двигателя;  $U_{РТ}$  – сигнал с выхода регулятора тока;  $α_д$  – угол поворота вала двигателя;  $M_д$  – электромагнитный момент, действующий на ротор двигателя;  $M_в$  – внешний момент, передающийся на испытуемый двигатель

Нагрузочный привод в большинстве экспериментов целесообразно использовать в режиме управления по моменту. Данный режим представляет наибольший интерес, поскольку позволяет без прямого измерения оценить момент, создаваемый электродвигателем, с помощью его обобщенной модели.

**Математическое описание модели привода.** Уравнения, описывающие работу системы:

$$U_{\text{ДТ}} = K_{\text{ДТ}} I_c, \quad (1)$$

где  $K_{\text{ДТ}}$  – крутизна характеристики датчика тока;  $I_c$  – эквивалентный ток статорных обмоток вентильного двигателя (ВД);

$$M_{\text{д}} = K_{\text{М}} I_c, \quad (2)$$

где  $K_{\text{М}}$  – коэффициент крутящего момента;

$$M_{\text{д}} = JS^2 \alpha_{\text{д}} + M_{\text{в}}, \quad (3)$$

где  $J$  – момент инерции всех подвижных частей;  $S$  – оператор преобразования Лапласа;

$$U_{\text{РТ}} = U_{\varepsilon} \Pi_{\text{РТ}}(S) \quad (4)$$

где  $\Pi_{\text{РТ}}(S)$  – передаточная функция регулятора тока.

Пренебрегая инерционностью транзисторного широтно-импульсного преобразователя, можно написать следующее уравнение для эквивалентного напряжения  $U_c$  статорных обмоток ВД:

$$U_c = U_{\text{РТ}} K_{\text{У}} = I_c R_c + L_c S I_c + K_w S \alpha_{\text{д}} = I_c R_c (1 + T_3 S) + K_w S \alpha_{\text{д}}, \quad (5)$$

где  $K_{\text{У}}$  – коэффициент усиления усилителя мощности;  $R_c$  и  $L_c$  – активное сопротивление и индуктивность статорных обмоток ВД;  $K_w$  – коэффициент противоЭДС;  $T_3$  – электромагнитная постоянная времени статорных обмоток ВД.

Уравнения (2) и (5) идентичны уравнениям, описывающим работу двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, что справедливо для вентильного двигателя с синусоидальным токовым векторным управлением:

$$U_{\varepsilon} = U_{\text{М}} - U_{\text{ДТ}} = U_{\text{М}} - \frac{K_{\text{Т}}}{K_{\text{М}}} M_{\text{д}} = \frac{K_{\text{Т}}}{K_{\text{М}}} (M_{\text{в}}^* - M_{\text{д}}), \quad (6)$$

где  $M_{\text{в}}^*$  – заданное значение момента, который должен действовать на испытуемый двигатель. Согласно (6), ошибка нагрузочного привода

$$\varepsilon = M_B^* - M_D. \quad (7)$$

Подставив в (7) выражение (3), получим

$$\varepsilon = M_B^* - M_B - JS^2\alpha_D, \quad (8)$$

откуда следует, что

$$M_B = M_B^* - \varepsilon - JS^2\alpha_D. \quad (9)$$

Последнее выражение означает, что даже если  $\varepsilon \rightarrow 0$ , момент, действующий на вал испытуемого двигателя, отличается от заданного значения на величину динамического момента. Данная погрешность является несущественной при снятии механических характеристик с испытуемого привода, когда скорость меняется очень медленно. В остальных случаях для компенсации динамического момента можно использовать положительную обратную связь по ускорению.

**Режимы работы стенда.** *Режим имитации статических и динамических нагрузок.* Для демонстрации возможностей стенда было проведено моделирование системы в *MatLAB*, где в качестве нагрузочного привода используется вентильный двигатель *Maxon EC 60*, а в качестве испытуемого привода – двигатель *Maxon EC 45* (табл. 1).

