УДК 681.5 URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/robots/1132.html

РЕАЛИЗАЦИЯ ТАКТИЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

М.П. Голубев gmp-31@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Внедрение в приводы алгоритмов интеллектуального управления и систем-помощников осуществляется посредством разрыва механической связи между оператором и манипулируемым объектом. Такой разрыв приводит к полной потере тактильной информации, вследствие чего процесс управления становится небезопасным и неинтуитивным. В статье предложен способ восстановления механического отклика введением в систему токовой обратной связи, что позволяет точно оценить момент нагрузки без использования специальных датчиков и формировать простую и надежную билатеральную систему управления. В работе подробно описана реализация тактильной обратной связи с применением токового управления коллекторными двигателями постоянного тока: разработана архитектура системы, подобрана компонентная база, сформированы управляющие контуры. Разработанный стенд позволяет исследовать процессы в предлагаемой билатеральной системе управления.

Ключевые слова: электропривод, мехатроника, система управления, билатеральное управление, токовое управление, следящий привод, ПИД-регулятор

Введение. В машиностроении наблюдается устойчивая тенденция к замене традиционных гидравлических и механических узлов интеллектуальными электрическими приводами [1]. Такое решение позволяет существенно снизить массу конструкции, упростить компоновку и обеспечить гибкую программную настройку системы. Однако полная изоляция оператора от исполнительного механизма приводит к потере естественной тактильной обратной связи, критически важной для точности и безопасности управления [1, 2].

Целью данной работы является исследование и практическая реализация системы билатерального управления. В статье рассмотрен стенд из двух двигателей постоянного тока, где передача силы осуществляется с помощью алгоритма контроля тока, что позволяет имитировать физический отклик без использования дорогостоящих датчиков силы.

При реализации цели были поставлены следующие задачи:

1) описать принципы работы билатеральных системы управления. Показать преимущества использования токовой обратной связи;

2) разработать архитектуру исследовательского стенда;

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

3) подобрать компонентную базу;

4) разработать управляющие контуры по положению и по току;

5) реализовать билатеральную систему управления.

Принципы билатерального управления. Билатеральное управление — это метод организации связи между ведущим устройством (master) и ведомым (slave), в котором master-контроллер передает заданные координаты на slave-привод, в то время как slave возвращает информацию о силе сопротивления среды [1]. Такое взаимодействие проиллюстрировано на рис. 1, где F_h, X_h — сила и перемещение на стороне оператора (от англ. *human*), F_s, X_s — на стороне ведомого устройства (от англ. *slave*).

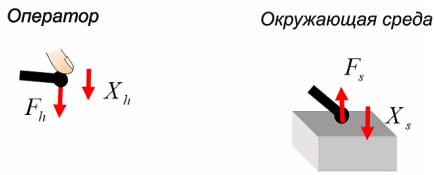


Рис. 1. Билатеральная система

Использование токовой обратной связи позволяет отказаться от установки дорогостоящих и чувствительных к вибрациям датчиков силы в пользу программного наблюдателя реактивной силы (Reaction Force Observer — RFOB) [2–4]. Данный подход базируется на пропорциональной зависимости между током обмоток и крутящим моментом двигателя, что превращает электропривод в прецизионный измерительный инструмент:

$$M = k_m I. \qquad (*)$$

В результате система избавляется от аппаратных шумов тензодатчиков, сохраняя при этом высокую точность передачи тактильных ощущений при значительном упрощении и удешевлении конструкции.

Одно из применений данного подхода реализовано в системе электронных тормозов (Brake-by-Wire — торможение по проводам) [3, 4]. В таких конфигурациях отсутствие прямой гидравлической связи требует искусственного воссоздания сопротивления педали, что в современных исследованиях [1, 2] реализуется через алгоритмы билатерального управления. Работа системы проиллюстрирована на рис. 2, *а*. Применение токовой обратной связи в паре с программным наблюдателем позволяет передать водителю точную силу торможения [4].

Далее в работе будет реализована система управления, показанная на рис. 2, *б*.

