

УДК 681.587.72

## **Универсальный учебно-исследовательский стенд для имитации нагружения электроприводов**

Гришин В. С.<sup>1,\*</sup>, Орлов М. Ю.<sup>1</sup>,  
Польский В. А.<sup>1</sup>

<sup>\*</sup>[veekteam@gmail.com](mailto:veekteam@gmail.com)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

В статье представлено описание универсального учебно-исследовательского стенда для имитации влияния различных нагрузок на электропривод. Приведены состав, схема и математическое описание системы нагружения. Рассмотрены основные особенности работы стенда. Предложены способы решения проблем реализации данной системы. Представлены результаты работы стенда при различных вариантах нагружения и краткое пояснение к ним. Рассмотрены возможности применения нескольких описанных стендов для полунатурного моделирования манипуляционных робототехнических систем

**Ключевые слова:** электропривод, универсальный стенд, имитация нагрузок, полунатурное моделирование

---

### **Введение**

При разработке современных манипуляционных и мобильных робототехнических систем важной задачей является их моделирование на этапе, когда они ещё не созданы. Например, при разработке манипулятора необходимо провести испытания электроприводов отдельных степеней подвижности с учётом их динамического взаимовлияния. Аналогичную задачу можно решать в процессе проектирования ходовой части мобильных роботов.

Существует традиционный метод решения такой задачи, а именно – применение для имитации нагрузок различной механической оснастки: маховиков, пружинных механизмов, гидравлических демпферов и др. Но такой метод нельзя назвать универсальным, т.к. при смене типа нагружения требуется механическая переналадка всей системы – замена оснастки и перенастройка её параметров.

Для проведения подобных исследований был разработан универсальный учебно-исследовательский стенд, способный воспроизводить различные нагрузки на испытуемый привод, оперативно изменять и комбинировать законы нагружения не с помощью механической переналадки системы, а путём изменения параметров в управляющей программе. Благодаря наличию датчиков положения и скорости можно реализовать множество различных законов нагружения испытуемого привода: шарнирный момент, момент вязкого трения, инерционный момент, ударные нагрузки, а также учесть упругие свойства и люфты механических передач.

## 1. Описание и состав стенда

Внешний вид стенда представлен на рис. 1, а его структурная схема – на рис. 2.



Рис. 1. Внешний вид стенда при согласованной работе приводов (электродвигатель тахон RE 40 – слева; электродвигатель тахон EC-max 40 – справа)

В состав разработанного стенда входят следующие компоненты:

1. Электродвигатель тахон EC-max 40  $\varnothing 40$  мм, бесколлекторный, 120 Вт с энкодером с разрешающей способностью 500 имп/об (табл. 1) [1];
2. Электродвигатель тахон RE 40  $\varnothing 40$  мм, с графитовыми щётками, 150 Вт с энкодером с разрешающей способностью 500 имп/об (табл. 1) [1];
3. Контроллеры EPOS2 24/5 [1];
4. Источники питания NES 350-24 [1];
5. Муфта ROTEX;
6. Пластмассовый корпус;
7. Алюминиевый профиль;
8. Уголки для закрепления двигателей.

Таблица 1. Параметры электродвигателей

|                                         |                 |             |
|-----------------------------------------|-----------------|-------------|
| Модель электродвигателя                 | maxon EC-max 40 | maxon RE 40 |
| Мощность, Вт                            | 120             | 150         |
| Номинальная скорость вращения, об/мин   | 6290            | 7000        |
| Номинальный момент, мНм                 | 184             | 187         |
| Номинальный ток, мА                     | 3080            | 3170        |
| Коэффициент крутящего момента, мНм/А    | 62,8            | 60,3        |
| Момент инерции ротора, гсм <sup>2</sup> | 101             | 137         |



Рис. 2. Структурная схема стенда при согласованной работе электроприводов

При разработке стенда были сформулированы следующие требования [2]:

- 1) мощность нагрузочного привода не должна быть меньше мощности испытуемого;
- 2) система управления нагрузочного привода должна как минимум иметь режим управления по току (или моменту);
- 3) система управления нагрузочного привода должна предоставлять информацию о моменте, который он развивает, а также о положении и скорости общего вала.

Из параметров электродвигателей (табл. 1) видно, что первое требование выполняется. А для обеспечения остальных было разработано программное обеспечение «Engine Loader», в котором организована согласованная работа двух приводов, есть возможность управления ими по току, скорости и положению, а также организованы получение и сохранение данных о состоянии каждого привода.

## 2. Математическое описание нагружения

В каждый момент времени на нагрузочный привод должен приходить сигнал задания момента  $M_B^*$ , представляющего собой комбинацию моментов от заданных нагрузок. Используя функциональную (рис. 3) и структурную (рис. 4) схемы нагружения, определим значение момента  $M_B^*$ , с учётом упругости и люфта механической передачи, демпфирования, шарнирного момента, момента инерции нагрузки, а также действия внешнего момента.