Таблица 1

### Параметры двигателей

Показатель	Maxon EC 60	Maxon EC 45
Номинальная мощность, Вт	240	120
Номинальная скорость вращения, об/мин	2680	3830
Номинальный момент, Н·м	0,83	0,308
Номинальный ток, А	5,85	3,04
Момент инерции ротора, кгм <sup>2</sup>	$0,831 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$
Сопrotивление статорных обмоток, Ом	1,03	1,73
Индуктивность статорных обмоток, мГн	0,82	0,686
Коэффициент крутящего момента, Н·м/А	0,147	0,104

Испытуемый привод не имеет датчиков обратных связей, скорость вращения регулируется путем изменения напряжения, подаваемого на статорные обмотки. Роторы двигателей соединены с помощью муфты и представляют собой единую механическую систему с суммарным моментом инерции  $J = 0,103 \cdot 10^{-3} \text{ кгм}^2$ . Схема модели представлена на рис. 3.

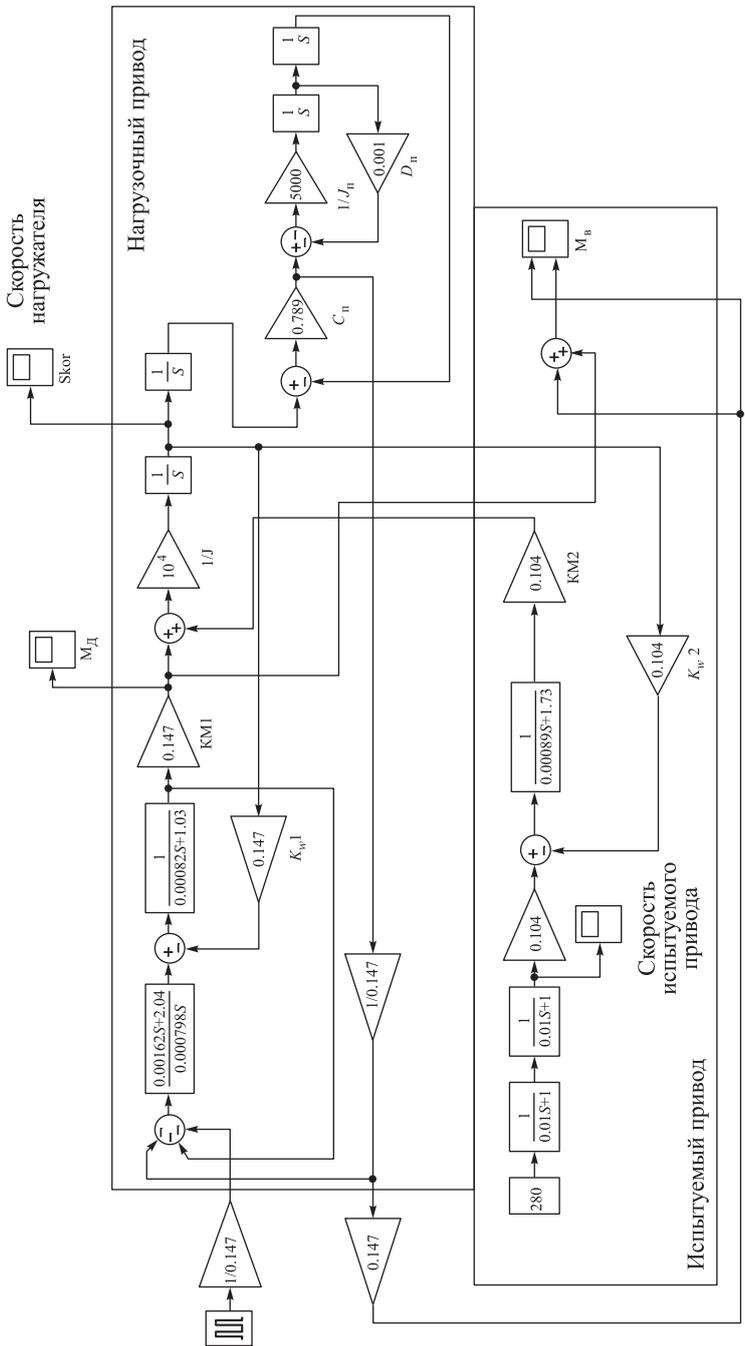


Рис. 3. Структура модели стэнда

Нагрузочный привод работает в режиме управления током (моментом) и имеет в своем составе пропорционально – интегральный регулятор тока РТ, настроенный на модульный оптимум (МО) с передаточной функцией  $P_{РТ}(S) = \frac{0,000162S + 0,204}{0,000796S}$ ; полоса пропускания контура тока – 700 Гц. Коэффициент усиления усилителя мощности нагрузочного привода равен 10, коэффициент передачи датчика тока – 1. Закон нарастания скорости показан на рис. 4.

