

*Пропонується нова вдосконалена методика розрахунку для побудови магнітної характеристики тягового двигуна постійного струму, що дозволяє підвищити точність розрахунку у режимах ослаблення поля. Розроблено математичні моделі тягового електроприводу з двигуном постійного струму з використанням функціонального перетворювача для визначення коефіцієнта ослаблення поля на основі моделі вебер-амперної характеристики*

*Ключові слова: математичне моделювання, тяговий електропривод, DC–DC перетворювач, двигун постійного струму, міський електротранспорт, вебер-амперна характеристика, силові IGBT транзистори*

*Предлагается новая усовершенствованная методика расчета для построения магнитной характеристики тягового электродвигателя постоянного тока, позволяющая повысить точность расчета в режимах ослабления поля. Разработаны математические модели тягового электропривода с двигателем постоянного тока при использовании функционального преобразователя для определения коэффициента ослабления поля на основе модели вебер-амперной характеристики*

*Ключевые слова: математическое моделирование, тяговий електропривод, DC–DC преобразователь, двигатель постоянного тока, городской электротранспорт, вебер-амперная характеристика, силовые IGBT транзисторы*

УДК 621.313.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.60322

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

**А. А. Шавелкин**

Доктор технических наук, профессор  
Кафедра электроники и электротехники  
Киевский национальный университет  
технологий и дизайна  
ул. Немировича-Данченка, 2, г. Киев, Украина, 01011  
E-mail: shavelkin57@mail.ru

**И. А. Костенко**

Ассистент\*  
E-mail: ks170685@ukr.net

**В. А. Герасименко**

Ассистент\*  
E-mail: twixvi@yandex.ua

**А. Н. Мовчан**

Аспирант\*  
\*Кафедра электрического транспорта  
Харьковский национальный университет  
городского хозяйства им. А. Н. Бекетова  
ул. Революции, 12, г. Харьков, Украина, 61000

## 1. Введение

В настоящее время математическое (имитационное) моделирование общепризнано как эффективный инструмент при исследовании и разработке новых и совершенствовании известных решений электромеханических систем [1]. Это сокращает материальные затраты и снижает сроки внедрения новых энергосберегающих решений. Для тягового электропривода (ТЭП) постоянного тока [2] это, главным образом, решения по модернизации существующих транспортных средств (ТС) городского электротранспорта (ГЭТ) [3], что в данных экономических условиях Украины является актуальной задачей. Этому способствует использование мощных и апробированных программных пакетов типа Matlab [4] и подобных, которые имеют удобный для пользователя интерфейс и обширную библиотеку элементов для составления моделей и экспериментов на их базе.

Актуальность работы заключается в разработке модели вебер-амперной характеристики для модели-

рования тягового двигателя постоянного тока (ДПТ) последовательного возбуждения.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Основная проблема при моделировании тягового двигателя постоянного тока (ДПТ) последовательного возбуждения связана с воспроизведением зависимости магнитного потока от токов обмотки возбуждения и якоря, что предполагает наличие адекватной модели вебер-амперной характеристики. В прямом виде вебер-амперная характеристика не приводится. В работе [5] предлагается использование универсальной кривой намагничивания ДПТ последовательного возбуждения, приведенной в [6] для двигателей серий МП, ДП и Д. Поскольку тяговые ДПТ имеют особенности конструкции и магнитной системы, это не всегда корректно. В литературе по ГЭТ [7] мож-

но найти электромеханическую и механическую характеристики для ряда ДПТ, на основании которых можно рассчитать вебер-амперную характеристику при определенных коэффициентах ослабления поля [8]. Однако возникает вопрос, как определить поток при произвольном коэффициенте ослабления. Так, если использовать вебер-амперную характеристику для режима полного поля (ток якоря  $I_{\text{я}}$  равен току возбуждения  $I_{\text{в}}$ ), то прямой пересчет значения потока по значению тока последовательной обмотки возбуждения (ПОВ) дает результат, отличный от значений, полученных при использовании электромеханических или механических характеристик конкретного ДПТ.

В современных ТС для ТЭП используются различные варианты реализации схемы тягового агрегата в части ослабления поля ДПТ с регулированием тока ПОВ. Наиболее широко распространены схемы с независимым включением цепи якоря и ПОВ с соответствующими импульсными преобразователями постоянного напряжения (ИП) на IGBT. Один из ИП реверсивный. Количество силовых IGBT в схеме тягового агрегата (без цепи тормозного резистора) при этом пять [9] или шесть.

