

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МЕХАНИЗМА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕДАЧ В ТРАНСМИССИИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Михалевич Н. Г.<sup>1</sup>, Сильченко Н. Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

**Аннотация.** Рассмотрены динамические процессы протекающие в автоматизированном механизме переключения передач автотранспортного средства, исследована математическая модель электродвигателя и определены параметры влияющие на рабочий процесс, описаны используемые в технике типы электродвигателей, описаны уравнения используемые при математическом моделировании, рассмотрены перспективы рационального управления коробкой передач. **Ключевые слова:** переключение передач, системы автоматического управления, математическое моделирование.

### Введение

В современном автомобилестроении с целью повышения тягово-скоростных свойств широко используется автоматическое управление агрегатами трансмиссии, в частности - коробками передач. При этом используются различные системы автоматизации процесса переключения передач. Развитие электроники, создание и внедрение высокоскоростных коммуникационных бортовых сетей, предоставили возможности для создания и внедрения на транспортных средствах различных систем управления силовым агрегатом [1,2].

### Анализ публикаций

Одним из наиболее перспективных направлений в автомобилестроении является автоматизация механической ступенчатой коробки передач, так называемая роботизация. По сравнению с гидромеханическими аналогами, роботизированные коробки передач обладают лучшими показателями КПД, а также имеют меньшую удельную массу агрегата [3]. Одним из способов автоматизации процесса переключения передач является применение специально спроектированного автоматизированного механизма переключения, монтируемого на штатную коробку передач (КП) автомобиля. По пути разработки таких механизмов идут ведущие производители автомобильных трансмиссий как ZF Friedrichshafen AG (Германия), «Eaton» (США) [4]. Теоретическим вопросом по разработке и внедрению таких систем и механизмов в автомобилестроении занимаются также ряд зарубежных

ученых результаты работы которых приведены в литературе [5].

### Цель исследования

Коллекторные двигатели постоянного тока являются наиболее распространенными исполнительными двигателями систем автоматики различного назначения, поэтому они и были выбраны в приводе механизма переключения. В качестве силового исполнительного механизма использовался коллекторный электродвигатель постоянного тока. Целью исследования является математическое описание динамических процессов протекающих в силовом электродвигателе механизма управления КП. На основании проведенного анализа определено, что электродвигатели постоянного тока довольно широко используются в автомобильной технике, но литературное описание методик построения и решения уравнений при математическом описании таких двигателей не позволили получить характеристики определенные заводом изготовителем. Выполненная работа посвящена исследованию этих явлений.

### Исследование электродвигателя постоянного тока в приводе механизма переключения передач

Любой электропривод представляет собой электромеханическую систему, состоящую из трех частей (рис. 1). Двигатель ЭД как силовой элемент этой системы представляет собой потребитель энергии. В механическую систему входит ротор электродвигателя, который имеет свой момент инерции,

определенную скорость и частоту вращения, а также развивает крутящий (тормозной) момент [6].



Рис. 1. Элементы электропривода как механической системы

За электродвигателем идет механизм осуществляющий преобразование движения (МПД). Он позволяет увеличивать или уменьшать скорость вращения (редуктор), изменяется вид движения – вращательное в поступательное (винтовые и зубчато-реечные передачи, барабан с тросом, кривошипно-шатунный механизм и т.п.). Редуктор характеризуется коэффициентом передачи, представляющим собой отношение скорости на входе к скорости на выходе, механической инерционностью и упругостью его элементов, зазором и трением. Рабочий орган (РО) реализует подведенную энергию в полезную работу. РО является потребителем энергии, тогда ее поток направлен от двигателя к рабочему органу см. рис. 1. Иногда бывает наоборот: поток энергии направлен от РО к двигателю, и тогда двигатель является ее источником. Рабочий орган характеризуется инерционностью при вращении или усилием при линейном движении. Передача энергии от двигателя к рабочему органу и обратно связана с ее потерями в механических звеньях. Причина – трение в подшипниках, направляющих, зубчатых зацеплениях и т.п. Потери энергии покрываются двигателем при прямом потоке энергии и рабочим органом при обратном потоке.[6]

Двигатели постоянного тока традиционно являлись основой регулируемого электропривода и широко применяются в различных областях техники. Двигатели постоянного тока могут иметь независимое, последовательное или смешанное возбуждение. В зависимости от схемы возбуждения существенно различают и электромеханические характеристики двигателей. Двигатели независимого возбуждения могут иметь электромагнитное возбуждение, (рис.2,а) и возбуждение от постоянных магнитов (рис.2,б). Возбуждение от постоянных магнитов используют для высоко оборотистых двигателей мощностью до 20 кВт.