 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

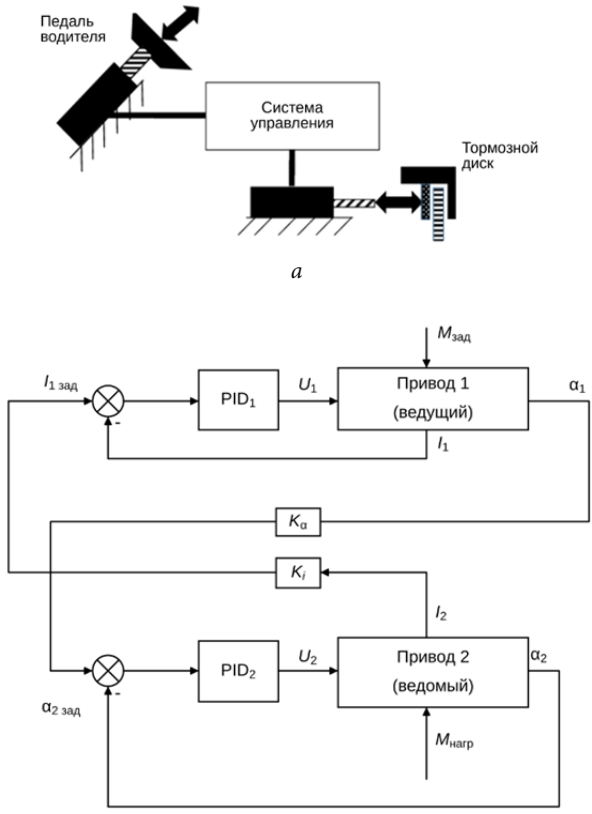


Рис. 2. Электронная тормозная система:
а — структурная схема; *б* — функциональная схема

Выбор компонентов. В качестве ведущего и ведомого устройств были выбраны два одинаковых популярных китайских мотор-редуктора JGB37-520 на базе коллекторного двигателя постоянного (см. рис. 3, *а*), параметры которых приведены ниже:

Номинальное напряжение питания, В 12
Передаточное число редуктора i 56
Скорость холостого хода, об/мин 178
Разрешение одного канала энкодера n_1, имп/об 11

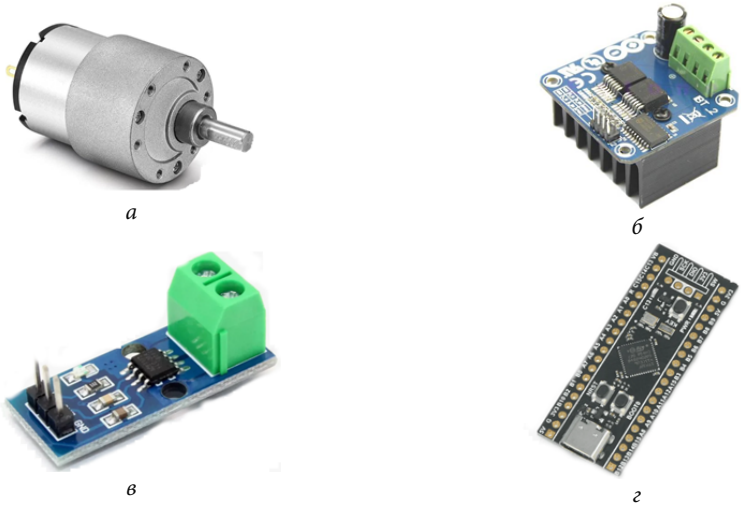
Управление двигателями выполнено по стандартной мостовой схеме [5] с использование готового драйвера [6]. Основные требования к модулю — возможность работать с входным напряжением 12 В и током до 5 А. На основании вышеизложенного был выбран драйвер Handson Technology BTS7960 (рис. 3, *б*). Основные параметры драйвера приведены ниже:

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

Диапазон входного напряжения ..... 6…27
Максимальный ток, А 43
Максимальная частота широтно-импульсной модуляции, кГц 25
Напряжения логических уровней, В ..... 3,3…5,0

Датчик тока должен иметь возможность проводить измерения до ±5А, быть надежным и простым в использовании. Для данного проекта выбран готовый модуль на базе датчика тока на эффекте холла Allegro ACS712 (рис. 3, *в*), параметры которого приведены ниже [7]:

Тип выходного сигнала ..... Аналоговый
Диапазон измеряемого тока, А ..... ± 5
Чувствительность ΔI, мВ/А 100



а *б* *в* *г*

Рис. 3. Компоненты:
а — двигатель JGB37-520; *б* — драйвер Н-моста BTS7960; *в* — датчик тока ACS-712; *г* — микроконтроллер stm32 black pill

Микроконтроллер для реализации поставленных задач должен быть достаточно производительным и простым в работе. В данном проекте использована готовая отладочная плата black pill на базе микроконтроллера stm32 f401ccu6 [8].

