

УДК 621.647.23

Титов В.В., Шардыко И.В., Даляев И.Ю.  
ЦНИИ РТК, г. Санкт-Петербург, Россия

## РЕАЛИЗАЦИЯ СИЛОМОМЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДВУХСТЕПЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА

Titov V., Shardyko I., Dalyaev I.

Department of robotic system design Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics,  
Saint-Petersburg, Russia ([victortitov@mail.ru](mailto:victortitov@mail.ru), [ddeer@bk.ru](mailto:ddeer@bk.ru), [mehatroniks@gmail.com](mailto:mehatroniks@gmail.com))

### IMPLEMENTATION OF FORCE/TORQUE CONTROL FOR 2-DoF MANIPULATOR

*Кратко рассмотрены принцип действия и особенности работы однокомпонентного датчика момента. Для повышения качества возвращаемых датчиком данных предложены варианты коррекции его выходного сигнала. Предложены два варианта системы управления моментом по датчику, встроенному в исполнительный модуль с вентильным двигателем. На базе предложенных вариантов управления моментом построены две схемы управления манипулятором верхнего уровня, проанализированы их достоинства и недостатки, предложены варианты их применения.*

*Ключевые слова:* силомоментное управление; датчик; управление манипулятором

#### Введение

В настоящее время силомоментное управление является одним из наиболее перспективных направлений развития робототехники. Применение различным методам данного направления находят в самых разнообразных видах робототехнических систем: промышленных, мобильных, а также в роботах для экстремальных условий. Для реализации силомоментного управления необходимо сочетание подходов к построению схем управления, как на верхнем (согласованное движение степеней подвижности), так и на нижнем уровне (уровень отдельных приводов). Необходимым условием является наличие обратной связи по непосредственно измеряемой силе или моменту. При качественно настроенной системе силомоментного управления робототехнические системы приобретают принципиально новые возможности, способные расширить границы их применимости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### Обработка сигнала датчика момента

Для того чтобы иметь возможность управления электромеханическим исполнительным модулем двухстепенного манипулятора, представленного на рисунке 1а, в силомоментном режиме, необходимо иметь информацию о внешнем моменте, приложенном к выходному валу модуля [1–3], в то время как фактически на интегрированном в модуль датчике момента проявляются различные эффекты, связанные с работой механики привода и приводящие к появлению паразитных моментных составляющих.

Исполнительный модуль предназначен для перемещения и позиционирования полезной нагрузки, присоединенной к выходному звену, вокруг своей оси с заданным видом управляемого сигнала (положением, скоростью, моментом). Модуль (рисунок 1б) состоит из следующих основных составляющих: бесколлекторного двигателя постоянного тока, датчика положения ротора двигателя, волнового редуктора, датчика абсолютного положения на базе вращающегося трансформатора, однокомпонентного датчика момента, фланец которого представлен на рисунке 2.

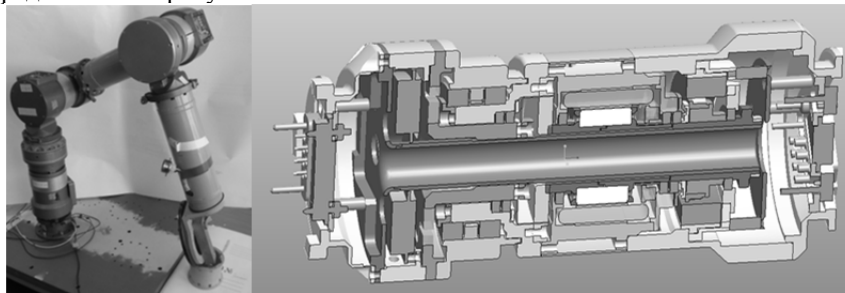


Рис. 1. Манипулятор (слева) и разрез шарнира (справа)

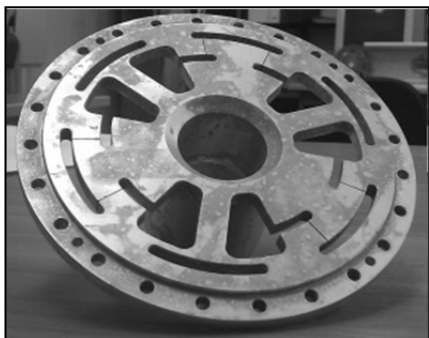


Рис. 2. Фланец однокомпонентного датчика момента

При работе модуля момент с вала двигателя передается на генератор волнового редуктора. Генератор деформирует гибкое зубчатое колесо волнового редуктора чашечного типа, которое входит в зацепление с жестким колесом редуктора. Момент с гибкого колеса через вал передается на внутренний обод датчика момента [4] и через три гибких спицы - на его внешний обод и, далее, на выходной вал шарнира. Плата датчика момента обрабатывает информацию от тензорезисторов, закрепленных на гибких спицах датчика.

При включении модуля без нагрузки с заданной постоянной скоростью, сигнал, получаемый с датчика момента, имеет вид, показанный на рисунке 3.

