

05, май 2016

УДК 681.518.2

**Оценка возможности использования метода косвенного измерения
момента на выходном валу привода для оптимизации конструкции
систем с силомоментной обратной связью**

***Черников В. В.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Робототехнические системы и мехатроника»*

***Огородник А. И.**, аспирант*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Робототехнические системы и мехатроника»*

Научный руководитель: Бошляков А.А., к.т.н, доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Робототехнические системы и мехатроника»*

kafsm7@sm.bmstu.ru

Экспериментальные исследования, результаты которых представлены в данной статье, являются частью научно-исследовательского проекта по разработке конструкции и системы управления антропоморфного захватывающего устройства для выполнения точных манипуляционных операций, в частности, работ по ручному разминированию при использовании на базе мобильного робототехнического комплекса. На начальных этапах проектирования было определено, что при разработке подобных антропоморфных устройств для обеспечения требуемого взаимодействия с объектами внешней среды важным условием является необходимость реализации и включения в состав системы управления элементов силомоментного оучувствления. А именно, в случае дистанционного копирующего способа управления, подразумевающего непосредственное участие оператора в формировании управляющих команд через задающее устройство, в системе управления необходимо иметь не только контур, замкнутый по положению и позволяющий с требуемой точностью воспроизводить заданное на управляющем органе перемещение рабочего органа, но и контур с силомоментной обратной связью, позволяющий воспроизводить на управляющем органе прикладываемые к объекту усилия для восприятия их оператором. Данное требование связано со следующим заключением:

не располагая информацией о силовом взаимодействии с внешними объектами и не ощущая рукой, перемещающей управляющую рукоятку, сил и моментов реакций, воздействующих на манипулятор со стороны объекта, человек-оператор своими действиями может вызвать появление слишком больших сил, способных привести к поломке манипулятора или объекта манипулирования.

При использовании конструкции захватывающего устройства, в состав которой входит определенное число вращательных кинематических пар в виде цилиндрических шарниров, для реализации силомоментного оцувствления в первую очередь необходимо располагать данными о моментах, приложенным к этим шарнирам в каждый момент времени. Эти данные при этом должны быть использованы для формирования соответствующих управляющих сигналов приводов задающего устройства, воспроизводящих идентичное воздействие на руку оператора.

Наиболее распространенным решением подобных задач является использование дополнительных датчиков моментов на выходных валах каждого из приводов и включение их в состав системы управления. Однако при проектировании антропоморфных захватывающих устройств, размеры которых соизмеримы с параметрами человеческой руки, одним из ключевых требований является максимально возможная оптимизация конструкции с целью минимизации её масса-габаритных характеристик [1] – [3]. Использование же дополнительных датчиков, преобразующих величину момента на выходе привода в электрический сигнал напрямую, не соответствует данному требованию, поскольку подразумевает включения в конфигурацию схвата помимо непосредственно преобразователей ряда дополнительных элементов, в частности, крепежных деталей, что существенно усложняет общую конструкцию.

При исследовании возможных вариантов решения данной проблемы была рассмотрена зависимость момента, действующего на шарнир, от тока, протекающего в обмотке возбуждения двигателя, и предложен основанный на ней так косвенный способ измерения величины приложенного к шарниру момента на основании данных о величине тока в обмотке возбуждения. Данный способ определения величины момента подразумевает использование лишь датчика тока, который не требует размещения в области подвижных частей конструкции и может быть установлен за её пределами на плате управления. При постоянном магнитном потоке имеет место линейная зависимость момента на роторе M_1 от тока I , протекающего в статорных обмотках:

$$M_1 = k \cdot I, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

С заданной степенью точности момент на выходном валу передачи M_2 можно определить по формуле:

$$M_2 = M_1 \cdot i \cdot \eta, \quad (2)$$

где i – передаточное число редуктора в составе передачи; η – КПД передачи.

Подставив (1) в (2) получим формулу для косвенного определения момента на основании данных о величине тока:

$$M_2 = k \cdot I \cdot i \cdot \eta \quad (3)$$

В формуле (3) передаточное число редуктора i и коэффициент пропорциональности k с заданной степенью точности являются заранее известными постоянными величинами, в то время как КПД редуктора η для большинства устройств не является заранее известным параметром и требует экспериментального определения. При этом следует учитывать тот факт, что в зависимости от типа передачи потери в ней определяются набором различных составляющих, таких как потери на трение в зацеплении, потери из-за наличия упругих элементов и люфтов, и их значения могут варьироваться при работе в статических и динамических режимах, а также зависеть от ряда других факторов. В связи с чем, предложенная математическая модель (3) представляет лишь приблизительное описание зависимости тока в обмотках двигателя от момента на выходном валу передачи и в каждом случае требует эмпирического подтверждения и уточнения. Проведенный анализ литературы по данной проблематике показал, что при наличии большого числа исследований зависимости тока в обмотках возбуждения двигателя постоянного тока от момента на его валу работ по изучению подобной зависимости в приводах при наличии различного типа передач (то есть зависимости тока в обмотках возбуждения двигателя от момента на выходном валу передачи) крайне мало. Это заключение послужило основанием для проведения дополнительных исследований, описание которых приведено в данной работе.