При модернизации ТЭП следует предусматривать возможность использования имеющихся в модернизируемой схеме аппаратов, например, контакторов. Это позволяет уменьшить количество дорогостоящих силовых IGBT и наряду с удешевлением способствует снижению потерь в силовых цепях при сохранении показателей привода на уровне современных решений [8]. Это особенно важно для ТЭП трамвая, где используется два тяговых агрегата. Так, в работе [10] за счет использования контакторов количество силовых IGBT уменьшено до четырех, при этом для ослабления поля используется шунтирование ПОВ транзисторами. Однако не рассмотрен вопрос энергии, отбираемой от ПОВ при ослаблении поля. Исследование вариантов схем ТЭП и сопоставление их показателей предполагает разработку развернутых математических моделей, включая модель ДПТ, схемы преобразователя и системы управления.

Таким образом, недостаточно изучены и нуждаются в дальнейших исследованиях вопросы моделирования ДПТ последовательного возбуждения и электромеханической системы ТЭП в целом с современными преобразователями на IGBT.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка усовершенствованных математических моделей ТЭП с ДПТ последовательного возбуждения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка схемных решений тягового агрегата для модернизации ТЭП;
- исходя из электромеханических характеристик конкретных ДПТ, разработать математическую модель вебер-амперной характеристики ДПТ для расчета магнитного потока по текущим значениям токов якоря и обмоток возбуждения;

- разработать математические модели ТЭП с ДПТ при питании ПОВ от независимого регулируемого источника тока и шунтировании ПОВ;

- выполнить «виртуальный» эксперимент для предложенных решений.

## 4. Анализ схем управления двигателями постоянного тока

### 4.1. Силовые цепи тягового агрегата для модернизации тягового электропривода

Вопрос уменьшения силовых ключей на IGBT в схеме тягового агрегата может быть решен за счет использования контакторов для реверса (реверс осуществляется без тока) и ликвидации избыточности схемы, когда используются модули на двух IGBT (плечо моста). Вариант схемы с независимым включением якоря и ПОВ приведен на рис. 1. Вопрос унификации элементов цепи (при ремонте) при этом решается использованием модулей на одном IGBT. При прямом направлении движения замкнут контактор КВ, при обратном КН.

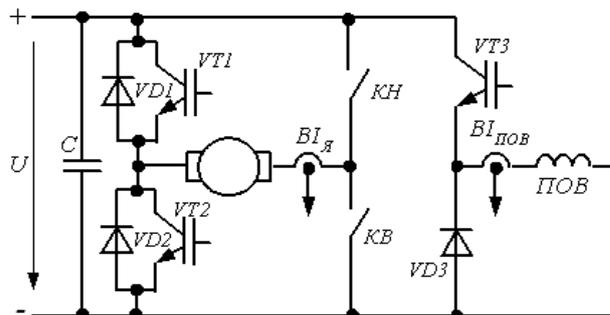


Рис. 1. Схема силовых цепей тягового агрегата с независимым регулированием тока якоря и обмотки возбуждения

Такое же количество силовых IGBT – три используется в схеме на рис. 2 с шунтированием ПОВ, где ИП цепи якоря выполнен на двух IGBT. Еще одной силовой IGBT используется в шунтирующем DC–DC преобразователе, который одновременно может использоваться для питания низковольтных потребителей ТС. Реверс ПОВ осуществляется посредством контакторов КВ и КН.

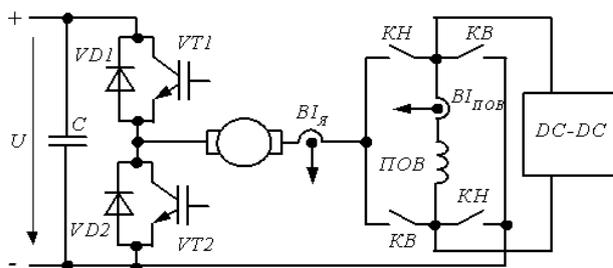


Рис. 2. Схема силовых цепей тягового агрегата с шунтированием обмотки возбуждения

Функциональные возможности схем также одинаковы за исключением перехода в режим рекупера-

тивного торможения. В схеме на рис. 2 используется механизм самовозбуждения.