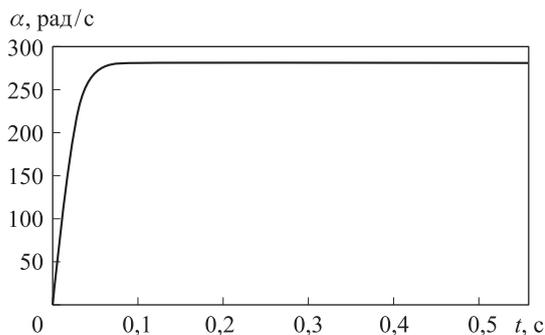


Рис. 4. Заданный закон нарастания скорости испытуемого привода

**Режим имитации импульсных нагрузок.** На вход нагрузочного привода подаются прямоугольные импульсы с частотой 10 Гц и скважностью 0,5, задающие импульсное действие нагрузочного момента величиной 0,1 Н·м, что составляет 33 % номинального момента испытуемого привода. Результаты моделирования представлены на рис. 5. При этом на рис. 5, а показаны импульсы момента, который действует на вал испытуемого двигателя со стороны нагрузочного привода, а на рис. 5, б представлена осциллограмма скорости испытуемого привода.

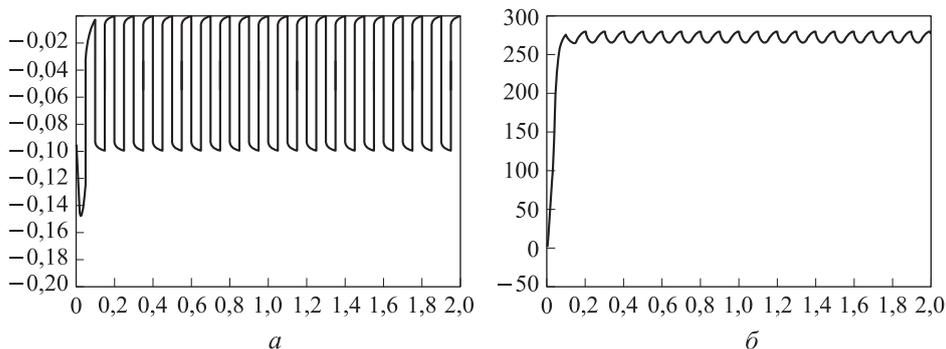


Рис. 5. Результаты моделирования импульсной нагрузки:

а – импульсы момента; б – скорость привода

Как видно из рис. 5, а, импульсы момента несколько отличаются от заданных прямоугольных, что объясняется конечной величиной быстродействия нагрузочного привода и наличием в сигнале обрат-

ной связи по току паразитной составляющей, пропорциональной динамическому моменту. Рисунок 5, б показывает пульсацию скорости испытуемого привода, вызванную импульсами момента со стороны нагрузочного привода.