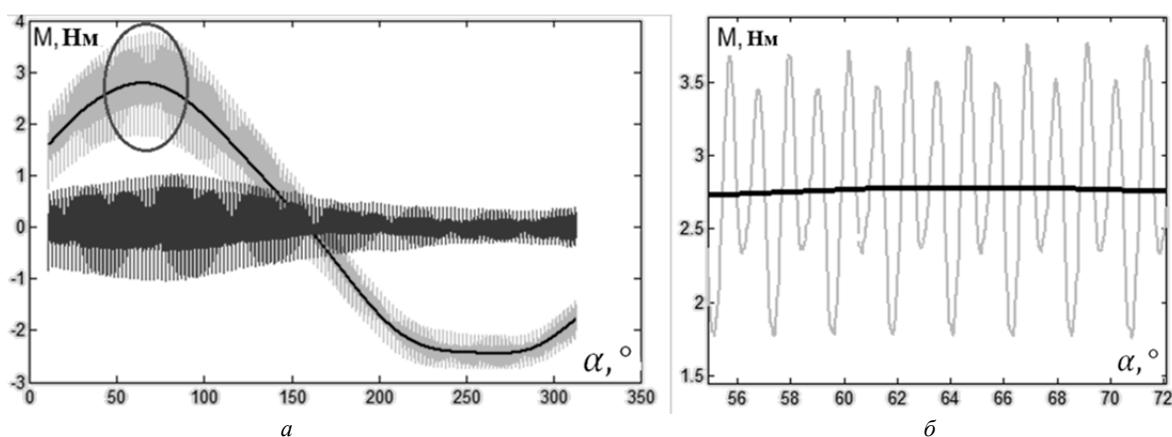


Рис. 3. Выходной сигнал датчика момента

Как видно из графика, сигнал обладает двумя паразитными составляющими – плавной и быстрой. Плавная составляющая имеет форму гармонического колебания с периодом, соответствующим обороту выходного вала. Быстрая составляющая имеет сложную форму, однако повторяет ее, с некоторыми искажениями, с постоянным периодом, равным  $3,6^\circ$ . С учётом того, что передаточное отношение волнового редуктора данного модуля  $i=100$ , период быстрой составляющей соответствует одному обороту двигателя либо перемещению гибкого колеса волнового редуктора на два зуба. Чтобы рассмотреть данную составляющую подробнее, на рисунке 2б приведён участок графика в увеличенном виде.

По представленному графику можно предположить, что два явно выраженных максимума на одном периоде данной помехи коррелирует с соответствующим числом зубьев волновой передачи, на которые перемещается за это время гибкое колесо. Опытным путём установлена высокая повторяемость данной кривой за серию испытаний модуля при отсутствии нагрузки.

Низкочастотную составляющую можно объяснить неточностью закрепления выходного вала модуля и вместе с ним датчика момента – несоосностью подшипниковой опоры. Повторяемость данной кривой также подтверждена испытаниями.

Коррекция сигнала осуществляется вычитанием из сигнала, поступающего с датчика момента, значений, рассчитанных нижеописанным способом. Каждая составляющая корректируется независимо. Во-первых, на основании полученной информации (рисунок 2) по методу наименьших квадратов полученная кривая аппроксимируется на всём промежутке изменения аргумента полиномом высокой степени вида

$$P_i(x) = \sum a_i x^i \quad (1)$$

Для коррекции используется совокупность точек, соответствующая данному полиному (значениям  $a_i$ ) с фиксированным шагом по оси угла. При значениях угла поворота шарнира, попадающих в диапазон между некоторыми двумя заданными точками, значение момента определяется линейной интерполяцией и рассчитывается как

$$M(x) = M_i(x) + [M_{i+1}(x) - M_i(x)] \cdot [x_{i+1} - x_i] / [x - x_i] \quad (2)$$

где  $x$ ,  $x_i$ ,  $x_{i+1}$  – текущее положение, левая и правая границы диапазона соответственно;  $M(x)$ ,  $M_i(x)$ ,  $M_{i+1}(x)$  – значения коррекции для перечисленных положений соответственно.

После вычитания рассчитанного сигнала (2) из исходного, оставшийся сигнал имеет вид, представленный на рисунке 4а, в котором формируется набор локальных максимумов и минимумов (отмечены знаками “+” на рисунке).