**4. 2. Система управления тяговым электроприводом**

Поскольку задачей системы управления является формирование токов, целесообразным представляется использование релейных (гистерезисных) регуляторов тока якоря и тока обмотки возбуждения.

Система регулирования замкнута по скорости и реализует принцип двухзонного регулирования. В первой зоне регулируется напряжение якоря при постоянном токе якоря  $I_{я}=I_{ПОВ}$  – задается водителем, во второй зоне ослабление поля при регулировании тока  $I_{ПОВ}$ . Значение тока ПОВ задается функциональным преобразователем в зависимости от скорости, напряжения питания  $U$ , ЭДС якоря (с ограничением предельного значения  $E_{я}<(U-20)$ ) и заданного тока якоря в соответствии с вебер–амперной характеристикой.

Модель ДПТ при последовательном соединении обмотки якоря и ПОВ составляется в соответствии с уравнениями:

$$u_{я} = e_{я} + i_{я}(R_{я} + R_{ДП}) + i_{ПОВ}R_{ПОВ} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + L_{ПОВ} \frac{di_{ПОВ}}{dt}, \quad (1)$$

$$i_{ПОВ} = \alpha i_{я}, \quad e_{я} = K\Phi \cdot \omega_{ДВ}, \quad (2)$$

$$M = K\Phi \cdot i_{я}, \quad M - M_{С} = J_{пр} \frac{d\omega_{ДВ}}{dt}, \quad M_{С} = \frac{W \cdot D_{К}}{2 \cdot \eta \cdot i}, \quad (3)$$

$$J_{пр} = m \cdot K_{и} \frac{D_{К}^2}{4i^2}, \quad \omega_{ДВ} = \frac{v \cdot i}{1.8 \cdot D_{К}} = cv, \quad (4)$$

где  $u_{я}$ ,  $i_{я}$ ,  $i_{ПОВ}$  – мгновенные значения напряжения и тока якоря и последовательной обмотки возбуждения (ПОВ),  $L_{я}$  – индуктивность обмотки якоря и добавочных полюсов,  $L_{ПОВ}$  – индуктивность ПОВ,  $R_{я}$ ,  $R_{ДП}$ ,  $R_{ПОВ}$  – активные сопротивления обмотки якоря, добавочных полюсов и ПОВ,  $\alpha$  – коэффициент ослабления поля (тока ПОВ),  $K$  – конструктивный параметр,  $\Phi$  – поток полюсов,  $\omega_{ДВ}$  – угловая скорость ДПТ,  $J_{пр}$  – приведенный к валу двигателя момент инерции ТС,  $v$  – линейная скорость ТС в км/час,  $K_{и}=(1.15 \div 1.2)$  [11],  $W$  – сила сопротивления, действующая на ТС при движении на прямолинейном горизонтальном участке для трамвая  $W=(5+0,005v^2)G$  [11], для троллейбуса  $W=(12+0,004v^2)G$ ,  $m$  и  $G$  – масса (кг) и вес (кН) ТС,  $D_{К}$  – диаметр колеса,  $\eta$  и  $i$  – КПД и передаточное число передачи,  $M$  и  $M_{С}$  – момент двигателя и момент сопротивления, приведенный к валу ДПТ.

При независимом включении и питании ПОВ от отдельного источника

$$u_{я} = e_{я} + i_{я}(R_{я} + R_{ДП}) + L_{я} \frac{di_{я}}{dt}, \quad (5)$$

$$u_{ПОВ} = i_{ПОВ}R_{ПОВ} + L_{ПОВ} \frac{di_{ПОВ}}{dt}. \quad (6)$$

Ключевым в модели является описание магнитной характеристики тягового ДПТ,

поскольку при расчете характеристик и моделировании ДПТ необходимо знать значение потока машины при произвольных значениях тока якоря и возбуждения.