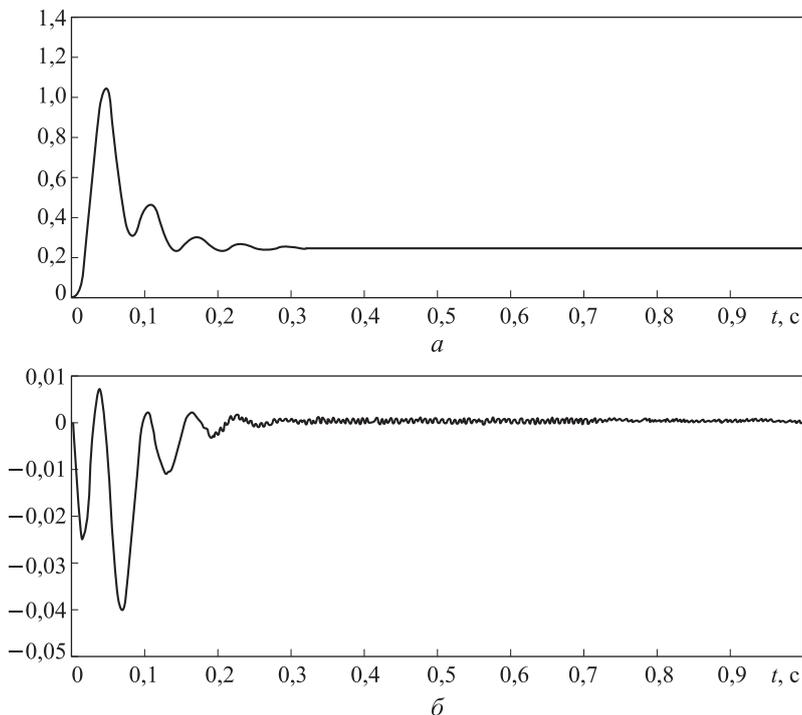
**Имитация инерционной нагрузки и вязкого трения с учетом нежесткости механической передачи.** Для имитации инерционных свойств нагрузки, вязкого трения и нежесткости механической передачи на вход нагрузочного привода необходимо подать следующий сигнал:

$$M_b^* = C_n(\alpha_d - \alpha_n) = D_n S \alpha_n + J_n S^2 \alpha_n,$$

где  $C_n$  – коэффициент жесткости механической передачи;  $\alpha_n$  – угол поворота вала виртуальной нагрузки.

В результате формируется сигнал, имитирующий подсоединение к валу испытуемого двигателя нежесткой механической нагрузки с коэффициентом жесткости  $C_n = 0,789$  Н·м/рад, моментом инерции  $J_n = 0,0002$  кгм<sup>2</sup>, и вязким трением с коэффициентом  $D_n = 0,001$  Н·м·с/рад. Собственная частота упругих колебаний нагрузки равна 10 Гц, коэффициент затухания составляет 0,04.

Результаты моделирования представлены на рис. 6. Для наблюдения нагрузочного момента и ошибки его воспроизведения использовался осциллограф  $M$ : на его верхний вход подавался сигнал с имитатора



**Рис. 6. Результаты динамического моделирования:**

*а* – заданное значение нагрузочного момента; *б* – ошибка воспроизведения нагрузочного момента нагрузочным приводом

нагрузки (выход усилителя  $C_n$ ), на нижний вход – разность между заданным моментом нагрузки и его фактическим значением. Как видно из рис. 6, установившаяся ошибка воспроизведения заданного момента стремится к нулю, а максимальное ее значение не превышает 4 % максимального значения заданного момента.

**Режим снятия механической характеристики с испытуемого привода.** Снятие механической характеристики (зависимости скорости привода от момента сопротивления) позволяет экспериментально определить предельные возможности электропривода, в частности его перегрузочную способность по моменту. Особенно важным является построение механической характеристики для электропривода на базе трехфазного асинхронного двигателя (ТАД), поскольку она несет информацию о важнейших параметрах двигателя, определение которых обычными методами представляет большие трудности. Для снятия механической характеристики нагрузочный привод должен работать в режиме управления скоростью и иметь регулятор скорости с интегральной составляющей (например, пропорционально-интегрального типа).

В этом случае он будет иметь абсолютно жесткую механическую характеристику. На вход нагрузочного привода должен подаваться сигнал задания скорости, изменяющийся по треугольному или синусоидальному закону. Это позволит снять механическую характеристику с испытуемого привода во всех четырех квадрантах. Механическая характеристика строится на основе информации с датчика тока и датчика скорости нагрузочного привода.