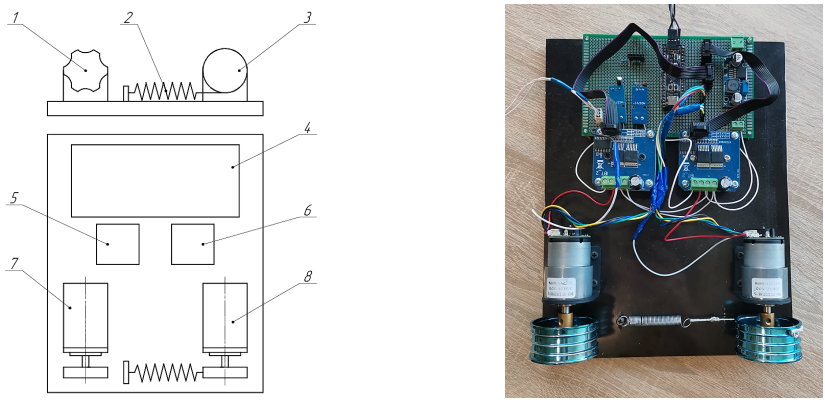
Описание установки. Установка изображена на рис. 4 и полностью соответствует схеме системы управления, показанной на рис. 2, *б*. Управляющий широтно-импульсно-модулированный сигнал для двигателей формируется на плате *4*, усиливается с помощью драйвера Н-моста *5*, *6*, затем подается

на двигатели *7*, *8*. Работа установки происходит по следящему алгоритму (см. рис. 4; 2, *б*):

1) оператор прикладывает к рукоятке управления *1* некоторый момент $M_{зад}$, в результате чего она поворачивается на определенный угол α_1;

2) управляемый элемент *2* поворачивается на угол $\alpha_{2зад} = K\alpha_1$, в результате чего пружина нагрузки растягивается, создавая момент сопротивления. В обмотках ведомого двигателя возникает ток I_2;

3) ток $I_{1зад} = K_i I_2$ служит управляющим сигналом для ведущего двигателя *7*. Протекая по обмотке ротора, он создает момент двигателя согласно формуле (*), в результате чего оператор чувствует сопротивление, пропорциональное моменту нагрузки двигателя *8*.



а *б*

Рис. 1. Разработанный стенд:
а — схема установки; *б* — фото установки

Разработка управляющего контура по положению. В качестве корректирующего устройства реализуется ПИД-регулятор в параллельной форме [9]. Обратная связь в систему поступает с квадратурного инкрементального энкодера. При обработке сигналов с двух каналов одновременно разрешение датчика увеличивается в 4 раза. Энкодер установлен на вал двигателя, поэтому люфты редуктора обратная связь не охватывает. Разрешение энкодера с учетом редукции определяется следующим образом:

$$n = in_1 = 4 \cdot 11 \cdot 56 = 2464 \text{ имп/об};$$

$$\Delta\alpha = \frac{360^\circ}{n} = \frac{360^\circ}{2464} = 0{,}146^\circ.$$

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

Контур по положению, управляющий приводом *2*, работает на частоте 1 кГц. ПИД-регулятор реализован с защитой от насыщения интегральной составляющей. Исследование системы и ее настройка проводятся без воздействия момента $M_{\text{нагр}}$. К приводу предъявляют следующие основные требования:

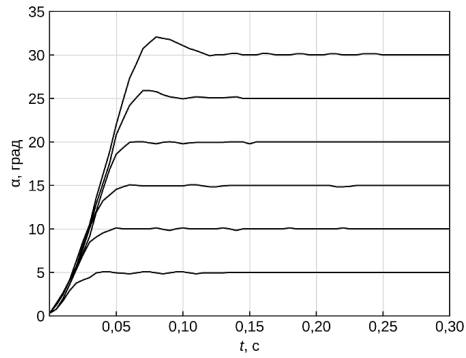
– время переходного процесса $t_{\text{п.п}} \le 0{,}15$ с;

– перерегулирование $\sigma \le 20$ %;