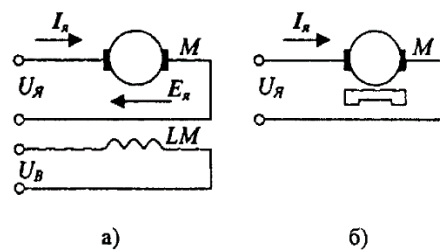


Рис.2. Схема включения двигателей постоянного тока независимого возбуждения: а – с возбуждением от электромагнитов; б – с возбуждением от постоянных магнитов

По конструкции якоря двигатели делятся на три группы: с зубцовым якорем, с гладким якорем, с диэлектрическим якорем (дисковым или полым). Конструкции с зубцовым якорем являются самыми распространёнными в коллекторных двигателях. Достоинством таких конструкций является хорошие удельные энергетические показатели и относительная дешевизна. Двигатели с гладким якорем имеют меньшие пульсации момента и допускают большие перегрузки по сравнению с зубцовыми. Двигатели с диэлектрическим якорем имеют по сравнению с другими конструкциями высокое быстродействие и используются в электроприводах с жесткими требованиями к динамическим свойствам [7]. Изменение направления вращения двигателей с независимым возбуждением производится изменением полярности подводимого к якорю питания. Напряжение, подводимое к якорной цепи двигателя, в установившемся режиме уравновешивается падением напряжения на сопротивлениях цепи якоря и противо ЭДС якоря, которая наводится в обмотке якоря при его вращении в электромагнитном поле, создаваемом обмотками возбуждения.

Двигатель постоянного тока описывают следующей системой дифференциальных и алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
 U &= e + R_m \cdot i + L_m \frac{di}{dt} \\
 M - M_c &= J_{np} \frac{d\omega}{dt} \\
 M &= K_\tau \cdot \Phi \cdot i \\
 e &= K_m \cdot \Phi \cdot \omega
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $i$  - сила тока на обмотках двигателя;  
 $R_m$  - активное сопротивление якорной цепи;  
 $L_m$  - индуктивность якорной цепи;

$K_m$  - коэффициент пропорциональности между скоростью и ЭДС;

$K_\tau$  - коэффициент пропорциональности между электромагнитным моментом и током якоря;

$I_{np}$  - приведенный суммарный момент инерции;

$U$  - напряжение питания электродвигателя.

Для практических расчетов часто приходится определять параметры двигателя по паспортным данным или каталогам, в которых не всегда имеются сведения об индуктивности и сопротивлении якорной обмотки. В этом случае параметры могут быть вычислены по паспортным номинальным данным двигателя: мощности  $P_N$  [Вт], напряжению  $U_N$  [В], току якоря  $I_N$  [А], частота вращения  $n_N$  [об/мин], коэффициенту полезного действия  $\eta$ , %.

Если сопротивление обмотки якоря двигателя  $R_m$  не задано, его приближенно рассчитывают, принимая, что в номинальном режиме работы на обмотку якоря приходится определенная часть общих потерь мощности в машине:

$$R_m \approx \frac{\alpha(1-\eta)U_N}{I_N} \quad (2)$$

для двигателей параллельного возбуждения  $\alpha=0,5$ ; для двигателей смешанного возбуждения  $\alpha=0,6$ ; для двигателей последовательного возбуждения  $\alpha=0,75$ .

Индуктивность цепи якоря -  $L_m$  рассчитывают по следующей зависимости

$$L_m \approx \frac{30U_N c_v}{\pi p n_N I_N}, \quad (3)$$

где  $c_v$  - эмпирический коэффициент, равный 0,4 или 0,1 соответственно для двигателей при отсутствии или при наличии компенсационной обмотки;  $p$  - число полюсов у двигателя.

Коэффициенты  $K_\tau$  и  $K_m$  рассчитывают по зависимостям (4) и (5).

$$K_\tau = \frac{U_N - i \cdot R_a}{\omega_N} \quad (4)$$

$$K_m = \frac{M}{i} \quad (5)$$

Преобразовав эти уравнения, получили систему уравнений, имеющую вид

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{-R_m \cdot i - K_m \frac{d\Theta}{dt} + U(t)}{L_m} \\ \frac{d^2\Theta}{dt} = \frac{K_\tau \cdot i - M_c}{I_{np}} \end{cases} \quad (6)$$

где  $M_c$  - момент сопротивления.

При исследовании данной модели было определено что подставив в уравнение соответствующие переменные модель не выдавала параметров определенных каталогом завода изготовителя. (табл. 1)

Таблица 1 – Технические характеристики силового электродвигателя.