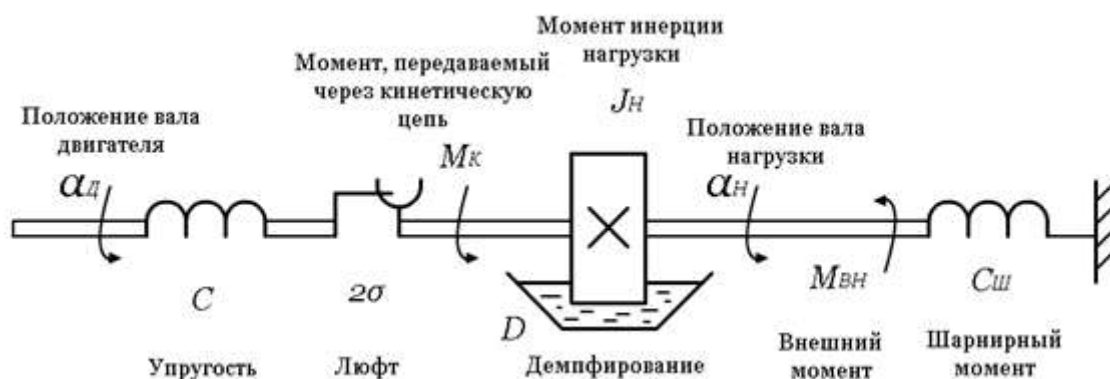


Рис. 3. Функциональная схема имитации нагрузки

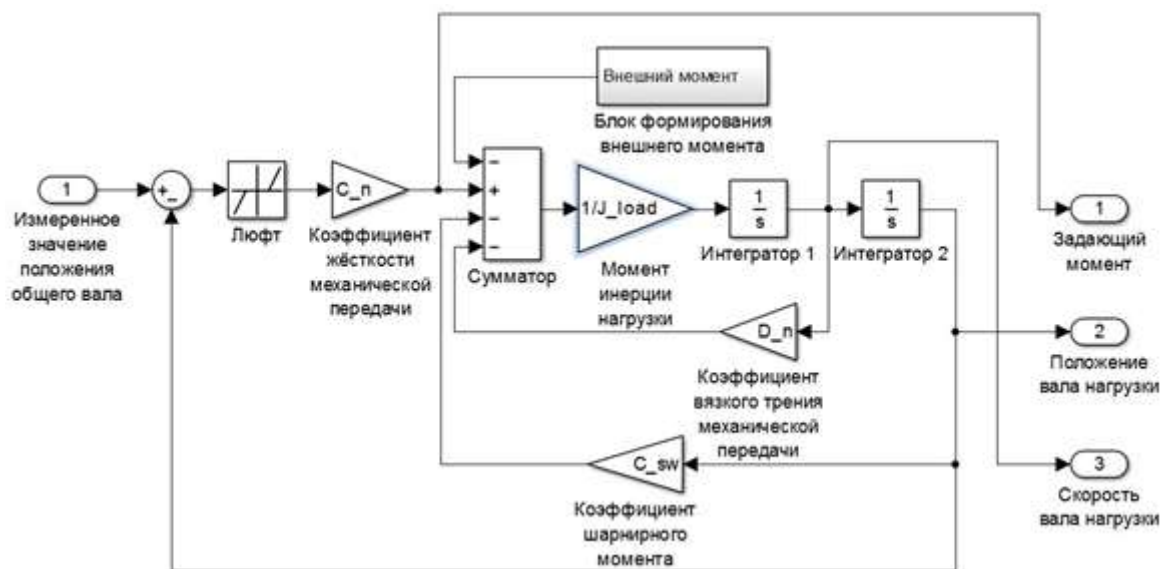


Рис. 4. Структурная схема имитации нагрузки

Запишем соотношения для  $M_B^*$ :

$$M_B^*(t) - M_{BH}(t) - M_D(t) - M_{ш}(t) = J_H \ddot{\alpha}_H(t), \quad (1)$$

$$M_B^*(t) = C \gamma(t), \quad (2)$$

где

$$\gamma(t) = \begin{cases} \alpha_d(t) - \alpha_H(t) - \sigma, & \text{если } \alpha_d(t) - \alpha_H(t) \geq \sigma, \\ 0, & \text{если } |\alpha_d(t) - \alpha_H(t)| < \sigma, \\ \alpha_d(t) - \alpha_H(t) + \sigma, & \text{если } \alpha_d(t) - \alpha_H(t) \leq -\sigma, \end{cases} \quad (1)$$

$$M_D(t) = D \dot{\alpha}_H(t), \quad (4)$$

$$M_{ш}(t) = C_{ш} \alpha_H(t). \quad (5)$$

Подставив выражения (2), (4) и (5) в (1) и упростив, получим дифференциальное уравнение относительно  $\alpha_H$ :

$$\ddot{\alpha}_H(t) = \frac{1}{J_H} [C\gamma(t) - M_{BH}(t) - D \dot{\alpha}_H(t) - C_{ш} \alpha_H(t)] \quad (6)$$

Полученное уравнение необходимо решать в управляющей программе в каждый момент времени с помощью численных методов. Найдя из него выражение для  $\alpha_H(t)$  и подставив его в (3), а затем в (2), получаем искомое задание момента  $M_B^*(t)$  для нагрузочного привода.