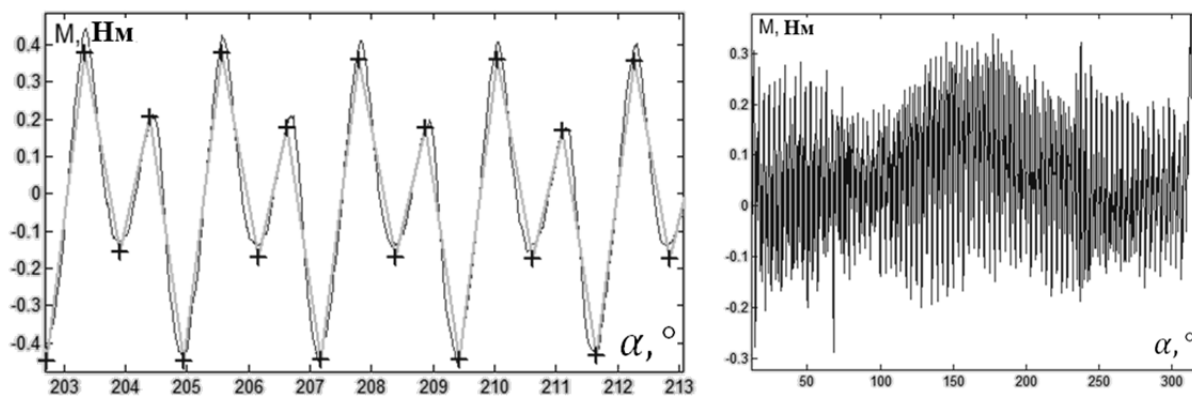


Рис. 4. Второй этап коррекции и итоговый результат

Таким образом, вторая составляющая компенсации определяется линейной интерполяцией полученного набора точек. После вычитания обеих составляющих компенсирующего сигнала результирующий сигнал датчика момента имеет вид, представленный на рисунке 4б. Сравнение значений погрешности до и после коррекции приведено в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительные значения погрешности датчика

Тип ошибки	Значение ошибки, Нм	
	До компенсации	После компенсации
Быстрая составляющая ошибки	1	0,35
Суммарная	3,8	0,4

Таким образом, достигается снижение амплитуды паразитного аддитивного сигнала в три раза для быстрой составляющей ошибки и в десять раз по суммарной, амплитуда паразитного сигнала, оставшегося после коррекции не превышает 1% от диапазона измерения датчика (75 Нм).

Несмотря на эффективность проведенной коррекции, полностью скомпенсировать паразитный сигнал оказалось невозможным, что вызывает значительные сложности в измерении производной его выходной величины.

#### Модель привода

В качестве приближения модели трехфазного вентильного двигателя, используемого для синтеза управления, рассматривается модель ДПТ, описываемая системой уравнений

$$\begin{cases} \tau_m(t) = C_m \cdot i_m(t); \\ e(t) = C_e \cdot \dot{\alpha}; \\ u(t) = e(t) + R_m \cdot i_m(t) + \frac{di_m(t)}{dt} \cdot L_m; \\ J_m \cdot \ddot{\alpha} = \tau_m(t) - \tau_{mext}(t) - \tau_{fric}(\dot{\alpha}, \tau_m - \tau_{mext}, t); \end{cases} \quad (3)$$

где  $\tau_m$  – момент двигателя,  $C_m, C_e$  – моментная и электрическая постоянные двигателя соответственно,  $e$  – противо-ЭДС двигателя,  $R_m, L_m$  – сопротивление и индуктивность якоря двигателя,  $J_m$  – момент инерции ротора двигателя,  $\tau_{mext}$  – внешний момент на валу двигателя,  $\ddot{\alpha}, \dot{\alpha}$  – ускорение и скорость угла поворота  $\alpha$  вала двигателя,  $\tau_{fric}$  – сила трения на валу двигателя,  $u$  – напряжение питания на обмотках двигателя.

Модель силы трения включает в себя две части: модель трения в статике (до начала движения) и модель трения в динамике (при движении). Такое моделирование трения является классическим и описано в литературе [5]. Более подробно можно записать так

$$\tau_{fric} = \begin{cases} F(\dot{\alpha}, t), & \text{если } |\dot{\alpha}| > \Delta \\ \tau_m - \tau_{mext}, & \text{если } |\dot{\alpha}| \leq \Delta, |\tau_m - \tau_{mext}| < F_S \\ F_S \cdot \text{sign}(\tau_m - \tau_{mext}), & \text{во всех других случаях} \end{cases} \quad (4)$$

где  $\Delta$  – небольшая величина, отражающая минимальную скорость движения, которая в рамках моделирования еще не считается равной нулю;  $F_S$  – величина статического трения (пиковая величина, отличающаяся от постоянной составляющей сухого трения);  $\text{sign}(\cdot)$  – функция знака своего аргумента;  $F(\dot{\alpha}, t)$  – динамическая модель трения.

В данной работе в качестве динамической модели трения использовалась модель LuGre со стандартной параметризацией [5].

Редуктор вважається безынерційним і абсолютно жорстким з коефіцієнтом редукції  $r$ . Таким образом, в системі залишається тільки одне упруге звено – датчик моменту.

Датчик моменту моделюється в формі упругого звена (звена другого порядку). Модель датчика моменту описується системою рівнянь

$$\begin{cases} \tau = C \cdot (\alpha / r - q); \\ J_{load} \ddot{q} = \tau + D \cdot C^{-1} \cdot \dot{\tau} - \tau_{ext} \end{cases} \quad (5)$$

де  $C$  – коефіцієнт жорсткості датчика моменту;  $J_{load}$  – момент інерції навантаження на вихідному валу шарніра (після датчика моменту), в загальному випадку, він залежить від часу і інших параметрів системи;  $D$  – коефіцієнт сили в'язкого тертя в матеріалі датчика;  $\tau$  – згинаючий момент на датчику;  $q$  – кут повороту вихідного валу модуля (після датчика моменту);  $\tau_{ext}$  – зовнішній момент на вихідному валу модуля.