Представленные в данной статье экспериментальные исследования направлены на оценку работоспособности предложенного метода косвенного определения величины момента на выходном валу передачи по данным о значении тока, протекающего в обмотке возбуждения двигателя, при изначальном отсутствии данных о величине КПД передачи и определение возможности его использования в разрабатываемой системе. При этом, поскольку оценку величины момента по измеряемым значениям тока в разрабатываемом устройстве необходимо проводить в первую очередь в динамическом режиме работы, эксперимент для определения КПД передачи проводился в схожих с реальными условиях.

В конструкции захвата подразумевается использование различных типов редукторов в составе исполнительных приводов. Первоначальные исследования концепции описанного выше метода было решено провести на базе имеющегося лабораторного испытательного стенда, оснащенного двумя двигателями постоянного тока, валы которых соединены ременной передачей, а также датчиком момента, позволяющим преобразовывать усилия на выходном валу передачи в электрический сигнал. В рамках следующих этапов работы на основании полученных данных и имеющихся наработок планируется разработать специальный испытательный стенд для конкретного типа редуктора и провести подобные исследования с целью использования полученных результатов при проектировании системы управления конечного устройства.

Для обеспечения требуемого функционирования испытательного стенда и получения экспериментальных данных и были разработаны дополнительные модули управления и программное обеспечение, в результате чего был сконфигурирован специализированный испытательный комплекс, имеющий в своем составе следующие представленные на функциональной схеме (рис. 1) элементы:

- испытательный стенд;
- микропроцессорная плата управления;
- плата усилителя мощности с датчиком тока и элементами сопряжения;
- дополнительная плата усилителя мощности на базе операционного усилителя для обработки данных с датчика момента;
- персональный компьютер с программным обеспечением для обработки и визуализации результатов эксперимента;
- источники питания.

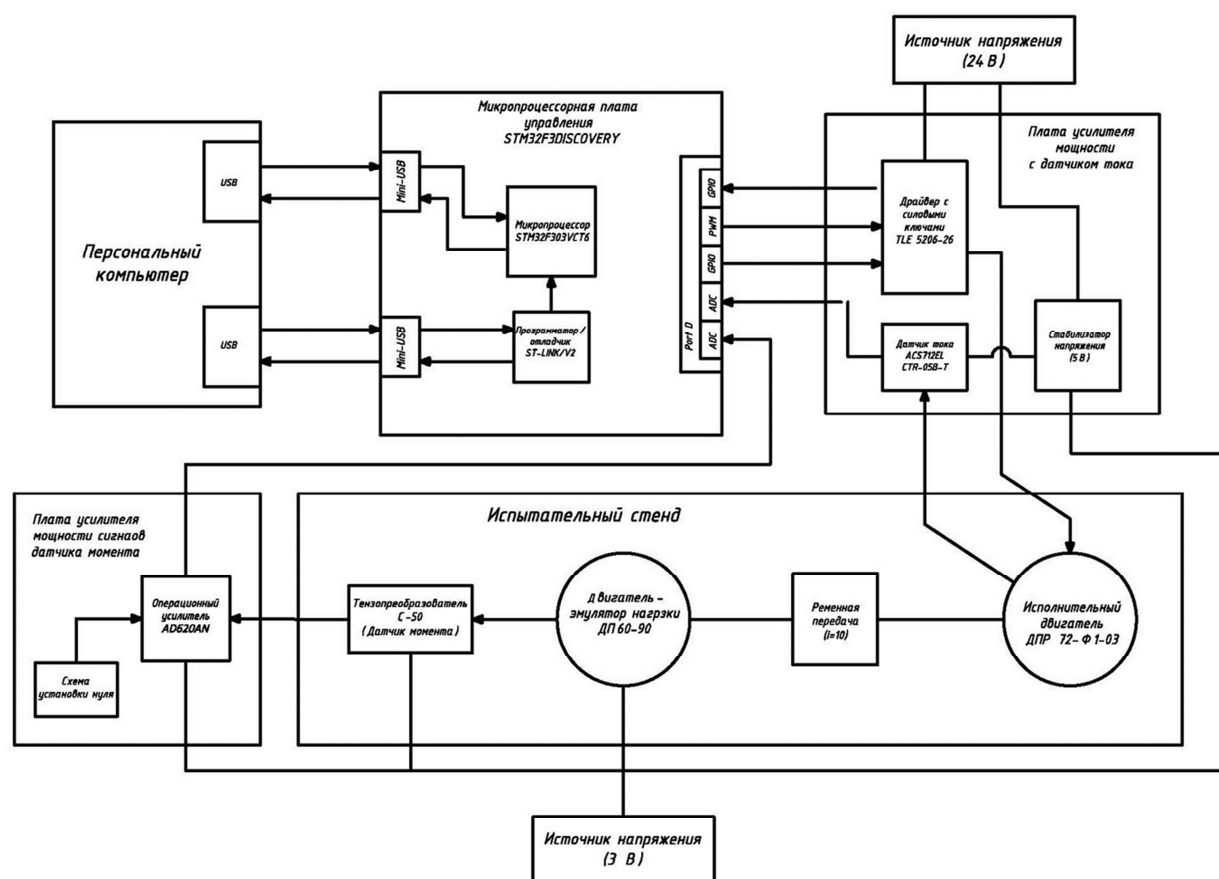


Рис. 1. Функциональная схема испытательного комплекса

Испытательный стенд, внешний вид которого представлен на рис. 2, состоит из основания и платформ. Основание состоит из направляющих, на которых устанавливаются платформы, и корпусных деталей, в которых крепятся направляющие.