Тип	Напряжение В	Скорость без нагрузки об/мин	Ток без нагрузки А	Скорость вращения об/мин	Крутящий момент кг·см	Вых мощность Вт	Рабочий ток А	Пусковой ток А
Силовой	24	3000	1,15	2500	3	77	4,6	20

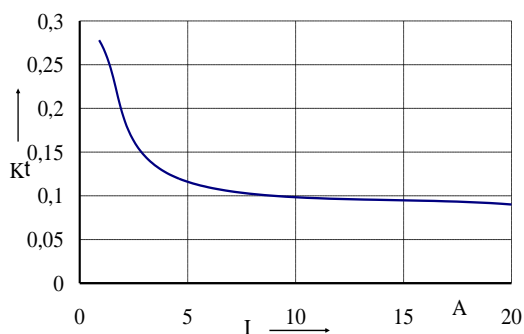
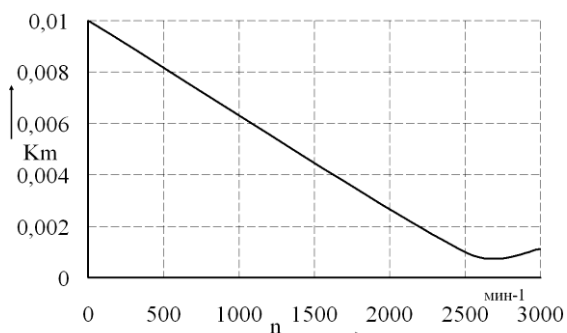
В частности это несоответствие тока при соответствующих оборотах ротора электродвигателя.

Исследовав характер работы модели было выявлено что несоответствие модели заводским параметрам обусловлено коэффициентами  $K_m$  и  $K_\tau$ . А также существенное влияние оказывает реактивное сопротивление якоря  $R_m$  которое также зависит от частоты вращения ротора двигателя. Путем экспериментального поиска были определены зависимости этих коэффициентов имеющие следующий вид (рис 3-5). Кривые изменения описываются полиномами 4 степени (7,8,9)

$$R_m = 2E-12n^4 - 1E-08n^3 + 1E-05n^2 - 0.0021n + 1.1834 \quad (7)$$

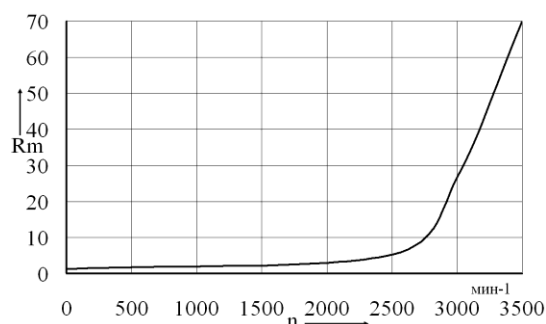
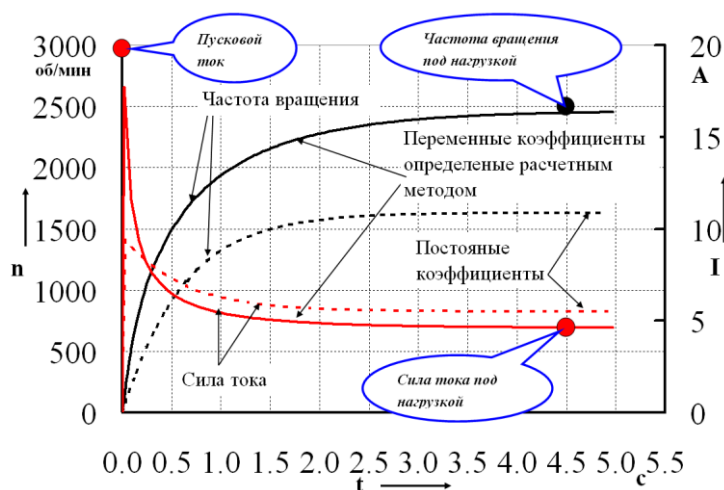
$$K_\tau = 2E-05i^4 - 0.0008i^3 + 0.0145i^2 - 0.1028i + 0.3541 \quad (8)$$

$$K_m = 2E-16n^4 - 8E-13n^3 + 8E-10n^2 - 4E-06n + 0.01 \quad (9)$$

Рис. 3. Зависимость  $K_t$  от силы токаРис. 4. Зависимость  $K_m$  от частоты вращения вала силового электродвигателя

Подставив полученные зависимости в уравнения модели силового электродвигателя были получены результаты отвечаю-

щие техническим данным двигателя. Переменные коэффициенты, определенные расчетным методом, позволили повысить точность моделирования. Так используя постоянные коэффициенты при моделировании пусковой ток равен 9,4 А, а скорость вращения равна 1630 об/мин, что соответственно составляет 47% и 65,2% от паспортных данных. При моделировании с использованием переменных коэффициентов получен ток 17,7 А, что соответствует 88,5%, и скорость вращения 2452 об/мин., что соответствует 98% от паспортных данных (рис 6). Точками на графике обозначены величины соответствующие паспортным данным.