Слідуючи фізиці процесу, очевидним є те, що зовнішній момент  $\tau_{mext}$  може бути переданий на вал ротора двигача тільки після попередньої деформації датчика моменту. Другими словами, момент зовнішніх сил на валу двигача  $\tau_{mext}$  численно рівно значенню моменту в датчику, т.е.

$$\tau_{mext} = \tau + D \cdot C^{-1} \cdot \dot{\tau} \quad (6)$$

Виходами даної моделі є наступні вимірні величини  $q$  – положення вихідного валу шарніра;  $\tau$  – момент деформації на датчику (вимірюваний тензорезистивним мостом);  $i$  – струм двигача;  $\dot{\alpha}$  – швидкість обертання валу двигача (рисунк 5).

В якості задаваної величини виступає напруга живлення двигача  $u$ .

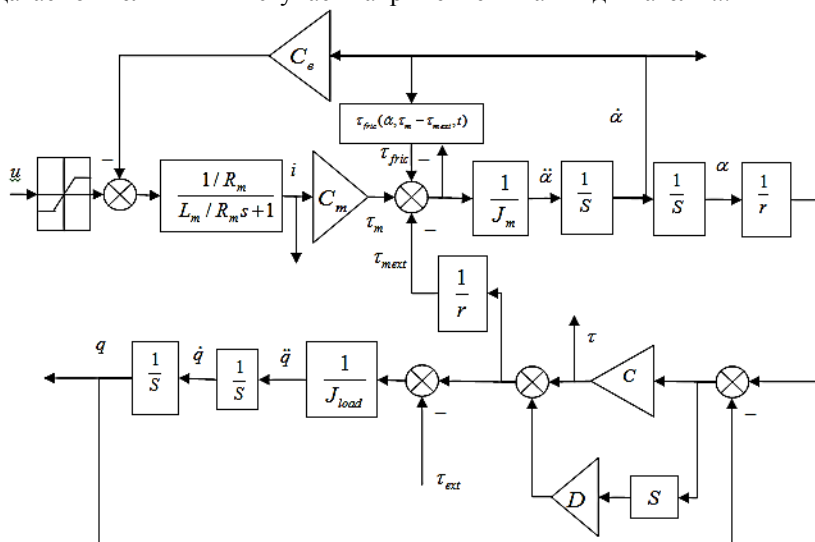


Рис. 5. Математическая модель привода

### Реализация нижнего уровня управления сигналом с датчика моменту шарніра

#### Пассивный регулятор моменту

Для силомоментного управления роботом используется классическая двухуровневая система управления. Верхний уровень (центральный контроллер или управляющая ЭВМ) отвечает за расчёт требуемых моменту приводов, обеспечивающих отработку заданного движения манипулятора в целом. Нижний уровень (контроллер привода) отвечает за динамику отработки моменту.

На нижнем уровне управления реализованы два типа управления.

Первый тип управления был представлен в [6], однако, здесь используются другие обозначения и способы выбора значений коэффициентов. Схема управления представлена на рисунке 6.

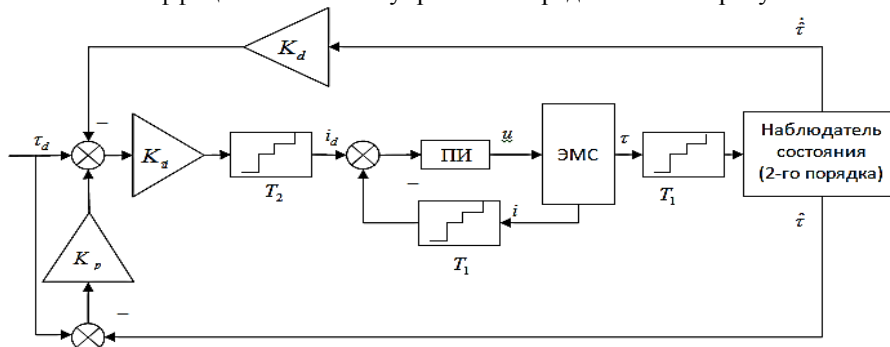


Рис. 6. Блок-схема контура управления моментом

На представленной на рисунке 6 схеме введены обозначения:  $\tau_d$  – требуемый (задаваемый) момент на двигателе;  $i_d$  – требуемый ток двигателя;  $\hat{\tau}$  – оценка момента  $\tau$ ;  $\dot{\hat{\tau}}$  – оценка производной момента;  $K_{\tau i}$  – коэффициент пропорциональности между током и моментом двигателя, рассчитанный в единицах измерения датчика момента;  $K_p$  – коэффициент адаптивной подтяжки;  $K_d$  – коэффициент демпфирования;  $T_1$  – интервал квантования в контуре управления током;  $T_2$  – интервал квантования в контуре управления моментом.

В качестве регулятора контура тока используется ПИ-регулятор. Желаемый ток  $i_d$  задается исходя из требуемого момента  $\tau_d$  по закону

$$i_d = K_{\tau i} \cdot \tau_d + K_{\tau i} \cdot K_p \cdot (\tau_d - \tau) - K_{\tau i} \cdot K_d \cdot \dot{\hat{\tau}} \quad (7)$$

Введение адаптивной подстройки позволяет уменьшить влияние трения  $\tau_{fric}$  на точность обработки момента, однако не устранить его полностью. Данный регулятор не обладает астатизмом, но зато обладает свойством пассивности [6]. Отсутствие астатизма в данном случае является преимуществом, смысл которого будет объяснен ниже. Все коэффициенты подбираются с учётом критерия обеспечения устойчивости.