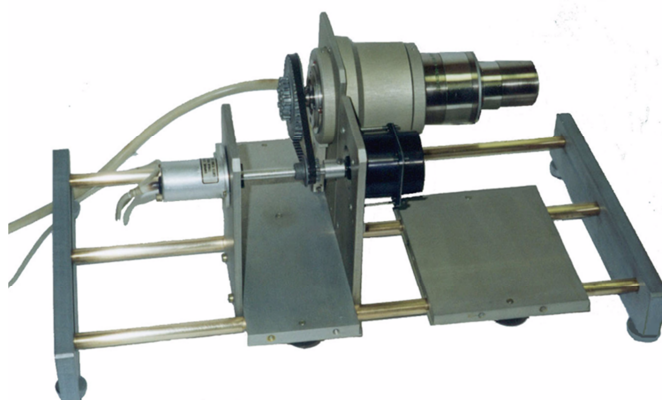


Рис. 2. Внешний вид испытательного стенда

Основание служит для фиксации положения в пространстве платформ с элементами исследуемого электрического привода и содержит направляющие для координации взаимного положения платформ и, соответственно, установленных на них элементов электрического привода. В конфигурации для проведения описанного выше эксперимента задействована платформа с установленными на ней исполнительным двигателем постоянного тока ДПР-72-Ф1-03 и модулем эмулятора динамической нагрузки на базе двигателя постоянного тока ДП-60-90 с датчиком момента так, что валы этих двигателей расположены параллельно. Посредством зубчатых колес на валах двигателей и зубчатого ремня организована ременная передача с передаточным отношением $i = 10$.

Представленный на рис. 3 модуль эмулятора динамической нагрузки в составе стенда функционально состоит из силовой части и измерительного модуля для определения величины момента на выходном валу передачи.

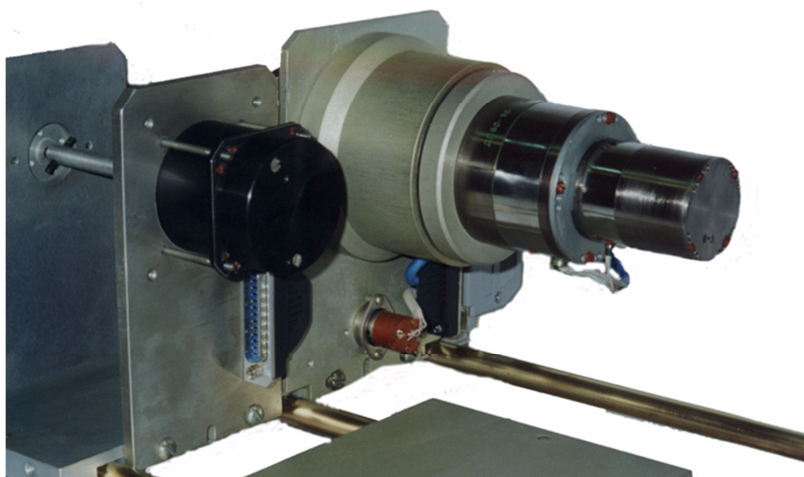


Рис. 3. Внешний вид модуля эмулятора нагрузки

Силовая часть представляет собой малоинерционный двигатель постоянного тока независимого возбуждения типа ДП 60-90, установленный на кронштейне специальной конструкции. Крепление двигателя осуществляется таким образом, что корпус двигателя установлен в подшипниках и имеет возможность свободно вращаться вокруг своей оси. Эта особенность положена в основу метода измерения момента. Измерение момента на валу двигателя осуществляется путем измерения момента на корпусе двигателя. При возникновении момента на валу двигателя, такой же по величине и противоположный по направлению момент возникает и на корпусе двигателя. Если корпус двигателя связан с упругим элементом, то по величине деформации этого упругого элемента можно

определить величину действующего на корпус момента и, следовательно, величину момента на валу двигателя.

В качестве упругого элемента используется тензопреобразователь усилия типа С-50 с чувствительным элементом на сапфировой пластине, служащим для измерения величины деформации. При этом наличие упругого элемента в контуре управления не приводит к ухудшению динамических свойств системы, т.к. жесткость упругого элемента – сапфировой пластины – весьма высока.