На вход испытуемого привода подается постоянный управляющий сигнал, задающий скорость вращения, которую бы он имел, если бы не был механически связан с нагрузочным приводом, т. е. скорость холостого хода. Поскольку валы приводов механически связаны друг с другом, измеренный момент нагрузочного привода равен и противоположен по знаку моменту испытуемого привода. Благодаря такому построению системы при снятии механической характеристики ТАД можно получить ее также в областях неустойчивой работы двигателя.

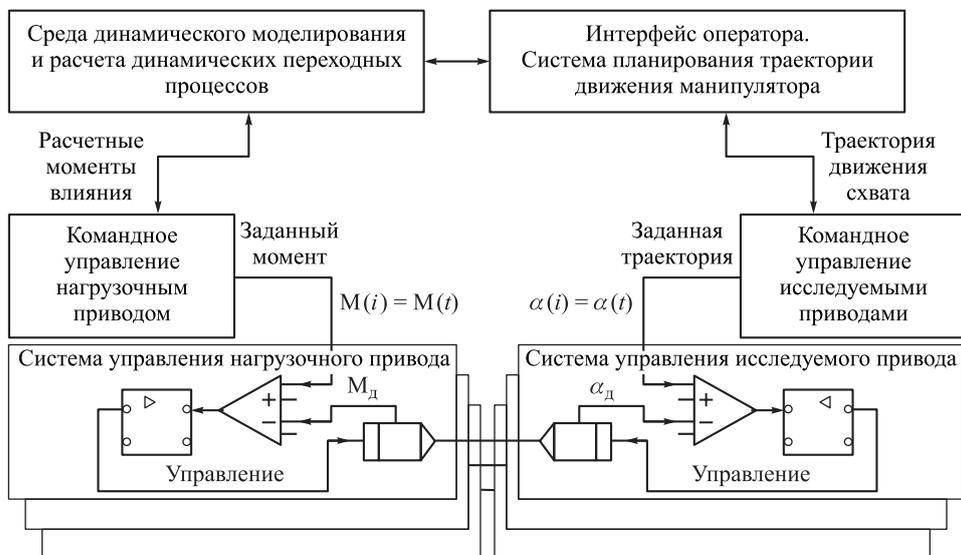
Подробно методика снятия механических характеристик указанным способом описана в работе [1].

**Полунатурное моделирование системы приводов многозвенных манипуляторов.** Наиболее значимым применением разрабатываемой системы является ее развитие до уровня комплекса для исследования работы многозвенных манипуляционных механизмов с учетом взаимовлияния приводов при проведении различных манипуляционных операций. На сегодняшний день подобные комплексы создаются ведущими западными производителями робототехнических систем, таких как V&R Automation, Kuka, Mitsubishi Electric и др. Ключевым моментом, определившим интерес к таким системам, является необходимость разработки программ управления роботами и их отладки в

среде, максимально приближенной к рабочей. Недостатками представленных на сегодняшний день систем является анализ только кинематического управления манипулятором, т. е. динамика работы приводов и взаимовлияние не учитываются. Результат управления на реальном роботе при применении таких систем может существенно отличаться от результата, полученного при моделировании.

Для расчета требуемых законов нагружения приводов в условиях конкретной исследуемой кинематики манипулятора используется программный комплекс «Универсальный механизм» [2]. С его помощью рассчитывается закон нагружения для испытуемых приводов для сформированного закона управления. Моделирование динамики манипуляционной системы проводится на базе твердотельной модели, полученной в любом из доступных современных САД-пакетов трехмерного моделирования [3].

На рис. 7 показана функциональная схема системы, создаваемой на базе нескольких вышеописанных испытательных стендов.