В программном обеспечении «Engine Loader» данное уравнение сводится к разностному. Приняв

$$\dot{\alpha}_H[n] = \frac{\alpha_H[n] - \alpha_H[n-1]}{T[n]},$$

$$\ddot{\alpha}_H[n] = \frac{\dot{\alpha}_H[n] - \dot{\alpha}_H[n-1]}{T[n]} = \frac{(\alpha_H[n] - \alpha_H[n-1])T[n-1] - (\alpha_H[n-1] - \alpha_H[n-2])T[n]}{T^2[n]T[n-1]},$$

подставив данные выражения в (6) и выразив  $\alpha_H[n]$ , получим:

$$\alpha_H[n] = \frac{(2J_H + DT[n-1])\alpha_H[n-1] - J_H\alpha_H[n-2] + T[n-1]T[n](C\gamma[n-1] - M_{BH}[n])}{J_H + DT[n-1] + C_{ш}T[n-1]T[n]}, \quad (2)$$

где  $n$  – порядковый номер последних пришедших данных,  $T[i]$  – временная задержка между  $(i-1)$ -ми и  $i$ -ми данными. На рис. 6 проиллюстрирован режим получения данных о положении и скорости вала привода. В общем случае данные приходят с различными задержками, о чём будет сказано ниже.

Далее вычисляется  $\gamma[n]$  по формуле (3) и подставляется в (2), где и определяется искомый задающий момент  $M_B^*$ , который нужно подать на нагрузочный привод.

### Особенности системы нагружения

**Момент инерции нагрузки.** Стоит вопрос о том, можем ли мы моделировать нагрузку с нулевым моментом инерции ( $J_H = 0$ ). Так как в структурной схеме (рис. 4) значение этого момента инерции стоит в знаменателе, то мы не имеем права приравнивать его к нулю. Однако, как видно из (7), ничто не запрещает это сделать в программе. В итоге бы-

ло принято решение запретить ввод нулевого момента инерции нагрузки, т.к. физически невозможно создать реальное нагружение на вал привода, не имея закреплённой на нём нагрузки. Например, любая реальная пружина кручения обладает определённым значением момента инерции. Кроме того, при использовании других численных методов решения дифференциального уравнения (6) (например, метода Рунге-Кутты [3]) могут появиться ограничения на значение момента инерции нагрузки, запрещающие его равенство нулю.

**Абсолютная жёсткость механических передач.** Иногда есть необходимость промоделировать систему с абсолютной жёсткостью, т.е.  $C = \infty$ . Для этого случая была разработана отдельная схема нагружения, показанная на рис. 5.

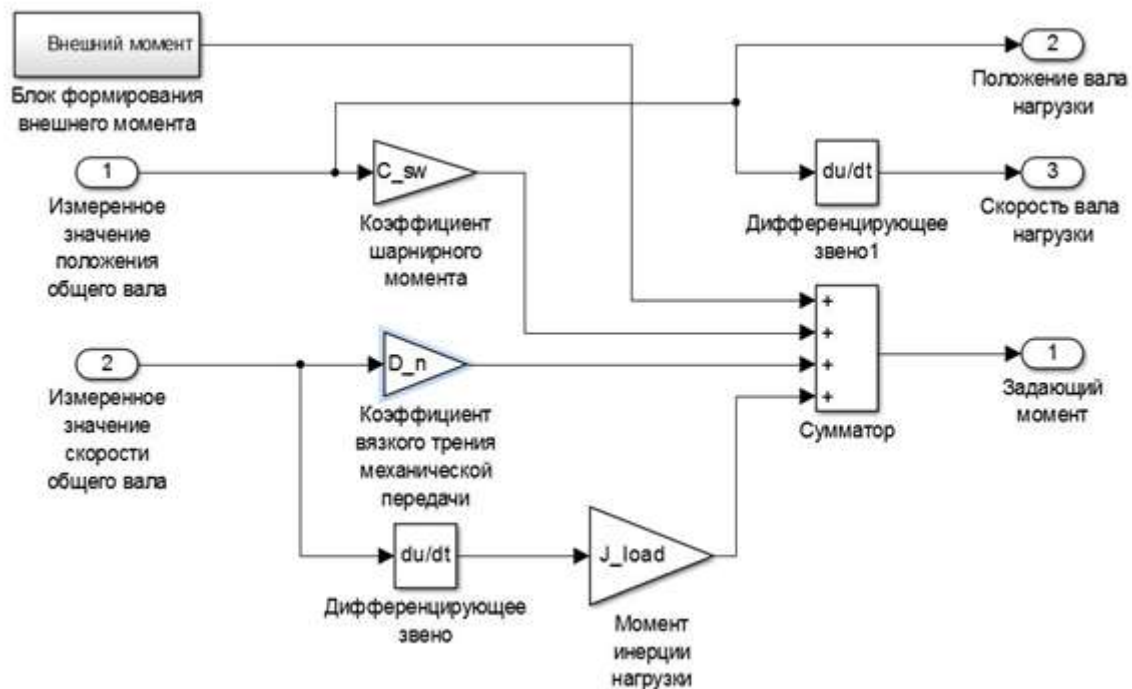


Рис. 5. Структурная схема имитации нагрузки при абсолютной жёсткости механических передач