Для усиления выходного сигнала тензопреобразователя с целью его последующей оцифровки была разработана дополнительная плата на базе интегрального инструментального операционного усилителя серии AD620AN. Коэффициент усиления в этом усилителе задаётся при помощи единственного резистора, подключаемого к соответствующим выводам микросхемы, и в данном случае с учетом ожидаемой величины исходного сигнала тензопреобразователя и параметров аналогово-цифрового преобразователя его величина была сформирована на уровне $k = 50$. С целью исключения дополнительных погрешностей измерения в устройстве была также реализована схема установки нуля с использованием прецизионного потенциометра.

Для управления исполнительным двигателем постоянного тока ДПР-72-Ф1-03 была разработана плата усилителя мощности на базе интегрального мостового драйвера двигателей серии TLE5206-2. Ключи в составе микросхемы позволяют управлять обмотками двигателей с протекающими по ним токами до 5А в продолжительном режиме работы и до 6А при кратковременных перегрузках. Управление драйвером реализуется двумя логическими сигналами уровня TTL. Для оценки величины тока в обмотке возбуждения двигателя на плате усилителя мощности также установлен прецизионный интегральный датчик тока типа AllegroACS712, построенный на основе эффекта Холла. Выходное напряжение датчика, лежащее в диапазоне от 1,5 В до 3,5 В, пропорционально току, протекающему через проводящий канал интегральной микросхемы, а, следовательно, и току, протекающему в обмотке возбуждения двигателя, при последовательном включении в неё данного канала.

Для генерации сигналов управления драйвером двигателей, сбора и оцифровки сигналов с датчика тока и усиленных сигналов тензопреобразователя в составе датчика момента, а также последующей обработки полученных данных и передачи их в ПК для статистического анализа в эксперименте была использована высокоинтегрированная отладочная плата STM 32F4DISCOVERY на базе микроконтроллера семейства STM32F303. С учетом особенностей проводимого эксперимента микропроцессорная плата управления реализует следующий алгоритм:

1) Генерация сигналов управления микросхемы драйвера двигателя - ШИМ сигнала с частотой 10 кГц (сигнал управления № 1) и сигнала высокого/низкого уровня для установки требуемого направления вращения (сигнал управления № 2).

2) Синхронизированная с сигналами управления выборка в течение заданного промежутка времени, оцифровка и обработка аналоговых сигналов с датчика тока и усиленных на ОУ сигналов с датчика момента (тензопреобразователя).

3) Передача обработанных и структурированных данных в ПК через протокол UART с целью проведения последующего статистического анализа для получения и визуализации результатов эксперимента в среде пакета MATLAB.

Рассмотрим математическую модель стенда для снятия экспериментальной зависимости тока от момента, приложенного к выходному валу передачи. В дальнейших выкладках подразумевается, что двигатель 1 является нагружающим, а двигатель 2 – исполнительным.

Запишем уравнение баланса моментов для случая, когда ремень считается нерастяжимой, невесомой нитью:

$$M_{\text{ДВ2}} = (J_{\text{P1}} \cdot i^2 + J_{\text{P2}}) \ddot{\varphi} + M_{\text{ДВ1}} \cdot i + M_{\text{ТР}}(M_{\text{ДВ2}}, M_{\text{ДВ1}}, \varphi, \dot{\varphi}), \quad (4)$$

где $M_{\text{ДВ1}}, M_{\text{ДВ2}}$ – моменты двигателей 1, 2; $J_{\text{P1}}, J_{\text{P2}}$ – момент инерции; i – передаточное отношение; φ – угол вращения ротора исполнительного двигателя; $M_{\text{ТР}}$ – момент трения приведенный к валу исполнительного двигателя.

Тогда, если известны радиусы шкивов:

$$M_{\text{ДВ2}} = \left(J_{\text{P1}} \frac{r^2}{R^2} + J_{\text{P2}} \right) \ddot{\varphi} + M_{\text{ДВ1}} \cdot \frac{r}{R} + M_{\text{ТР}}, \quad (5)$$

где R – радиус шкива нагружающего двигателя; r – радиус шкива исполнительного двигателя.

Следует отметить, что уравнения (4) и (5) верны в случае, когда податливостью ремня и датчика силы можно пренебречь, а также перемещения много больше люфтов.

Определим эти условия.

Пусть датчик с рычагом имеют жёсткость $k_{\text{Д}}$ относительно поворота стакана с нагружающим двигателем, тогда собственная частота резонанса конструкции будет $\omega_{\text{Д}} = \sqrt{\frac{k_{\text{Д}}}{J_{\text{С}}}}$, где $J_{\text{С}}$ – момент инерции вращающегося стакана нагружающего двигателя и его статора. Собственные частоты резонанса, обусловленные податливостью ремня $\omega_1 =$

$\sqrt{\frac{k_p \cdot R^2}{J_{P1}}}$, где k_p – жесткость ремня на растяжение. Запишем уравнения математической модели двигателя постоянного тока $\omega_2 = \sqrt{\frac{k_p \cdot r^2}{J_{P2}}}$.