Для ДПТ последовательного возбуждения предложена методика расчета, основанная на использовании электромеханических характеристик двигателя ( $\Phi(I_{я})$ ) при полном и ослабленном поле. Значения КФ определяются в соответствии с выражением

$$K\Phi = \frac{U_{НОМ} - I_{я}R_{яц}}{\omega_{ДВ}}. \quad (7)$$

Для ДПТ типа ТЕ–022 характеристики  $K\Phi(I_{я})$  [4] соответствуют значениям тока возбуждения  $I_{ПОВ}=I_{я}$  (полное поле) и  $I_{ПОВ}=0.5I_{я}$  (ослабленное поле при  $\alpha=0.5$  – предельный случай). Для ДПТ типа ЭД 139 задаются характеристики при ослаблении поля  $\alpha=1, 0.5, 0.29$ .

Расчетные зависимости  $K\Phi(I_{я})$  для ДПТ типа ЭД139 при  $\alpha=1, 0.5, 0.29$  приведены на рис. 3 (сплошные линии). Так при  $I_{я}=400$  А и  $\alpha=1$  значение  $K\Phi=4.65$ , при  $\alpha=0.5$   $I_{ПОВ}=200$  А и, если использовать характеристику для полного поля при 200 А получаем значение  $K\Phi=3.85$ , в то время как для соответствующей характеристики при  $\alpha=0.5$  и  $I_{я}=400$  А значение  $K\Phi=3.3$ . Такая погрешность недопустима.

Предложено определять значение КФ как функцию от МДС токов  $I_{ПОВ}$  и  $I_{я}$

$$K\Phi = vI_{ПОВ} + aI_{я} + K\Phi_{ОСТ} = v(\alpha I_{я}) + aI_{я} + K\Phi_{ОСТ} = (v\alpha + a)I_{я} + K\Phi_{ОСТ}, \quad (8)$$

где  $v=f(I_{я})$  и  $a=f(I_{я})$  – зависимости, рассчитанные в соответствии с  $K\Phi(I_{я})$  при полном поле и ослаблении  $\alpha$  (вводятся в модель в табличной форме),  $K\Phi_{ОСТ}$  – остаточный магнитный поток.

Зависимости  $v=f(I_{я})$  и  $a=f(I_{я})$  для  $\alpha=0.5 \div 1$  и  $\alpha=0.29 \div 0.5$  приведены на рис. 4.

Структура модели ДПТ приведена на рис. 5.

Модель вебер-амперной характеристики ДПТ (блок  $K\Phi(I)$  на рис. 5) типа ЭД 139 приведена на рис. 6. Такая модель позволяет определять значение КФ при любом ослаблении поля (в пределах допустимого значения).