Если для схемы, показанной на рис. 4 записать передаточную функцию относительно задающего момента  $M_B^*$  и положения общего вала двигателей  $\alpha_d$ , получим:

$$\frac{M_B^*}{\alpha_d} = \frac{C(J_H s^2 + Ds + C_{ш})}{J_H s^2 + Ds + C_{ш} + C}.$$

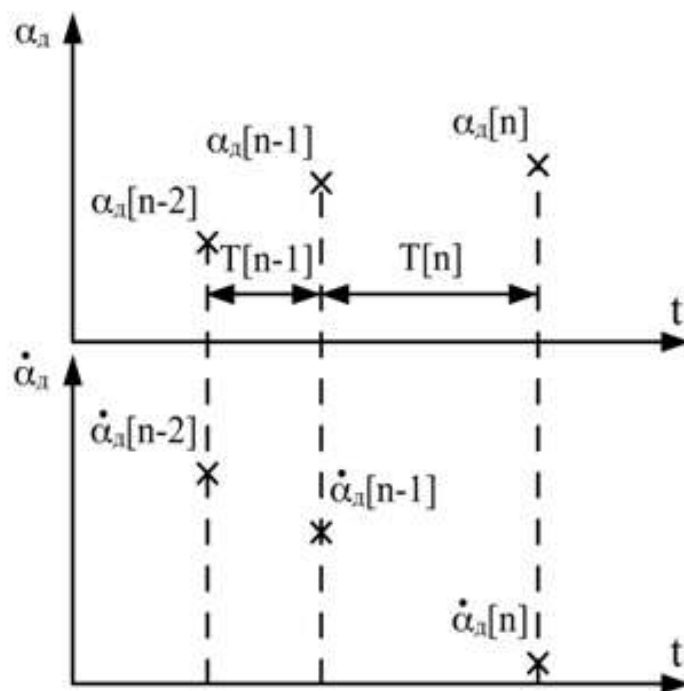
Устремив в данном выражении  $C \rightarrow \infty$ , получим следующую передаточную функцию:

$$\lim_{C \rightarrow \infty} \frac{M_B^*}{\alpha_d} = \lim_{C \rightarrow \infty} \frac{C(J_H s^2 + Ds + C_{ш})}{J_H s^2 + Ds + C_{ш} + C} = J_H s^2 + Ds + C_{ш},$$

которая равна аналогичной передаточной функции для схемы имитации нагрузки при абсолютной жёсткости механических передач (рис. 5). Таким образом, доказано, что схема, показанная на рис. 5 является частным случаем схемы, приведённой на рис. 4.



**Дискретность системы.** При реализации системы из-за особенностей аппаратной части возникла дискретизация, с периодом достаточно большим, чтобы оказывать негативное влияние на устойчивость системы. Кроме того, эта дискретизация обладает переменным шагом (рис. 6), распределение длины которого показано на рис. 7.



**Рис. 6.** Схема получения данных о положении и скорости испытуемого привода



**Рис. 7.** Диаграмма распределения длины шагов при дискретизации

В отличие от систем, в которых шаг постоянен, в нашем случае, мы никогда не можем точно сказать, какой будет длина следующего шага. Кроме того, наличие переменного шага дискретизации лишает нас возможности провести анализ устойчивости системы стандартными методами [4].

Для снижения влияния этих эффектов были предприняты следующие меры:

1. Программа управления работает с приводами параллельно, а не последовательно, что позволяет снизить шаг дискретизации вдвое, но приводит к рассинхронизации процессов обмена данными персонального компьютера с приводами.
2. Кроме того, так как переменная дискретизация сильнее всего влияет на работу нагружающего привода, а данные о положении и скорости вала общие для обоих приводов, алгоритм управления был изменён таким образом, что для расчёта нагружения используются данные с испытываемого привода.

В результате применения данных мер средний шаг дискретизации нагружающего привода стал 3 мс.

Для снижения негативного влияния дискретизации на устойчивость системы возможна также замена элементов системы, отвечающих за передачу данных между контроллером и ПК.

### 3. Результаты работы алгоритма нагружения

Далее представлены некоторые результаты моделирования различных вариантов нагружения в программе «Engine Loader». Единицы измерений, которые используются в приведённых результатах, показаны в табл. 2.