Податливостью ремня и датчика силы можно пренебречь, если выполняются соотношения:

$$\begin{cases} \omega \ll \omega_d \\ \omega \ll \omega_1 \\ \omega \ll \omega_2 \end{cases}, \quad (6)$$

где ω – частота задающего сигнала двигателей при синусоидальном законе движения.

Таким образом, система уравнений (6) накладывает ограничение на диапазон частот, в котором стенд можно использовать для снятия характеристик привода.

Запишем систему уравнений математической модели двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов:

$$\begin{cases} U = R \cdot I + L \frac{dI}{dt} + C_E \cdot \omega \\ M_{ДВ} = C_M \cdot I \\ J \cdot \varepsilon = M_{ДВ} - M_{СТ} - \beta \cdot \omega \end{cases}, \quad (7)$$

где U – напряжение; R, L, I – сопротивление, индуктивность и ток якорной цепи; C_E, C_M – постоянные противоЭДС и момента двигателя; J – момент инерции якоря; ω, ε – угловые скорость и ускорение; $M_{СТ}$ – момент сухого трения двигателя; β – постоянная вязкого трения.

Тогда из (5) и (7) в статическом режиме ($\varepsilon = \omega = \frac{dI}{dt} = 0$), пренебрегая вязким трением, получим:

$$M_{ДВ2} = M_{ДВ1} \cdot \frac{r}{R} + M_{ТР} \quad (8)$$

$$M_{ДВ1} = \frac{R}{r} (C_M \cdot I - M_{ТР}) \quad (9)$$

Таким образом из уравнения (9) следует возможность теоретической оценки момента на выходе привода ($M_{ДВ1}$) по току в цепи якоря двигателя с точностью до момента трения. Для уточнения полученной модели в рамках работы были проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены ниже.

В рамках экспериментальных исследований была проведена серия из девяти экспериментов, в которых последовательно увеличивался создаваемый двигателем-эмулятором момент нагрузки. Регулировка момента нагрузки в экспериментах осуществлялась посредством изменения величины напряжения, подаваемого к обмотке возбуждения двигателя-эмулятора нагрузки, в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1

№ эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Напряжение на обмотке возбуждения двигателя-эмулятора нагрузки, В	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1

В каждом эксперименте производились измерения тока в обмотке возбуждения двигателя и вычисления его среднего значения за период управляющего ШИМ-сигнала, а также измерения соответствующей ему в данный момент времени величины момента на выходном валу передачи. Измерения проводились в течение 4000 периодов ШИМ, что при частоте управляющего ШИМ-сигнала $\nu_{\text{ШИМ}} = 10 \text{ кГц}$ соответствует 400 мс.

На рисунках 4 и 5 показаны графики экспериментальных зависимостей величины момента на выходном валу M и величины тока в обмотке возбуждения двигателя I от времени t , полученных в ходе эксперимента № 1. На графиках отображены средние значения измеряемых величин, а также границы доверительных интервалов с уровнем доверия 68%.