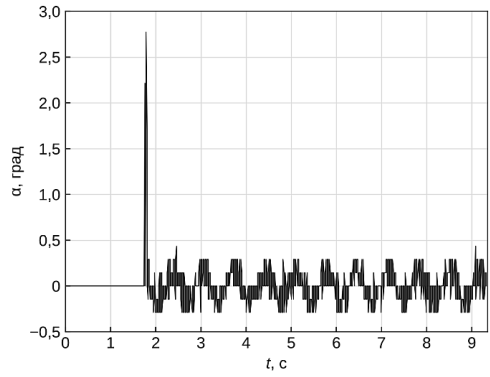
– динамическая ошибка при воздействии $\alpha_{2\text{зад}} = 30^\circ \cdot \sin(2\pi \cdot 1{,}5t)$ — не более 1°.

В результате ручной настройки были подобраны следующие коэффициенты устройства: $K_{\text{п1}} = 5{,}2$; $K_{\text{д1}} = 0{,}077$; $K_{\text{и1}} = 0{,}5$.

Реакция системы с корекцией на ступенчатое входное воздействие показана на рис. 5, *а*, ошибка при требуемом синусоидальном входном воздействии — на рис. 5, *б*.



а

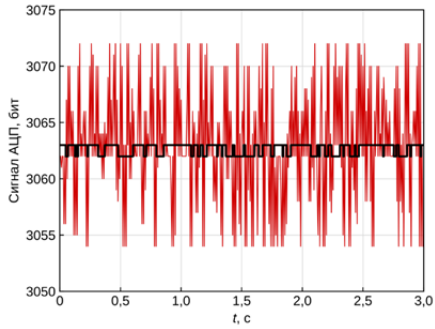


б

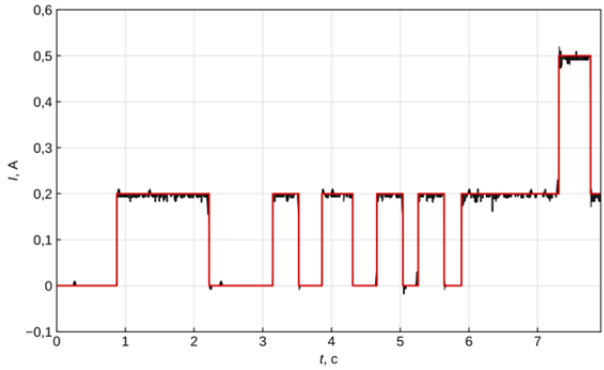
Рис. 5. Качество работы управляющего контура по положению:

а — переходной процесс; *б* — ошибка в следящем режиме

Разработка управляющего контура по току. Сигнал датчика ACS712 имеет аналоговый выход. Для его оцифровки используется стандартный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) микроконтроллера STM32, который имеет разрядность 12 бит. На рис. 6 красным цветом показан сигнал на выходе АЦП. Видно, что он достаточно сильно зашумлен. Для фильтрации использован метод скользящего среднего [10] с выборкой в 100 точек. График после фильтрации показан на рис. 6, *а* черным цветом.



а



б

Рис. 6. Токовый контур:
а — фильтрация сигнала датчика тока; *б* — переходной процесс

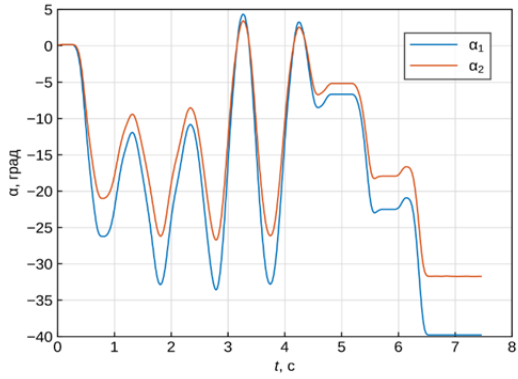
Зная чувствительность датчика тока ΔI, опорное напряжение АЦП (3,3 В) и его разрядность (12 бит), можно выполнить перевод числового значения и из регистра АЦП микроконтроллера в амперы по формуле

$$I = \frac{3,3}{2^{12} \cdot \Delta I}(I_{\text{АЦП}} - I_{\text{АЦП}_0}),$$

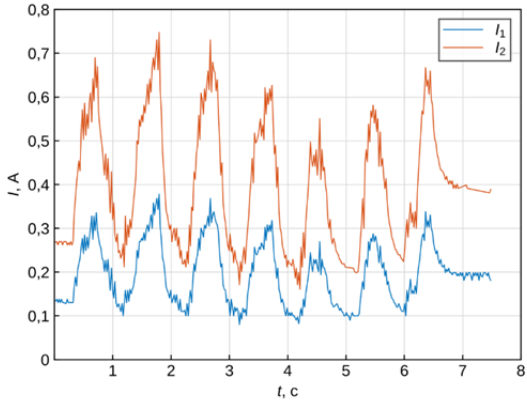
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