Для восстановления скорости изменения момента был использован дискретный наблюдатель состояния второго порядка вида

$$\begin{bmatrix} \hat{\tau}_{k+1} \\ \dot{\hat{\tau}}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\tau}_k \\ \dot{\hat{\tau}}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \end{bmatrix} \cdot (\tau - \hat{\tau}_k) \quad (8)$$

Коэффициенты  $l_1, l_2$  наблюдателя подобраны с учетом обеспечения требуемого уровня фильтрации шумов и устойчивости.

Данный режим используется в тех случаях, когда точной обработки момента либо не требуется, либо систему необходимо целенаправленно “заглубить” по моменту (соответствующие случаи будут также показаны ниже в статье).

*Регулятор момента с внутренним скоростным контуром*

Второй тип управления использует внутренний скоростной контур управления. Из схемы, представленной на рисунке 1 видно, что при фиксации выходного вала шарнира ( $\dot{q} = 0$ ) управление моментом на датчике становится эквивалентным управлению положением вала двигателя. Для задачи управления положением вала двигателя широко применяется подчиненное управление. На рисунке 7 представлена применяемая схема управления.

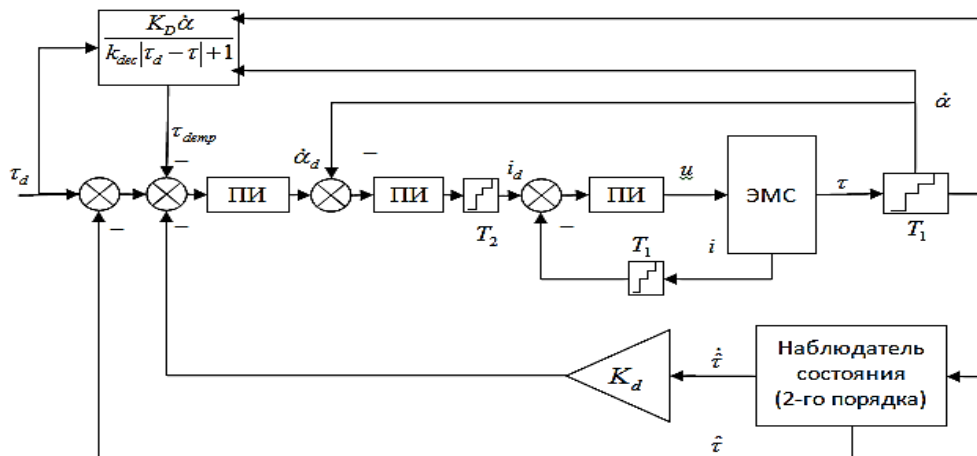


Рис. 7. Блок-схема контура управления моментом

На схеме добавлены следующие обозначения:  $\tau_{demp}$  – дополнительное нелинейное демпфирование по скорости вращения вала двигателя;  $k_{dec}, K_D$  – коэффициенты нелинейного демпфирования.

Данный регулятор состоит из следующих подчиненных контуров:

- контур тока (аналогичен контуру тока в предыдущем случае);
- контур скорости;
- контур момента;
- контур нелинейного демпфирования по скорости.

Контур скорости настраивается на максимальное быстродействие. Это необходимо для точной и быстрой обработки положения вала двигателя (которая, при фиксированном выходном вале модуля, по сути является обработкой момента).

Моментный контур замыкается через ПИ-регулятор. Наличие ПИ-регулятора позволяет придать системе определенные свойства. При замыкании моментного контура простым пропорциональным регулятором удастся добиться астатизма, однако быстродействие оказывается недостаточным. Введение ПИ-регулятора повышает быстродействие, но привносит в систему эффект сохранения кинетической энергии, который можно объяснить следующим образом.

Вращательное движение инерционного объекта без учета трения описывается уравнением

$$\ddot{\alpha}J = \tau, \quad (9)$$

т.е. до тех пор, пока суммарный момент не равен нулю, объект разгоняется, а после прекращения действия момента объект сохраняет постоянную скорость движения (кинетическую энергию). Аналогичная ситуация происходит при замыкании моментного контура ПИ-регулятором.

Для анализа вводится следующее допущение: после замыкания внутреннего токового и скоростного контуров, передаточную функцию по скорости приближенно можно считать звеном второго порядка (ошибка по скорости, вызванная внешним моментом и трением на валу двигателя, равна нулю)

$$W_{\dot{\alpha}} = \frac{\dot{\alpha}}{\dot{\alpha}_d} = \frac{K_{\dot{\alpha}}}{T_{\dot{\alpha}}^2 s^2 + 2\xi_{\dot{\alpha}} T_{\dot{\alpha}} s + 1} \quad (10)$$

Тогда схема управления моментом может быть перерисована в форме, представленной на рисунке 8.