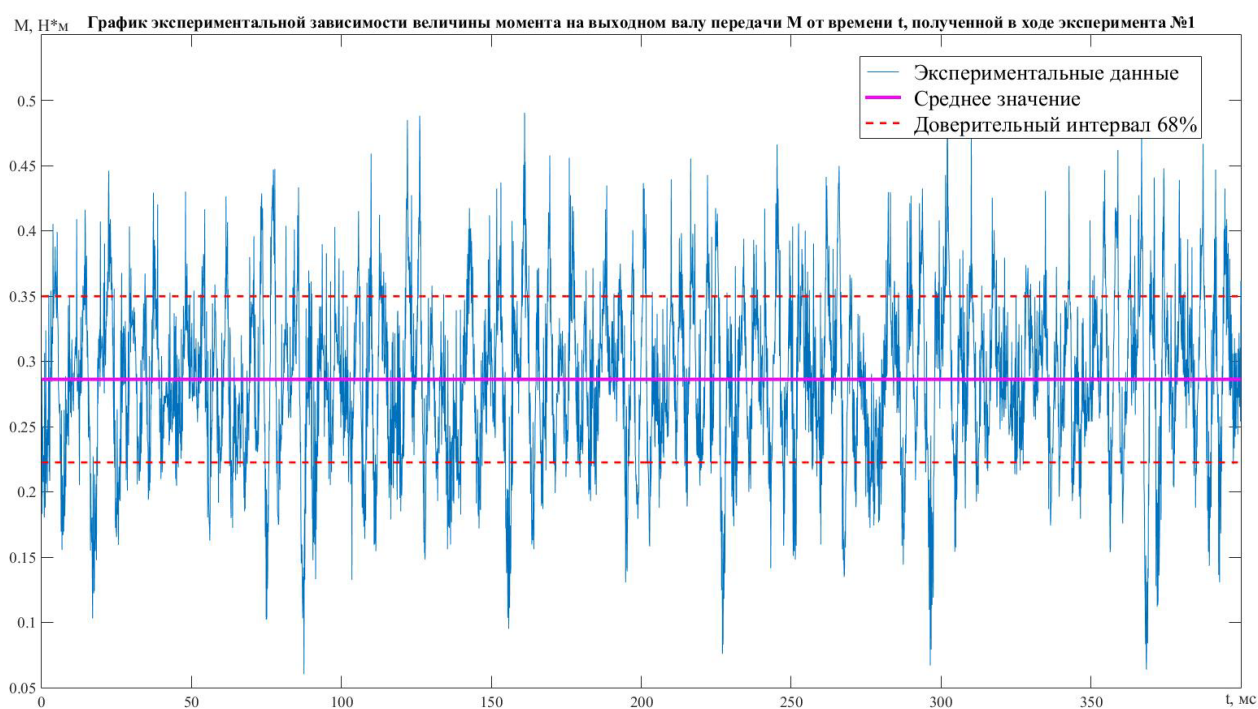


Рис . 4. График экспериментальной зависимости величины момента на выходном валу передачи от времени, полученной в ходе эксперимента № 1

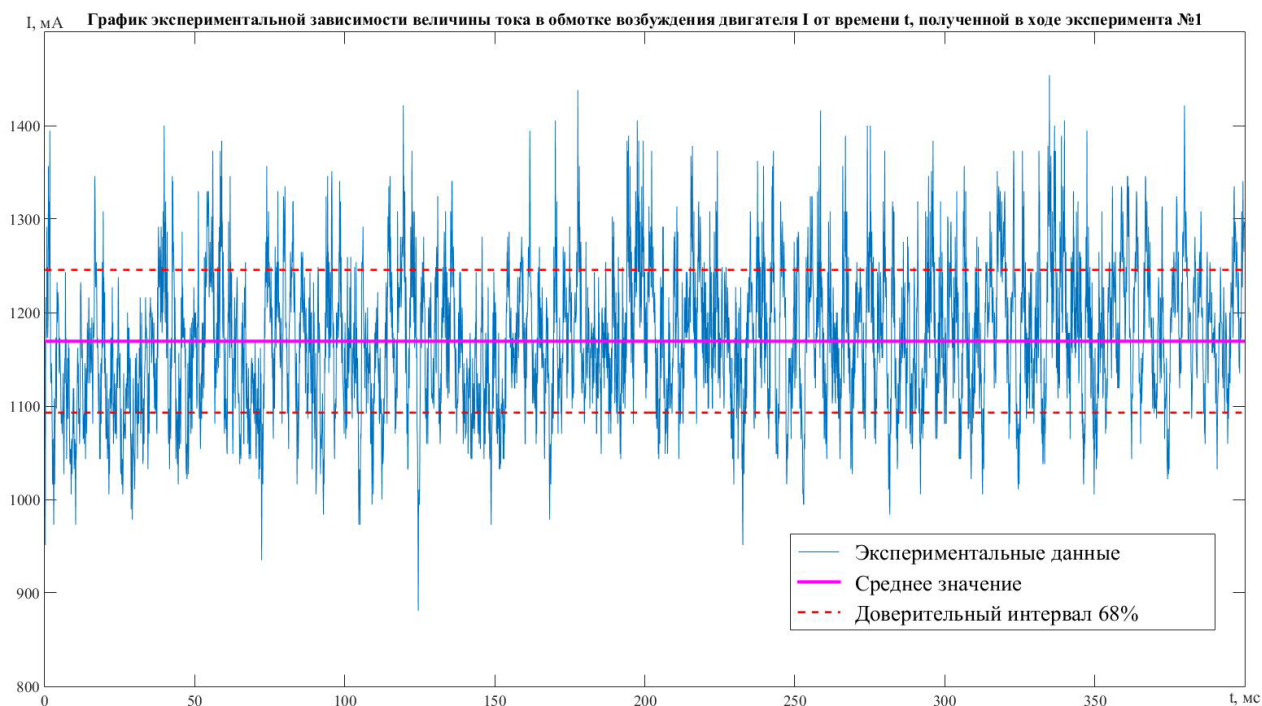


Рис. 5. График экспериментальной зависимости величины тока в обмотке возбуждения от времени, полученной в ходе эксперимента № 1

Среднеквадратичное отклонение величины момента, полученной в ходе данного эксперимента, составило 0.0636 Н·м, а тока – 76 мА. Для исследования влияния особенностей конструкции передачи на среднеквадратичное отклонение полученной в величины момента был проведен дополнительный эксперимент, в котором не была задействована передача, а аналогичная экспериментальная зависимость величины момента на выходном валу M от времени t снималась при условии, что к выходному валу двигателя-эмулятора нагрузки был приложен постоянный по величине внешний момент. Среднеквадратичное отклонение измеренной величины в этом случае составило лишь 0.0045 Н·м, а полученная экспериментальная зависимость величины момента на выходном валу M от времени t приняла вид, представленный на рис. 6. На основании полученных данных был сделан вывод о том, что величина среднеквадратичного отклонения в ходе экспериментов в большей степени определялась использованием передачи с зубчатыми колесами и ремнем. Наличие данных элементов также является причиной наличия постоянной периодической составляющей в зависимостях на рис. 4 – 5.