где $I_{\text{АЦП}}$ — текущее значение регистра АЦП; $I_{\text{АЦП}_0}$ — значение, соответствующее току 0 А.

Поскольку электронные процессы происходят гораздо быстрее механических, частота работы токового контура должна быть на порядок выше, чем у контура по положению, поэтому в работе использовался регулятор, работающий на частоте 10 кГц. Подбор корректирующего устройства для токового контура проводят при зафиксированном выходном вале привода. В ходе ручной настройки ПИД-регулятора было выявлено, что система показывает удовлетворительные результаты в части управления, обеспечивая достаточную точность и быстрый отклик (см. рис. 6, *б*), при значениях коэффициентов $K_{\text{п1}} = 100;\ K_{\text{д1}} = 0{,}15;\ K_{\text{и1}} = 8000.$



а



б

Рис. 7. Процессы в билатеральной системе:
а — контур по положению; б — токовый контур

 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

Формирование полной билатеральной системы. Данный этап представляет собой объединение двух описанных ранее контуров по схеме, изображенной на рис. 2, *б*. В качестве преобразующих коэффициентов примем $K_\alpha = 0,8;\ K_i = 0,5$. Графики процессов в системе показаны на рис. 7. Видно, что ведомый привод корректно отрабатывает сигнал, поступающий с рукоятки управления согласно соотношению $\alpha_2 = K_\alpha \alpha_1$ и в обмотке ведущего двигателя формируется ток, соответствующий нагрузке $(I_1 = K_i I_2)$. В результате оператор достаточно точно чувствует силу пружины.

Заключение. В статье детально описана разработка стенда для реализации тактильной обратной связи с использованием токового управления коллекторными двигателями постоянного тока. Все поставленные задачи выполнены. Стенд демонстрирует удовлетворительную работу, что подтверждает корректность разработанной архитектуры. Предложенная установка может служить экспериментальной основой для исследования процессов в билатеральных системах и апробации различных стратегий управления электроприводами.

Литература

[1] Tsuji T., Natori K., Nishi H., Ohnishi K. A Controller Design Method of Bilateral Control System. *EPE Journal*, 2006, vol. 16, no. 2, pp. 22–28. https://doi.org/10.1080/09398368.2006.11463616

[2] Murakami T., Yu F., Ohnishi K. Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993, vol. 40, no. 2, pp. 259–265. https://doi.org/10.1109/41.222648

[3] Katsura S., Matsumoto Y., Ohnishi K. Modeling of Force Sensing and Validation of Disturbance Observer for Force Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, vol. 54, no. 1, pp. 530–538. https://doi.org/10.1109/TIE.2006.885459

[4] Abeykoon A.M.H.S., Ohnishi K. Implementation of Pedal Feeling for Brake by Wire System Using Bilateral Control. *Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2008, pp. 1347–1352. https://doi.org/10.1109/ISIE.2008.4677132

[5] Акишин С.В. Принципы управления Н-мостом на ключевых элементах. *E-Scio*, 2020, № 1 (40), с. 136–141.

[6] Infineon Technologies AG. *BTS 7960: High Current PN Half Bridge: NovalithIC™* [Data Sheet]. Rev. 1.1. Munich, Infineon Technologies AG, 2004, 28 p. URL: https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/10/57/infineon-bts7960-ds-en.pdf (accessed April 15, 2026).

[7] Allegro MicroSystems. *ACS712: Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.4 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor* [Data

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

Sheet]. ACS712-DS, Rev. 22, 2024. URL: https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx (accessed April 15, 2026).

[8] STMicroelectronics. *STM32F401xB STM32F401xC: Arm® Cortex®-M4 32-bit MCU+FPU, 105 DMIPS, 256KB Flash / 64KB RAM, 11 TIMs, 1 ADC, 11 comm. interfaces* [Data Sheet]. DS9716 Rev. 11. Geneva, STMicroelectronics, 2019, 139 p. URL: https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f401cb.pdf (accessed April 15, 2026).