Таблица 2. Единицы измерений

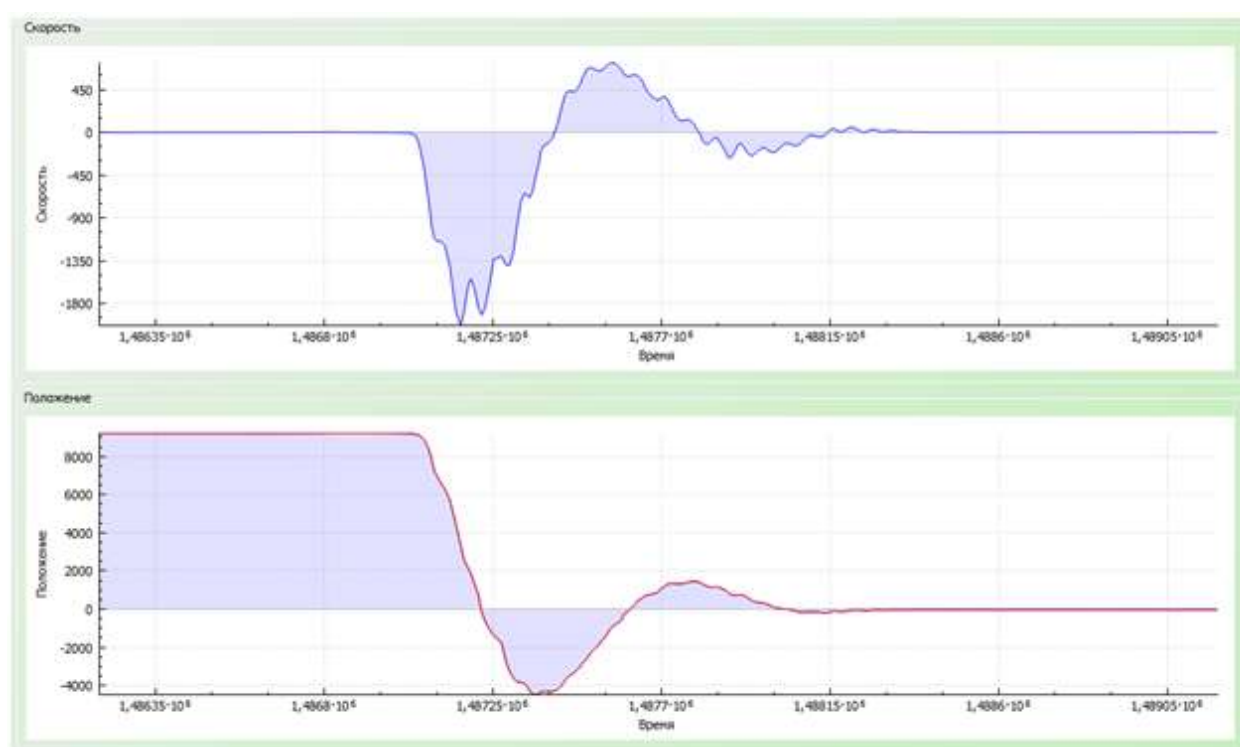
| Наименование параметра | Единицы измерения     |
|------------------------|-----------------------|
| Положение              | qc (1 qc = 1/2000 об) |
| Скорость               | об/мин                |
| Время                  | мс                    |



### Имитация шарнирного момента, демпфирования и момента инерции нагрузки при абсолютно жёсткой механической передаче

Для демонстрации данного типа нагружения были приняты следующие коэффициенты:  $C_{\text{ш}} = 0,01 \frac{\text{Н}}{\text{рад}}$ ,  $D = 0,00025 \frac{\text{Н}}{\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}}$ ,  $J_{\text{н}} = 0,0001 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . В этом опыте испытуемый привод не задействован. Вал нагрузочного привода был отклонён от нулевого положения и отпущен. Результаты представлены на рис. 8.

После того, как вал нагрузочного привода был отпущен, в системе возникают затухающие колебания и вал возвращается в начальное положение, что соответствует поведению реальной колебательной системы с такими же параметрами с отклонением примерно на 5 % от расчётных характеристик.