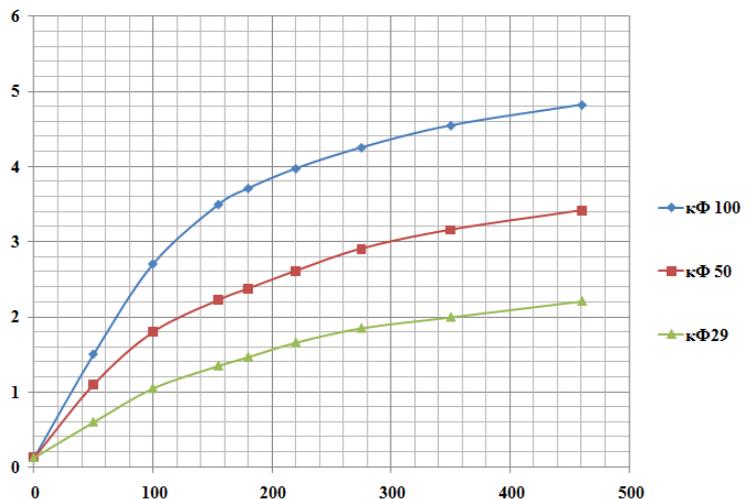


Рис. 3. Расчетные зависимости КФ(Iя) для ДПТ типа ЭД139

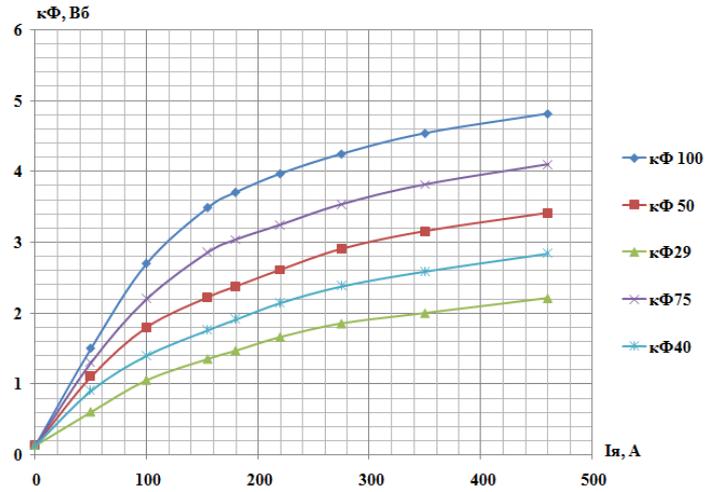


Рис. 4. Зависимости  $v=f(I_{я})$  и  $a=f(I_{я})$  для  $\alpha=0.5 \div 1$  и  $\alpha=0.29 \div 0.5$  для ДПТ типа ЭД139

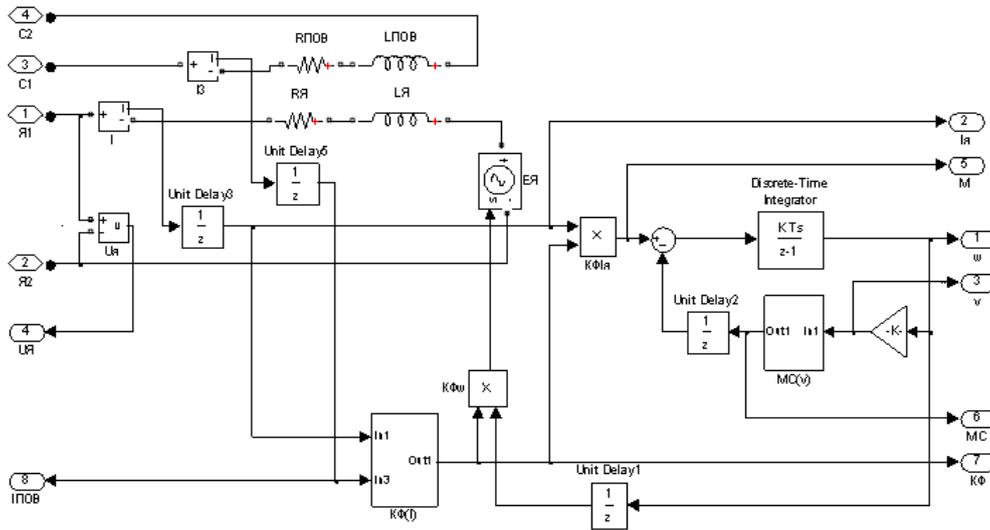


Рис. 5. Структура модели ДПТ последовательного возбуждения

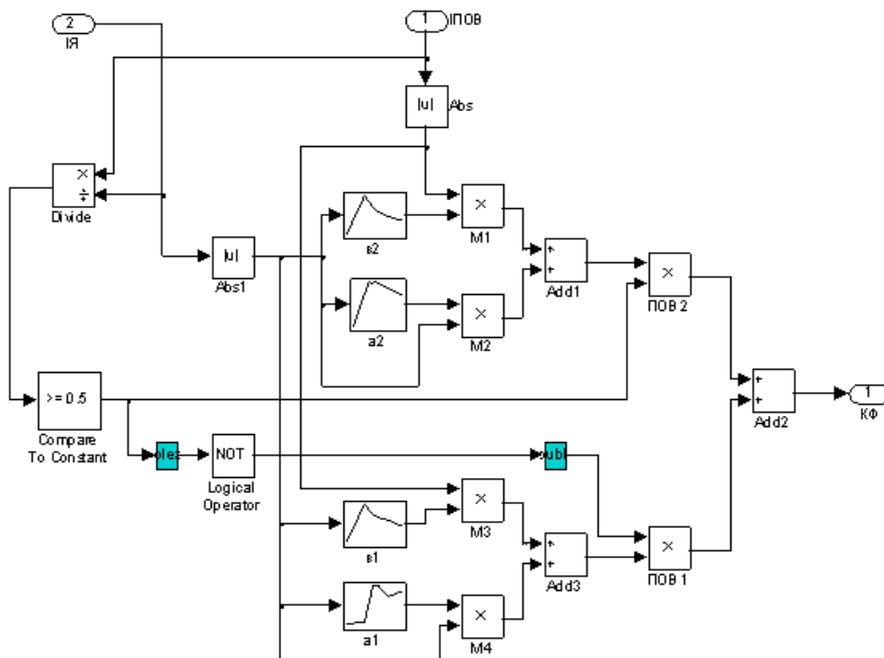


Рис. 6. Модель вебер-амперной характеристики

**5. Результаты моделирования двигателя постоянного тока последовательного возбуждения**

С использованием разработанных моделей исследована работа систем ТЭП, выполненных в соответствии со схемой рис. 2 с ДПТ типа ЭД139 и по схеме рис. 1 с ДПТ типа ТЕ022.