[9] Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 1. *СТА. Современные технологии автоматизации*, 2007, № 4, с. 86–97.

[10] Smith S.W. *The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing*. San Diego, California Technical Publishing, 1997, 626 p.

Поступила в редакцию 05.05.2026

Голубев Максим Павлович — студент бакалавриата кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — П.В. Рубцов, аспирант кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:
Голубев М.П. Реализация тактильной обратной связи с использованием токового управления коллекторными двигателями постоянного тока. *Политехнический молодежный журнал*, 2026, № 5(106). URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/robots/1132.html

 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

IMPLEMENTATION OF HAPTIC FEEDBACK USING CURRENT CONTROL OF BRUSHED DC MOTORS

M.P. Golubev gmp-31@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The severance of the mechanical link between the operator and the manipulated object leads to a complete loss of haptic information, which reduces operational precision and renders the control process unsafe. This paper proposes a method for restoring mechanical feedback by introducing current feedback into the system. This approach enables accurate load torque estimation without the use of specialized sensors, allowing for the design of a simple and reliable bilateral control system. The paper provides a detailed description of the haptic feedback implementation using current control for DC brushed motors: the system architecture is developed, the component base is selected, and the control loops are established. The developed experimental setup allows for the investigation of processes within the proposed bilateral control system.

Keywords: electric drive, mechatronics, control system, bilateral control, current control, servo drive, PID controller

References

[1] Tsuji T., Natori K., Nishi H., Ohnishi K. A Controller Design Method of Bilateral Control System. *EPE Journal*, 2006, vol. 16, no. 2, pp. 22–28. https://doi.org/10.1080/09398368.2006.11463616

[2] Murakami T., Yu F., Ohnishi K. Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993, vol. 40, no. 2, pp. 259–265. https://doi.org/10.1109/41.222648

[3] Katsura S., Matsumoto Y., Ohnishi K. Modeling of Force Sensing and Validation of Disturbance Observer for Force Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, vol. 54, no. 1, pp. 530–538. https://doi.org/10.1109/TIE.2006.885459

[4] Abeykoon A.M.H.S., Ohnishi K. Implementation of Pedal Feeling for Brake by Wire System Using Bilateral Control. *Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2008, pp. 1347–1352. https://doi.org/10.1109/ISIE.2008.4677132

[5] Akishin S.V. Printsipy upravleniya H-mostom na klyuchevykh elementakh [Principles of H-bridge control using switching elements]. *E-Scio*, 2020, no. 1 (40), pp. 136–141. (In Russ.).

[6] Infineon Technologies AG. *BTS 7960: High Current PN Half Bridge: NovalithIC™* [Data Sheet]. Rev. 1.1. Munich, Infineon Technologies AG, 2004, 28 p. Available at: https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/10/57/infineon-bts7960-ds-en.pdf (accessed April 15, 2026).

© BMSTU, 2026 ISSN 2541-8009

[7] Allegro MicroSystems. *ACS712: Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.4 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor* [Data Sheet]. ACS712-DS, Rev. 22, 2024. Available at: https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx (accessed April 15, 2026).

[8] STMicroelectronics. *STM32F401xB STM32F401xC: Arm® Cortex®-M4 32-bit MCU+FPU, 105 DMIPS, 256KB Flash / 64KB RAM, 11 TIMs, 1 ADC, 11 comm. interfaces* [Data Sheet]. DS9716 Rev. 11. Geneva, STMicroelectronics, 2019, 139 p. Available at: https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f401cb.pdf (accessed April 15, 2026).

[9] Denisenko V.V. PID-regulyatory: voprosy realizatsii. Chast' 1 [PID controllers: implementation issues. Part 1]. *STA. Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*, 2007, no. 4, pp. 86–97. (In Russ.).

[10] Smith S.W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. San Diego, California Technical Publishing, 1997, 626 p.

Received 05.05.2026

Golubev M.P. — Bachelor's Program Student, Department of Robotic Systems and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — P.V. Rubtsov, Postgraduate Student, Department of Robotic Systems and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:
Golubev M.P. Implementation of haptic feedback using current control of brushed DC motors. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2026, no. 5 (106). (In Russ.). URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/robots/1132.html

 © BMSTU, 2026