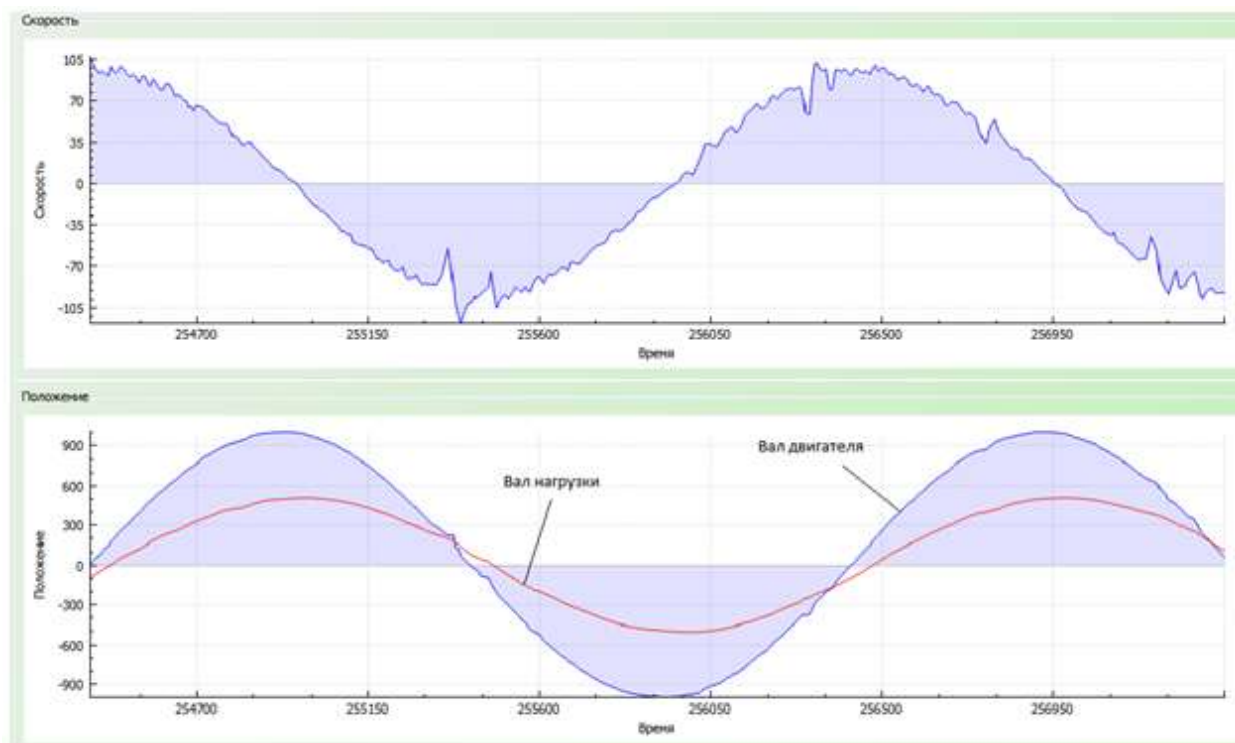
**Рис. 8.** Скорость и положение вала при влиянии шарнирного момента, демпфирования и момента инерции нагрузки при абсолютно жёсткой механической передаче

### Имитация шарнирного момента, демпфирования и момента инерции нагрузки при наличии упругости в механических передачах

Для демонстрации данного типа нагружения были приняты следующие коэффициенты:  $C_{\text{ш}} = 0,02 \frac{\text{Н}}{\text{рад}}$ ,  $D = 0,002 \frac{\text{Н}}{\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}}$ ,  $J_{\text{н}} = 0,0001 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $C = 0,02 \frac{\text{Н}}{\text{рад}}$ . Испытуемому

приводу дано синусоидальное задание с амплитудой 3,14 рад и периодом 2 с. Результаты, полученные в программе «Engine Loader» представлены на рис. 9.

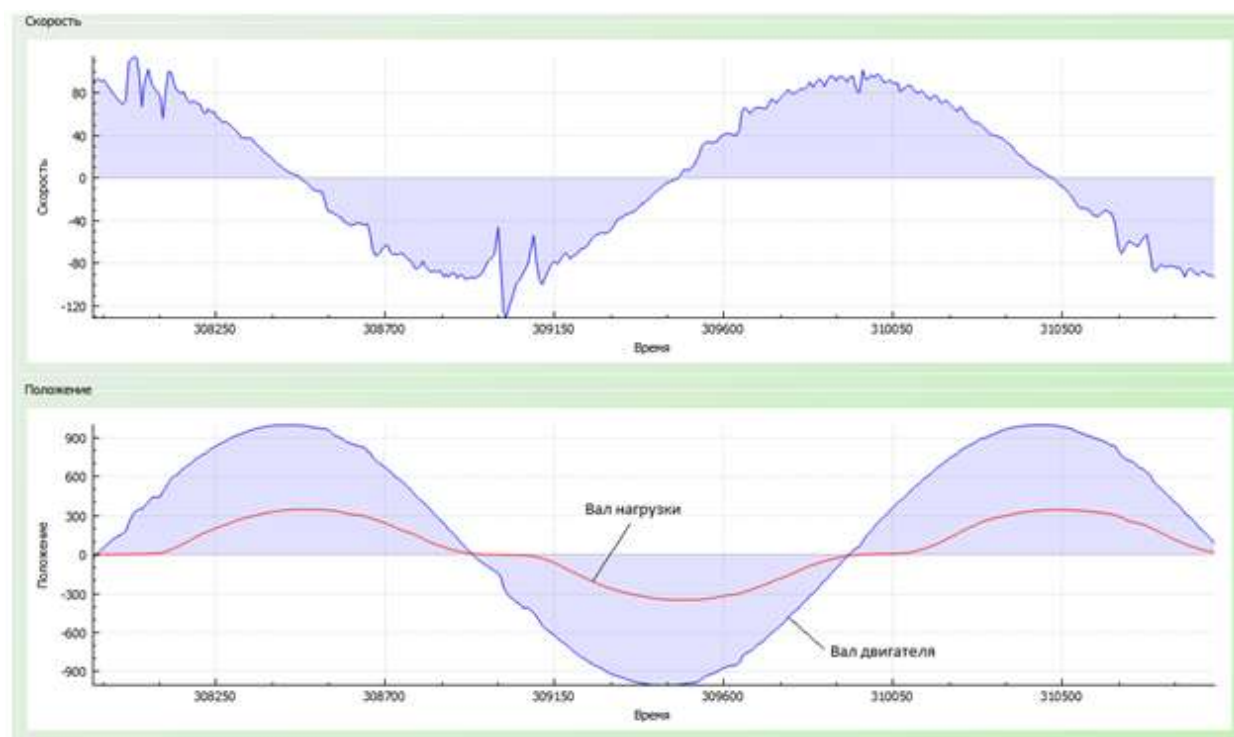
На графиках видно влияние упругости механических передач на поведение системы, а именно, отличие положения вала нагрузки от положения вала испытываемого двигателя.