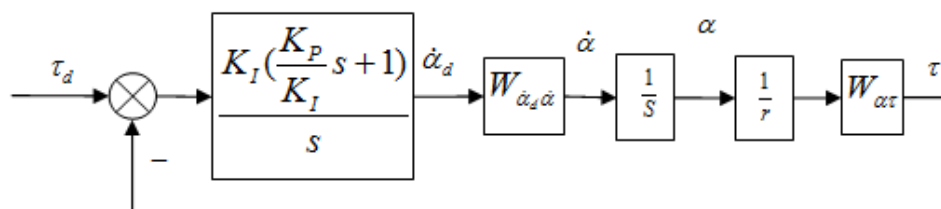


Рис. 8. Контур управления моментом с ПИ-регулятором

На схеме введены следующие обозначения:

$K_I$ ,  $K_P$  – интегральный и пропорциональный коэффициенты ПИ регулятора;

$W_{\alpha\tau}$  – передаточная функция от угла поворота вала двигателя (после редуктора), до момента деформации датчика;

$$W_{\alpha\tau} = \frac{[(C \cdot J_{load} - D^2) \cdot s - C \cdot D] \cdot s}{J \cdot s^2 + D \cdot s + C} \quad (11)$$

Система на рисунке 8 обладает астатизмом второго порядка по отношению к задающему воздействию. Система при  $\tau_d - \tau = 0$  и  $\dot{\alpha} \neq 0$  будет сохранять установившуюся скорость движения. Этот режим управления отражает идеологию использования модуля как идеального источника момента.

Однако, на практике такой режим управления не очень удобен, т.к. осуществление демпфирования (отвод накопленной кинетической энергии) с верхнего уровня дает плохие результаты в силу малой частоты обмена. Единственным выходом остается введение демпфирования по скорости на нижнем уровне, при этом сразу встает проблема быстродействия обработки по моменту (шарнир становится “вязким”). Решением является введение нелинейного демпфирования по скорости (рисунок 6), которое уменьшается при увеличении рассогласования по моменту (ускоряя, таким образом, его обработку) и приходит к номинальному значению при нулевом рассогласовании, останавливая систему. Дополнительным требованием к нелинейному демпфированию является гладкость характеристики, снижающая возможность возникновения автоколебаний. Для вышеперечисленных целей, в данной работе использовалась нелинейная функция демпфирования следующего вида

$$\tau_{demp}(\dot{\alpha}, \tau, \tau_d) = \frac{K_D \dot{\alpha}}{k_{dec} |\tau_d - \tau| + 1} \quad (12)$$

Кроме того, как и в первом регуляторе, в качестве демпфирующего сигнала заводится обратная связь по производной момента деформации на датчике  $\dot{\tau}$ , необходимая для подавления высокочастотных колебаний и улучшения переходных характеристик по моменту.

При пропорциональном регуляторе в контуре момента вместо ПИ-регулятора, система останавливается по достижении требуемого момента даже без введения дополнительного демпфирования, но ее быстродействие будет заметно меньше, чем у приведенной схемы.

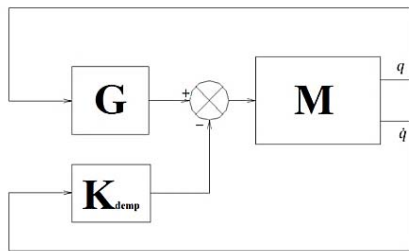
**Верхний уровень управления манипулятором**

На основе представленных алгоритмов управления моментом шарнира разработано два варианта (режима) управления верхнего уровня манипулятора с двумя активными степенями подвижности.

В первом режиме система управления компенсирует воздействие силы тяжести на манипулятор на основании данных о массах и расположении центров тяжести его звеньев. Блок-схема системы управления представлена на рисунке 9.

Здесь блок М – электромеханическая часть манипулятора, в приводах которого работает пассивный регулятор момента (рисунок 5), статическая ошибка обработки момента в котором компенсирует ошибку вычисления текущих моментов силы тяжести, действующих в каждом приводе и рассчитываемых в блоке G на основании известных текущих углов поворота модулей. Также предусмотрено демпфирование системы по угловой скорости (вектор  $K_{demp}$ ). Сигнал управления в соответствии со схемой имеет вид

$$U(q, \dot{q}) = G(q) - K_{demp} \cdot \dot{q} \tag{13}$$



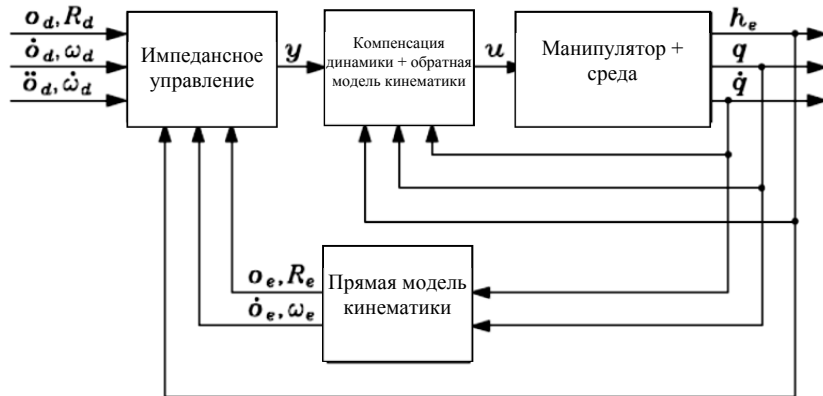
**Рис. 9. Блок-схема управления для режима компенсации силы тяжести**

Таким образом, воздействие силы тяжести компенсируется рассчитанным в блоке G моментами и при отсутствии других внешних воздействий манипулятор находится в состоянии покоя. В случае если в данном режиме прикладывать к манипулятору некоторое усилие, он будет перемещаться в соответствующем направлении со скоростью, пропорциональной усилию.