Рис. 5. Зависимость  $R_m$  от частоты вращения вала электродвигателяРис. 6. Зависимость скорости вращения и рабочего тока при различных коэффициентах  $K_m$ ,  $K_t$ ,  $R_m$ .

### Выводы

Полученные зависимости для коэффициентов модели электродвигателя, которые позволяют повысить точность моделирования его работы. Так соответствие пускового тока паспортным данным и результатов моделирования выросло с 47% до 88,5%, а скорости вращения с 65,2% до 98%. Получены полиномы описывающие изменение переменных коэффициентов используемые при

моделировании.

### Литература

1. Гируцкий О.И. Электронные системы управления агрегатами автомобиля./ О.И. Гируцкий, Ю.К. Есеновский–Лашков, Д.Г. Поляк. – М.: Транспорт, 2000. – 213 с.
2. Кусяк, В.А. Проектирование автоматизированных мехатронных систем управления силовым агрегатом грузовых автомобилей и автопоездов: монография / В.А. Кусяк, О.С.

- Руктешель.– Минск: БНТУ, 2015. – 295 с.
3. Богомолов В.А. Анализ существующих конструкций трансмиссий / В.А. Богомолов, В.И. Клименко, Н.Г. Михалевич, Н.Н. Сильченко // Автомобильный транспорт. – 2010. – №27. – С. 17 – 21 Сборник научных трудов
  4. Сосин Д.А. Новейшие автомобильные электронные системы. / Д.А. Сосин, В.Ф. Яковлев. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 240 с.
  5. Недялков, А.П. Применение опережающих технических решений при создании механических ступенчатых коробок передач с автоматизированным управлением. / А.П. Недялков, А.Н. Блохин // Наука и образование. – 2011. – №2.
  6. Воронин С. Г. Электропривод летательных аппаратов: Учебно-методический комплекс. – Offline версия 1.0. – Челябинск, 1995-2011. – файлов 489
  7. Онищенко Г.Б. Электрический привод. Учебник для вузов – М.:РАСХН. 2003. – 320.

### References

1. Girutskiy OI Electronic control systems for car aggregates. / O.I. Girutskiy, Yu.K. Yesenovskiy-Lashkov, D.G. Pole. -M.: Transport, 2000. - 213 with.
2. Kussyak, V.A. Designing of automated mechatronic control systems for the power unit of trucks and road trains: monograph / V.A. Kussyak, O.S. Rukteshel. - Minsk: BNTU, 2015. - 295 p.
3. Bogomolov V.A. Analysis of existing transmission designs / VA Bogomolov, V.I. Klimentko, N.G. Mikhalevich, N.N. Silchenko // Automobile transport. - 2010. - №27. - С. 17 - 21 Collection of scientific works
4. Sosin D.A. The newest automotive electronic systems. / YES. Sosin, V.F. Yakovlev. - Moscow: Solon-Press, 2005. - 240 p.
5. Nedyalkov, A.P. Application of advanced technical solutions for the creation of mechanical stepped gearboxes with automated control. / A.P. Nedyalkov, A.N. Blokhin // Science and Education. - 2011. - №2.
6. Voronin SG The electric drive of flying machines: Educational-methodical complex. - Offline version 1.0. - Chelyabinsk, 1995-2011. - files 489
7. Onishchenko G.B. Electric drive. Textbook for high schools - M.: RAAS. 2003. – 3.

**Михалевич Николай Григорьевич<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры автомобилей им. А.Б. Гредескула, mkolyag@gmail.com; 050-3431827,

**Сильченко Николай Николаевич<sup>1</sup>**, ассистент кафедры автомобилей им. А.Б. Гредескула, +38 0509755716, mykola.sylchenk@gmail.com,

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, ул. Ярослава Мудрого 25.