**Рис. 9.** Скорость и положение вала при влиянии шарнирного момента, демпфирования и момента инерции нагрузки при наличии упругости механических передач

### **Имитация шарнирного момента, демпфирования и момента инерции нагрузки при наличии упругости и люфта в механических передачах**

Для демонстрации данного типа нагружения были приняты следующие коэффициенты:  $C_{ш} = 0,02 \frac{\text{Н}}{\text{рад}}$ ,  $D = 0,002 \frac{\text{Н}}{\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}}$ ,  $J_H = 0,0001 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $C = 0,02 \frac{\text{Н}}{\text{рад}}$ ,  $\sigma = 1 \text{ рад}$ . Испытуемому приводу дано синусоидальное задание с амплитудой 3,14 рад и периодом 2 с. Результаты, полученные в программе «Engine Loader» представлены на рис. 10. На графиках видно, что вал нагрузки никак не реагирует на движение вала испытываемого двигателя, пока люфт не выбран. Как только происходит зацепление, вал нагрузки начинает движение, аналогичное предыдущему опыту.



**Рис. 10.** Скорость и положение вала при влиянии шарнирного момента, демпфирования и момента инерции нагрузки при наличии упругости и люфта в механических передачах

## Заключение

На основе семи вышеописанных лабораторных стендов в МГТУ им. Баумана на кафедре СМ-7 была создана лаборатория тахопривод, открывающая множество возможностей в области исследования и изучения электроприводов. Студентам, которые изучают регулируемые и следящие электроприводы, будет полезно увидеть на практике, как влияют различные настройки регуляторов тока, скорости и положения на качество работы приводов. Помимо этого, благодаря возможности моделирования нагрузки, можно исследовать влияние на работу двигателя упругих свойств механической передачи и различных нагрузок, присущих любой реальной системе, и провести сравнение результатов с данными, полученными при математическом моделировании привода.

Имеется положительный опыт использования лаборатории в учебном процессе при повышении квалификации инженеров из промышленности.

Одним из наиболее значимых применений разработанных стендов является их объединение в полноценный комплекс взаимосвязанных приводов для исследования работы многозвенных манипуляционных механизмов. Данные о размерах звеньев и их массоинерционных характеристиках берутся из конструкторской документации. У каждого звена есть свой привод, и при совместной работе приводов возникают эффекты силового взаимодействия. При возможности имитировать внешние воздействия на привод можно создать систему, работа которой будет максимально приближена к работе в среде, где манипулятор будет использоваться (рис. 11).