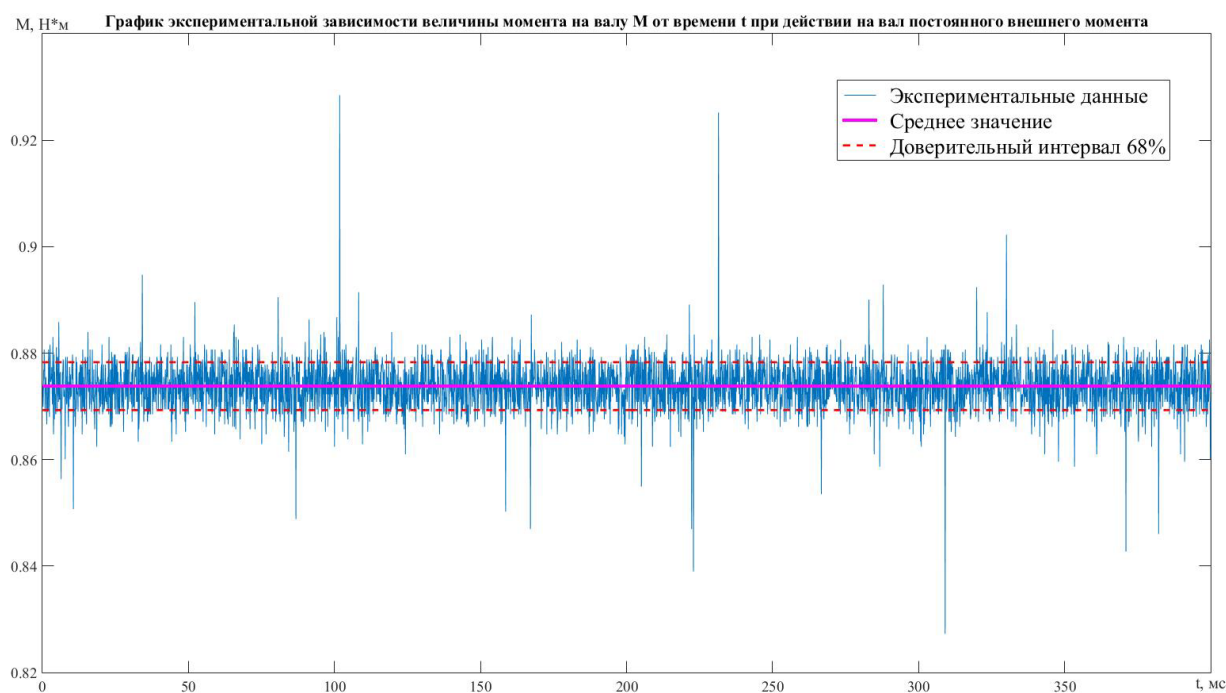


Рис. 6. График экспериментальной зависимости величины момента на валу от времени при действии на вал постоянного внешнего момента

В таблице 2 представлены результаты статистического анализа данных, полученных в ходе экспериментов 1 - 9.

Таблица 2

№ эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Среднее значение момента, Н·м	0,286	0,303	0,324	0,342	0,350	0,379	0,392	0,413	0,417
Среднеквадратичное отклонение момента, Н·м	0,063	0,065	0,055	0,054	0,050	0,052	0,053	0,053	0,053
Отношение средне-квадратичного отклонения момента к его среднему значению, %	22,2	21,4	17,1	16,0	14,5	13,9	13,7	12,8	12,8
Среднее значение тока, мА	1169	1295	1299	1361	1396	1529	1584	1600	1675
Среднеквадратичное отклонение тока, мА	76	146	78	82	82	80	81	84	72
Отношение среднеквадратичного отклонения тока к его среднему значению, %	6,5	11,3	6,0	6,0	5,9	5,2	5,1	5,3	4,3

На рис. 7 представлен график отношения тока в обмотке возбуждения двигателя от момента на выходном валу передачи, полученный в ходе экспериментов 1 – 9, а также полином первой степени, аппроксимирующий экспериментальные данные, с нанесенными доверительными интервалами с уровнем доверия 95%.