На рис. 7 для ТС массой 18 000 кг приведены осциллограммы скорости  $v$ , момента двигателя  $M$ , тока якоря  $I_{я}$ , тока ПОВ  $I_{ПОВ}$ , мощности  $P_{ш}$ , отбираемой от ПОВ шунтирующим DC-DC преобразователем, мгновенного значения напряжения  $U_{я}$  при использовании в ТЭП ДПТ типа ЭД139. При этом показаны отработка разгона с постоянным заданием тока якоря, последующий кратковременный выбег и торможение. Следует отметить, что мощность в шунтирующей цепи  $P_{ш}$  достаточна велика (свыше 1 кВт), чтобы

ее рассеивать в снабберных цепях шунтирующего транзистора. Ее целесообразно утилизировать для питания низковольтных потребителей ТС. Важный момент в том, что энергия потребляется DC-DC преобразователем даже, когда шунтирующий транзистор заперт (в режиме полного поля). Это объясняется тем, что при работе ИП цепи якоря напряжение на ПОВ имеет импульсный характер. Для ограничения значения  $P_{ш}$  в начальный момент пуска, когда  $E_{я}$  мала, в схеме использовано ограничение скорости тока якоря.

На рис. 8 для ТС массой 30 000/2 кг (масса трамвая на одну тележку) приведены осциллограммы работы ТЭП с двумя ДПТ типа ТЕ022, обмотки которых соединены последовательно. Цепь ПОВ при этом питается от независимого ИП. В данном случае определяется мощность потерь  $P_{к}$  в ИП цепи ПОВ.