**Рис. 7. Функциональная схема испытательного лабораторного комплекса**

Работа с комплексом начинается с формирования интересующей нас траектории движения манипулятора. Средством формирования траектории является интерфейс оператора, с помощью которого в дальнейшем будет осуществляться управление реальным роботом. На данном этапе планируется траектория движения схвата без учета динамического взаимовлияния приводов и их собственных передаточных характеристик. Численное решение обратной кинематической задачи дает требуемые законы изменения обобщенных координат приводов каждой степени подвижности во времени. Полученные массивы точек являются опорными для моделирования и последующего управления.

Сформированная целевая траектория движения передается в модуль динамического моделирования, которое проводится для определения законов изменения моментов сопротивления для каждой степени во время движения манипулятора по траектории. В данном модуле реализуется моделирование приводов и их динамического взаимовлияния с учетом масс-инерционных параметров конструкции. На сегодняшний день существует целый ряд систем, позволяющих с помощью методов численного моделирования получить уравнения движения многозвенной системы или оценить силы и моменты взаимовлияния в сочленениях. Одним из таких программных продуктов, как отмечалось, является «Универсальный механизм», в состав которого входит соответствующий набор решателей и моделей сред. При решении рассматриваемой задачи формируется модель, отражающая кинематические и инерционные параметры конструкции.

Результаты моделирования динамики могут быть использованы как для настройки регуляторов электроприводов, так и для коррекции заданной траектории. Первая задача актуальна на этапе проектирования системы управления и позволяет провести достаточно точную предварительную настройку контроллеров исполнительных электроприводов робота без их монтажа в конструкции.

Задача коррекции траектории по результатам динамического исследования является итерационной. Путем формирования критерия минимизации ошибки при проведении эксперимента и выполнении как минимум двух итераций расчета можно добиться оценки нужного направления оптимизации закона изменения обобщенных координат системы. Очевидно, что решение такой задачи для манипулятора в общем виде представляет определенные трудности (см., например, [4]). Практически в условиях детерминированного производственного цикла или при заданных тестовых траекториях движения манипулятора целесообразно применять численные методы анализа типовых траекторий, на основе которых можно сформировать критерий оптимизации вида  $J_i = J_j(\alpha_i, \dot{\alpha}_i)$ . На базе данного критерия для произвольной траектории будет формироваться коррекция  $\hat{\alpha}_i(t) = \alpha_i(t) + F(\alpha_i^*, \dot{\alpha}_i^*)$ , где  $\hat{\alpha}_i(t)$  – функция, задающая скорректированное программное положение  $i$ -го звена манипулятора;  $\alpha_i(t)$  – исходная траектория  $i$ -го звена, полученная при решении обратной кинематической задачи;  $F(\alpha_i^*, \dot{\alpha}_i^*)$  – функция, корректирующая траекторию движения при минимизации ошибки отработки на заданной эталонной траектории.

Результат моделирования – набор законов нагружения – передается подсистеме командного управления нагружающими приводами, а заданная траектория – подсистеме командного управления исследуемыми приводами. В процессе отработки приводами заданных режи-

мов и траекторий непрерывно считываются показания датчиков обратной связи. По результатам испытаний можно делать выводы о качестве работы реальных приводов при отработке целевой траектории.

Изложенный в данной статье подход к проектированию и исследованию систем управления движением манипуляционных механизмов представляет большой интерес ввиду малых затрат на его изготовление и широты предоставляемых возможностей. С помощью описанного комплекса распределенного моделирования и управления можно при незначительных затратах достаточно быстро разработать и, что особенно важно, отладить алгоритмы управления приводами манипулятора. При этом сам манипулятор не используется – достаточно иметь лишь его твердотельную модель, разработанную в любом современном САД-пакете.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герман-Галкин С. Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: Корона; Век, 2011.
2. Погорелов Д. Ю. О численных методах моделирования движения систем твердых тел // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1995. – № 4. – С. 501–506.
3. Погорелов Д. Ю., Каширский В. Ю. Новый продукт АСКОН. Кинематический и динамический анализ моделей КОМПАС-3D // САПР и графика. – 2006. – № 8.
4. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.

Статья поступила в редакцию 28.06.2012