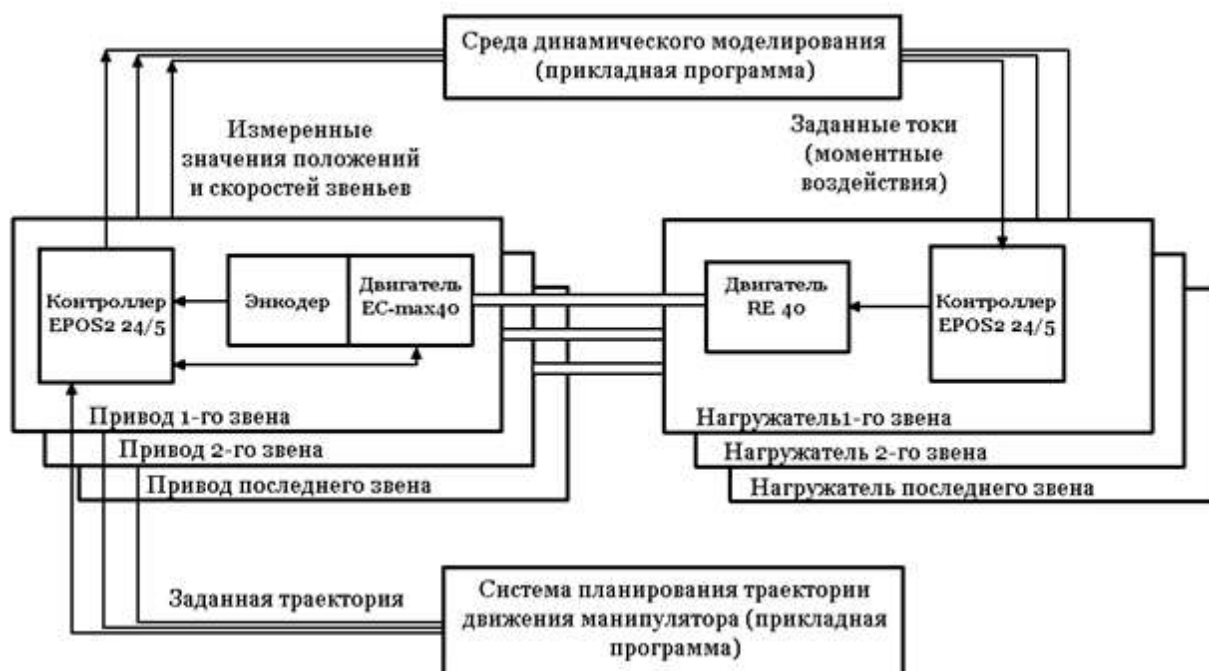


Рис. 11. Схема работы взаимосвязанной системы приводов

На испытуемые приводы с тактического уровня системы управления подаются управляющие сигналы, при обработке которых рабочий орган реального манипулятора двигался бы по заданной траектории. Информация о положении, скорости и токе каждого привода поступает на специальный вычислительный блок, который на базе имеющихся у него массоинерционных характеристик рассчитывает моменты взаимовлияния [5], после чего они в виде управляющих сигналов подаются на входы нагрузочных приводов.

Такой подход к проектированию и исследованию робототехнических систем не требует больших затрат на изготовление и предоставляет широкие возможности. Применение комплекса взаимосвязанных приводов позволит быстро разработать, проверить и отладить алгоритмы управления приводами робота.

### Список литературы

1. Официальный сайт Maxon motor. Режим доступа: <http://www.maxonmotor.com> (дата обращения: 11.04.16).
2. Ванин А.В., Польский В.А. Универсальный исследовательский стенд для испытаний электромеханических модулей манипуляционных роботов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение», 2012. С. 136-147.
3. Агафонов С.А., Герман А.Д., Муратова Т.В. Дифференциальные уравнения. 3-е изд. стереотип. / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 352 с.
4. Иванов В.А., Ющенко А.С. Теория дискретных систем автоматического управления: учебное пособие. 2-е изд., доп. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 348 с.

5. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов. – 2-е изд., исправ. и доп. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 480 с.

## A Universal Educational and Research Stand to Simulate Electrical Drive Loading

V.S. Grishin<sup>1,\*</sup>, M.Yu. Orlov<sup>1</sup>,  
V.A. Polskiy<sup>1</sup>

[\\*veekteam@gmail.com](mailto:veekteam@gmail.com)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** electrical drive, universal stand, load imitation, semirealistic simulation

---

Universal educational and research stand was developed for analyzing an electrical drive's behavior with different load disturbance effects. Major components of the stand are two electrical drives with rigidly coupled shafts. As a result, first electrical drive (loader) has a capability to imitate effects of different loading types to another one (trial drive).

Control software for the stand is developed. It allows us to combine a variety of loading types and change parameters of current loading such as joint moment, damping, additional inertia, and external torque. Also there is a capability to imitate effects of elasticity and backlash of mechanical transmissions. The paper considers the main challenge of creating the given system, i.e. discretization with a variable step. Some methods to decrease its negative effects on system stability are suggested.

The given system allows to change loading parameters more rapidly and in a wider range as compared to a system with real mechanical outfit.

These stands are currently used for laboratory classes within the course “Electrical robotic drives” at SM7 department in Bauman Moscow State Technical University. Also the system of interdependent stands for semi-realistic simulation of manipulation systems is under development.

## References

1. Maxon motor official website. Available at: <http://www.maxonmotor.com> (accessed 11.04.16).
2. Vanin A.V., Polskiy V.A. Universal research stand for testing of electromechanic modules of manipulating robots. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie = Ser. Instrument engineering*, 2012, pp. 136-147. (in Russian).
3. Agafonov S.A., German A.D., Muratova T.V. *Differencial'nye uravnenija* [Differential equations]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 352 p. (in Russian).

4. Ivanov V.A., Jushhenko A.S. *Teorija diskretnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija* [Theory of discrete automatic-control systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015. 348 p. (in Russian).
5. Zenkevich S.L., Jushhenko A.S. *Osnovy upravlenija manipuljacionnymi robotami* [Principles of manipulation robots control]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 480 p. (in Russian).