### Вдосконалення параметрів моделі електродвигуна механізму перемикання передач в трансмісії автотранспортних засобів

**Анотація.** Стаття присвячена покращенню експлуатаційних показників електромеханічного автоматизованого приводу перемикання передач великовантажних автомобілів та автобусів, удосконаленню конструкції виконавчого механізму приводу керування коробкою передач, оптимізації роботи алгоритму керування автоматизованим електромеханічним приводом перемикання передач. Шляхом аналізу інформаційних джерел встановлено вимоги, які висуваються до приводів автоматизованого керування коробкою передач. На основі проведеного аналізу існуючих конструкцій приводів перемикання передач в механічних коробках передач зроблено висновок про доцільність подальшого вдосконалення електромеханічного приводу перемикання передач з виконавчими механізмами на базі електродвигунів постійного струму, як найбільш актуального на сьогодні для застосування у трансмісіях великовантажних автомобілів та автобусів. Основним недоліком подібних конструкцій на даний момент вбачається в недостатній універсальності розглянутих аналогів, що до використання на коробках передач різного виробництва. Це, в свою чергу, негативно впливає на вартість та надійність приводу. Розглянуто динамічні процеси що протікають в автоматизованому механізмі перемикання, досліджено математичну модель електродвигуна і визначені параметри впливають на робочий процес, описані використовувані в техніці типи електродвигунів, описані рівняння які використовуються при математичному моделюванні, розглянуті перспективи раціонального керування коробкою передач. За підсумками аналізу отриманих результатів для подальшого вдосконалення запропонована конструкція виконавчого механізму перемикання передач з двома електродвигунами постійного струму власної розробки. Визначено, що запропоновані нові взаємозв'язки між конструктивними елементами механізму перемикання передач дозволяють отримати одночасно необхідну швидкодію приводу, високу точність регулювання, та забезпечують необхідне зусилля на синхронізаторі. Виконано математичний опис робочого процесу включення передачі автоматизованим електромеханічним механізмом перемикання передач. Математична модель виконавчого механізму електромеханічного приводу керування коробкою передач включає: диференціальні рівняння які описують роботу електродвигуна постійного струму, а також рівняння зв'язку.

**Ключові слова:** перемикання передач, системи автоматичного керування, математичне моделювання.

**Михалевич Микола Григорович<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедри автомобілів ім. А.Б. Гредескула, mkolyag@gmail.com; 050-3431827,

**Сильченко Микола Миколайович<sup>1</sup>**, асистент кафедри автомобілів ім. А.Б. Гредескула, +38 0509755716, mykola.sylchenk@gmail.com,

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

### **Improvement of parameters of the electric motor model of the gearbox mechanism in the transmission of motor vehicles**

**Abstract.** *The article is devoted to improvement of operational parameters of electromechanical automated gear shift gears of heavy trucks and buses, improvement of the design of the actuator of the drive gear control gearbox, optimization of the operation of the algorithm of control of the automated electromechanical gear shift gear. By analyzing information sources, requirements are set for the automated gearbox drive. On the basis of the analysis of existing constructions of the gearshift gears in the mechanical transmission boxes, it was concluded that it is expedient to further improve the electromechanical drive of the gear shift with the actuators on the basis of DC motors, as the most current for use in transmission of heavy trucks and buses. The main disadvantage of such structures at the moment is seen in the lack of universality of the analogues considered, which is to use on gearboxes of different production. This, in turn, negatively affects the cost and reliability of the drive. The dynamical processes taking place in the automated switching mechanism are considered, the mathematical model of the electric motor is investigated and the parameters determined influence the work process, described the types of electric motors used in the technique, the equations*

*used in mathematical modeling are described, the prospects of rational gearbox control are considered. According to the results of the analysis of the obtained results for further improvement, the construction of the actuating mechanism of gear shift with two electric motors of direct current of own design is proposed. It is determined that the proposed new interconnections between the structural elements of the gearshift mechanism allow simultaneously obtaining the required speed of the drive, high accuracy of the adjustment, and provide the necessary effort on the synchronizer. A mathematical description of the working process of the inclusion of transmission by automated electromechanical gear shifting gear is executed. The mathematical model of the executive mechanism of the electromechanical drive gearbox transmission includes: differential equations that describe the operation of the electric motor of the direct current, as well as the equation of communication.*

**Key words:** gearshift, automatic controls, mathematical modeling

**Mikhalevich Nikolay<sup>1</sup>**, Ph.D., Associate Professor of the Department of Automobiles named A.B. Gredescula, +38 050-3431827, mkolyag@gmail.com;

**Silchenko Nikolay<sup>1</sup>**, Assistant Department of the Department of Automobiles named A.B. Gredescula, +38 0509755716, mykola.sylchenk@gmail.com,

<sup>1</sup>Kharkov National Automobile and Highway University, Kharkov, Yaroslava Mudrogo str. 25.