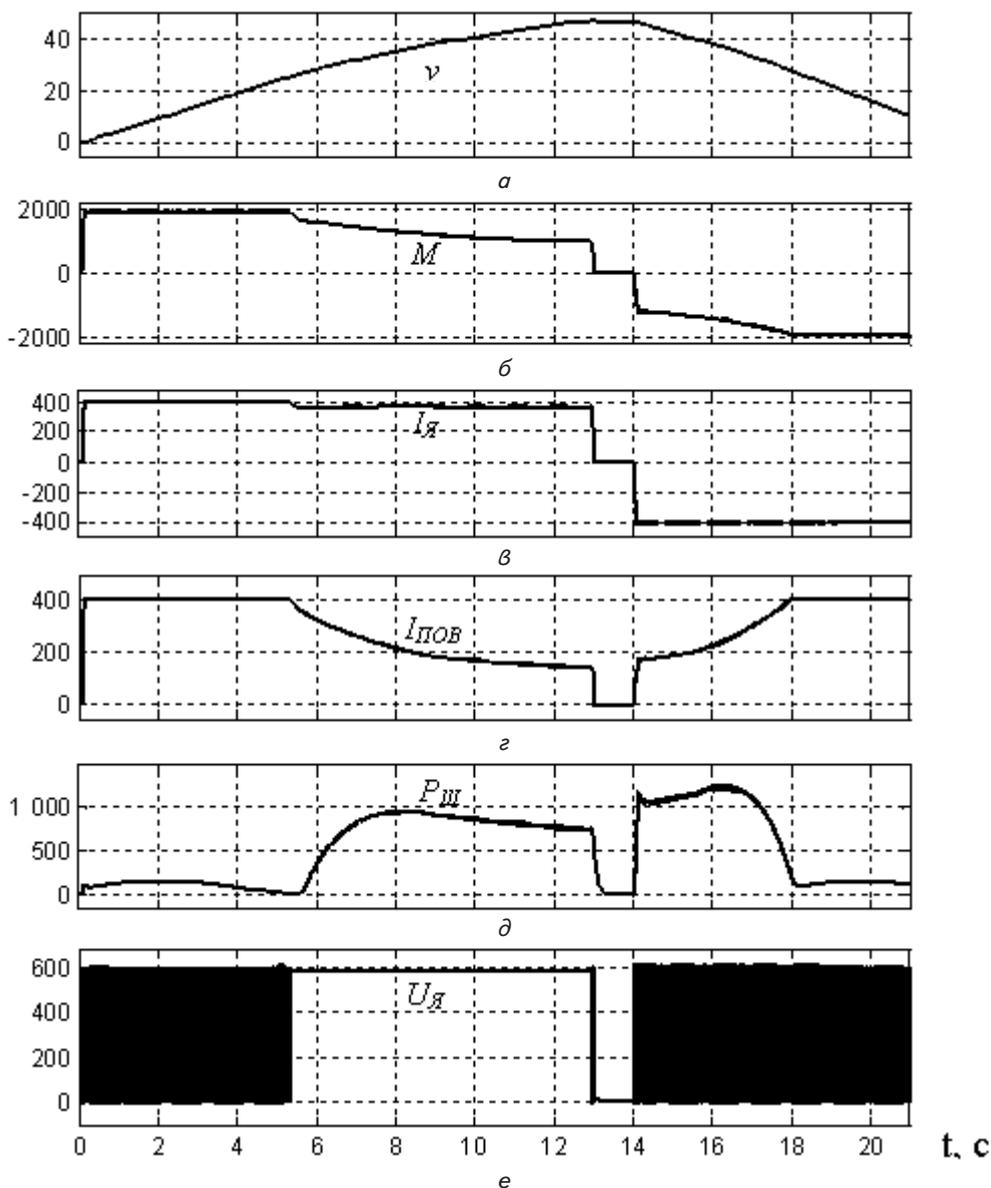


Рис. 7. Осциллограммы процессов в ТЭП с ДПТ типа ЭД139: *а* – зависимость скорости подвижного  $V$  от времени  $t$ , *б* – зависимость момента  $M$  от времени  $t$ , *в* – зависимость тока якоря  $I_{я}$  от времени  $t$ , *г* – зависимость тока последовательной обмотки возбуждения  $I_{ПОВ}$  от времени  $t$ , *д* – зависимость мощности потерь  $P_{к}$  от времени  $t$ , *е* – зависимость напряжения на якоря  $U_{я}$  от времени  $t$