Описанный режим имеет важное и актуальное применение. Одним из широко применяемых способов задания траектории манипулятора является способ обучения показом. В случае включения манипулятора в режиме компенсации силы тяжести осуществляется разгрузка оператора от её воздействия, который воспринимает лишь силы сопротивления, вызванные

ограниченностью скорости двигателя, и инерционные усилия. Всё это позволяет оператору напрямую задавать траектории сложной формы в уже заданном рабочем пространстве, что является достаточно сложной задачей, с точки зрения алгоритмизации.

Вторым режимом является импедансное управление манипулятором, когда каждый привод манипулятора работает подобно упругому элементу, жёсткость и вязкость которого может задаваться. Обобщённая схема импедансного управления приведена на рисунке 10; конкретизированная схема управления, применявшаяся в экспериментах, приведена на рисунке 11.



**Рис. 10. Блок-схема импедансного управления**

Блоки М и G в схеме на рисунке 11 имеют тот же смысл, что и в схеме на рисунке 8. Блок S возвращает усилие, соответствующее реакции упругого элемента при отклонении  $q_d$  от требуемого положения на величину рассогласования. Блок D отслеживает, чтобы звенья манипулятора вращались с задаваемой скоростью  $\dot{q}_d$ , в случае если заданная скорость равна нулю, блок работает как демпфер. Управляющее воздействие на манипулятор в соответствии со схемой имеет вид:

$$U(q, \dot{q}, q_d, \dot{q}_d) = G(q) + S(q_d - q) + D(\dot{q}_d - \dot{q}) \tag{14}$$

Нижний уровень системы управления в данном режиме реализован в соответствии со схемой с внутренним скоростным контуром, отображённой на рисунке 6, и характеризуется максимально точной обработкой усилия. Таким образом, при отсутствии внешних воздействий манипулятор принимает задаваемое положение (звенья обрабатывают заданный угол). Погрешности позиционирования обусловлены лишь неточностями модели (расчёта воздействия силы тяжести). При любом отклонении манипулятора от заданной

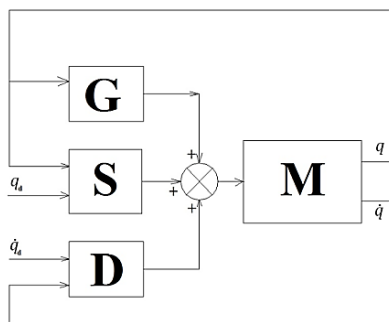


Рис. 11. Реализация импедансного управления

конфигурации, он стремится в неё возвратиться. В случае если манипулятор перемещается между заданными точками и встречает препятствие, момент сопротивления, создаваемый этим препятствием, не равен на приводах разных звеньев манипулятора, это приводит к изгибанию манипулятора вдоль данного препятствия и обходу его по контуру. Если к тому же задать ограничение на максимальное усилие, развиваемое виртуальным упругим элементом, то обеспечивается ограничение усилия при столкновении манипулятора с любым препятствием и таким образом, повышается безопасность его работы.

Верхний уровень управления реализован в среде Matlab, и для удобства работы был создан программный интерфейс с использованием модуля GUIDE (рисунок 12).

Программное обеспечение обеспечение управления верхнего уровня осуществляет расчёт компенсации гравитационного воздействия на звенья манипулятора и формирование сигналов управления в скомпенсированной системе. Связь компьютера с манипулятором осуществляется по интерфейсу CAN на частоте 125 кбит/с, интервал обмена составляет 100 мс.