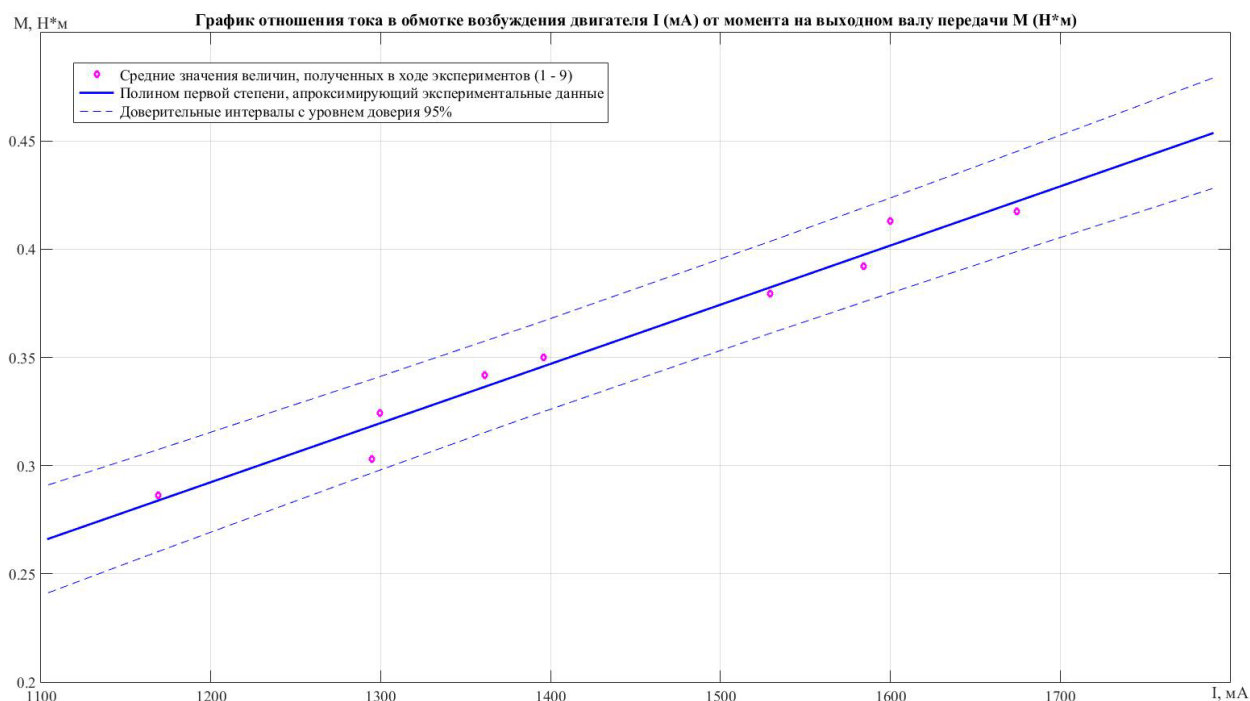


Рис. 7. График отношения тока в обмотке возбуждения двигателя от момента на выходном валу передачи

Из графика видно, что экспериментальные данные удалось успешно аппроксимировать полиномом первого порядка и получить линейную зависимость измеряемых величин, что в данном случае указывает на постоянство значения КПД передачи на протяжении всей серии экспериментов. С вероятностью 95% величина погрешности определения значения момента на выходе передачи на основании данных о величине тока в обмотке возбуждения двигателя с использованием зависимости, полученной после аппроксимации экспериментальных данных, будет лежать в обозначенных пунктирными линиями на графике пределах.

В результате проведенных исследований был сделан вывод о возможности оптимизации конструкции антропоморфных захватов посредством применения предложенного метода косвенного измерения момента для организации силомоментной обратной связи в системе управления подобных устройств. Однако при этом, в связи с наличием многочисленных факторов, влияющих на потери в передаче и зависящих от её типа и режимов работы, для получения реалистичной зависимости между моментом,

приложенном к шарниру, и током в обмотке двигателя и использования её в рамках метода помимо обобщенной теоретической модели необходимо также располагать экспериментальными данными, полученными для конкретных режимов работы и типов передач. В свою очередь для получения экспериментальных данных, на основании которых можно было бы значительным образом уточнить получаемую теоретически математическую модель, требуется построение сложных экспериментальных стендов, оборудованных высокоточными измерительными средствами, а также использование сложных алгоритмов обработки экспериментальных данных.

В данной работе были проведены исследования метода на примере ременной передачи, на основании которых был сделан вывод о возможности применения подобного подхода и в передачах другого типа, в частности, шестереночного, на базе которого планируется создание конструкции антропоморфного захвата. Учитывая большее количество факторов, влияющих на КПД зубчатой передачи по сравнению с ременной, таких как наличие люфтов, трения в зацеплении, трения в подшипниках, при создании испытательного стенда для определения экспериментальной зависимости необходимо использовать более точные средства измерения моментов, а также более совершенные алгоритмы обработки данных. Выводы, полученные в ходе данных исследований, были взяты за основу разработки специального испытательного комплекса для проведения аналогичных экспериментов с использованием приводов, оснащенных зубчатыми передачами.

Список литературы

- [1]. Мокаева А. А. Разработка конструкции электромеханического модуля отведения указательного пальца антропоморфного схвата в пястно-фаланговом суставе // Молодежный научно-технический вестник.. Электрон. журн. 2015. № 11. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/818375.html> (дата обращения 15.01.2016).
- [2]. Салас Кардеро С. К. Проектирование электромеханического привода трапецеидального сустава антропоморфного схвата робота // Молодежный научно-технический вестник. Электрон. журн. 2015. № 07. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/800296.html> (дата обращения 15.01.2016).
- [3]. Ланцев В. Ю. Разработка конструкции электромеханического модуля сгибания большого пальца антропоморфного схвата // Молодежный научно-технический вестник. Электрон. журн. 2015. № 10. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/816327.html> (дата обращения 15.01.2016).