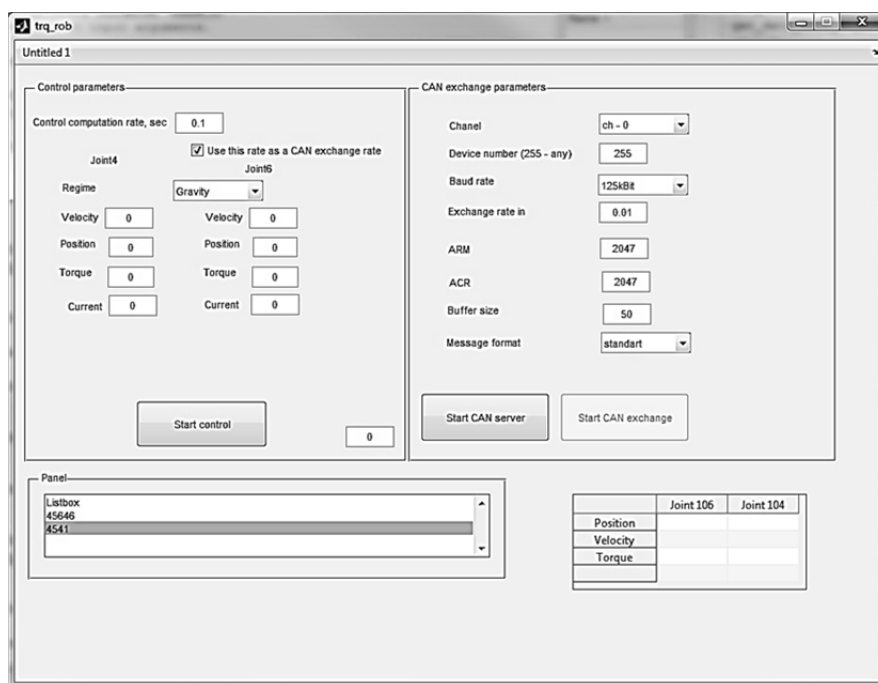


Рис. 12. Управляющий интерфейс

Экспериментально подтверждено удобство использования компенсации силы тяжести – при задании перемещения манипулятора, последний отслеживает движение рук человека с незначительным сопротивлением, при прекращении воздействия – плавно и достаточно быстро останавливается. В импедансном режиме установлена связь повторяемости возвращения в заданную точку с задаваемой жесткостью при различных вариантах отклонения, а также способность обхода жестко закрепленных и тяжелых препятствий. Серьезной проблемой остается уменьшение соотношения точности отработки траектории при импедансном режиме и задаваемой жесткости в каждой точке пространства.

### Заключение

Достигнуты результаты в силомоментном управлении двухстепенным манипулятором, в том числе доработан однокомпонентный датчик момента как важнейший элемент сенсорной системы, предложены и реализованы различные подходы к управлению при силомоментном оучувствлении. Экспериментально подтверждено удобство применения данных методов управления, а также проведена качественная оценка их работы. Выявлен круг задач, связанных с дальнейшей оптимизацией датчика момента и разработкой новых видов управления, решение которых позволит повысить динамические характеристики манипулятора и уменьшить влияние паразитных воздействий на систему управления. Применение силомоментного оучувствления на многостепенном манипуляторе так же может обеспечить значительное улучшение



характеристик движения, но при реализации могут возникнуть проблемы, связанные с взаимовлиянием степеней подвижности друг на друга.

**Abstract.** *This paper describes an approach to force control of two degrees of freedom robot manipulator. Aspects of control implementation concerning a joint torque sensor are discussed and a technique to its correction and calibration is presented. Two-level control scheme is used for the purposes of easier implementation. Such an approach has proved to be convenient in organizing general control structure and intrinsic to the two-time-scale dynamics of the system. For the fast part of system dynamics (corresponding to controlling the value measured by the torque sensor) detailed joint model is presented. Based on this model, two variants of torque control loop are developed and their terms of application are outlined. Two types of control strategies for the slow part of system dynamics include an impedance control regime and a regime of gravity compensation as well as trajectory tracking based on the impedance control.*

**Keywords:** *force-torque control, sensor, manipulator control*

#### Библиографический список использованной литературы

1. [http://www.lorenz-messtechnik.de/english/files/publications/Management\\_Systems\\_Calibration\\_Torque.pdf](http://www.lorenz-messtechnik.de/english/files/publications/Management_Systems_Calibration_Torque.pdf)
2. [http://www.lorenz-messtechnik.de/english/company/torque\\_measurement\\_technology.php](http://www.lorenz-messtechnik.de/english/company/torque_measurement_technology.php)
3. <https://measurementsensors.honeywell.com/ProductDocuments/Manuals/1800/OperatingService/Manual.pdf>
4. И.Ю. Далаев. «Датчик выходного момента шарнира». Экстремальная робототехника // Сборник докладов Все российской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехника-сервис», 2011. – 454с.;
5. Olsson H., Åström K.J., Canudas de Wit C., Gäfvert M., Lischinsky P., «Friction Models and Friction Compensation,» Eur. J. Control, т. Vol. 4, № 3, pp. 176-195, 1998.
6. Albu-Schaffer A., Ott C., Hirzinger G., «A passivity based Cartesian impedance controller for flexible joint robots - part II: full state feedback, impedance design and experiments,» 2004.

#### References

1. [http://www.lorenz-messtechnik.de/english/files/publications/Management\\_Systems\\_Calibration\\_Torque.pdf](http://www.lorenz-messtechnik.de/english/files/publications/Management_Systems_Calibration_Torque.pdf)
2. [http://www.lorenz-messtechnik.de/english/company/torque\\_measurement\\_technology.php](http://www.lorenz-messtechnik.de/english/company/torque_measurement_technology.php)
3. <https://measurementsensors.honeywell.com/ProductDocuments/Manuals/1800/OperatingService/Manual.pdf>
4. I. Dalayev. «Datchik vyhodnogo momenta sharnira». Ekstremal'naya robototekhnika. Sbornik dokladov Vse rossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferencii. Sankt-Peterburg: Izd-vo Politehnika-servis», 2011. 454p.;
5. Olsson H., Astrom K.J., Canudas de Wit C., Gafvert M., Lischinsky P., «Friction Models and Friction Compensation,» Eur. J. Control, t. Vol. 4, 3, pp. 176-195, 1998.
6. Albu-Schaffer A., Ott C., Hirzinger G., «A passivity based Cartesian impedance controller for flexible joint robots - part II: full state feedback, impedance design and experiments,» 2004.