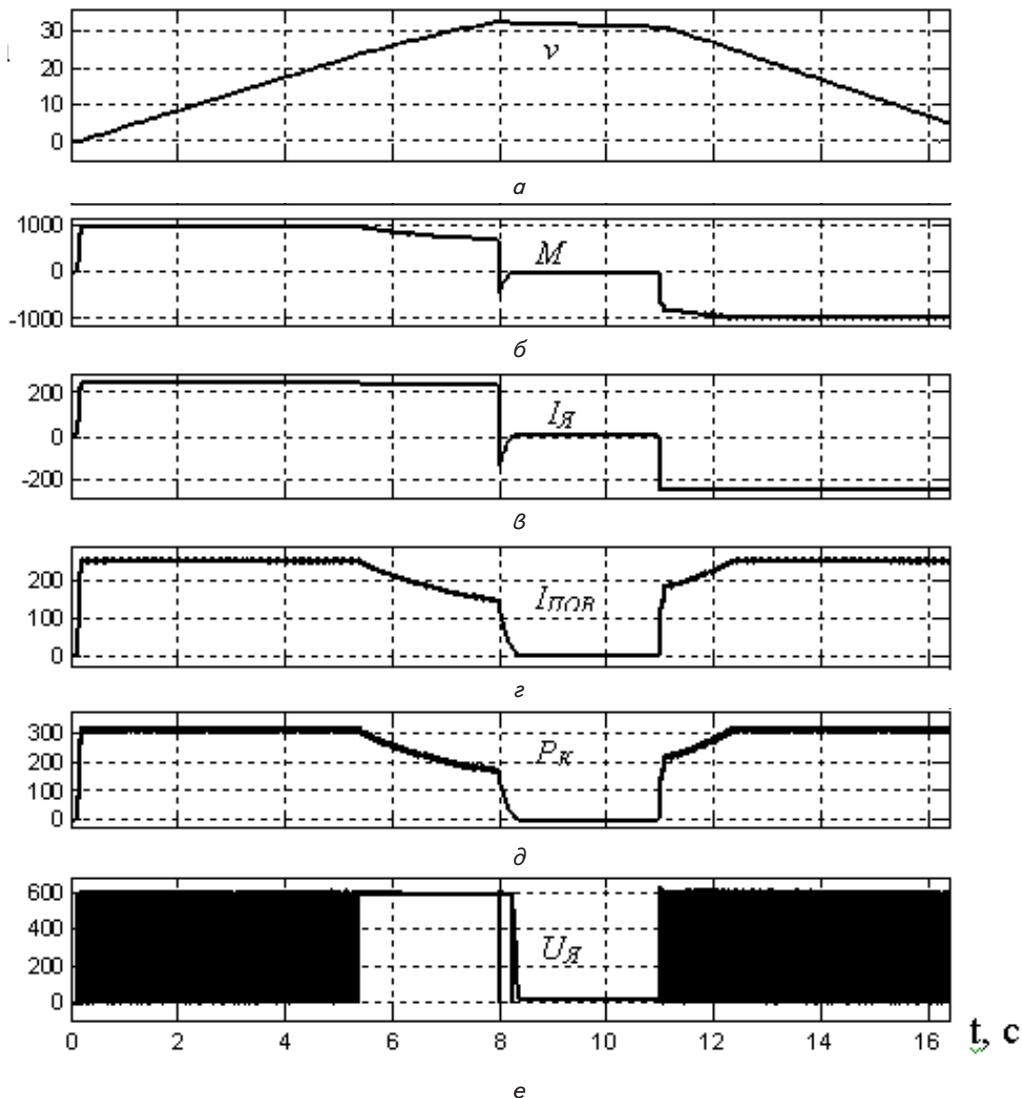


Рис. 8. Осциллограммы процессов в ТЭП с ДПТ типа ТЕ–022: *a* – зависимость скорости подвижного  $V$  от времени  $t$ , *б* – зависимость момента  $M$  от времени  $t$ , *в* – зависимость тока якоря  $I_A$  от времени  $t$ , *г* – зависимость тока последовательной обмотки возбуждения  $I_{ПОВ}$  от времени  $t$ , *д* – зависимость мощности потерь  $P_K$  от времени  $t$ , *е* – зависимость напряжения на якоре  $U_A$  от времени  $t$

Таким образом, разработка усовершенствованных схемных решений и принципов управления ТЭП с ДПТ последовательного возбуждения будет обеспечивать снижение энергопотребления и затраты на модернизацию существующего подвижного состава.

### 6. Выводы

1. Предложена схема и разработана структура системы автоматического регулирования ТЭП с использованием функционального преобразователя для определения коэффициента ослабления поля на основе модели вебер-амперной характеристики. Подтверждена также ее работоспособность при отклоне-

нии реальных параметров ДПТ от расчетных, путем введения соответствующей корректировки, определяемой в режиме полного поля.

2. Разработана модель вебер-амперной характеристики ДПТ, отличающаяся учетом текущих значений токов обмоток якоря и ПОВ, что позволяет повысить точность расчета в режимах ослабления поля.

3. Построена математическая модель ТЭП с ДПТ при питании ПОВ от независимого регулируемого источника тока и шунтировании ПОВ.

4. Разработанная математическая модель позволила осуществить «виртуальный» эксперимент работы ТЭП с ДПТ с независимым включением ПОВ и шунтированием ПОВ, в различных режимах с оценкой всех показателей работы схемы.

### Литература

1. Bitar, Z. Modelling and Simulation of Series DC Motors in Electric Car [Text] / Z. Bitar, I. Khamis, S. Jabi. – Energy Procedia, science direct, 2014.

2. Bambang, K. Design and Development of Small Electric Vehicle Using MATLAB/SIMULINK [Text] / K. Bambang, M. Soebagio, P. Hery. – Institute of Technology, Indonesia, 2011.
3. Richard, A. Mathematical Modelling and Simulation of a PWM Inverter Controlled Brushless Motor Drive System from Physical Principles for Electric Vehicle Propulsion Applications [Text] / A. Richard. – Cork Institute of Technology, Ireland, 2011. doi: 10.5772/16652
4. Simpower System Toolbox [Text]. – Matlab “R2010”.
5. Мокін, Б. І. Ідентифікація параметрів моделей та оптимізація режимів системи електропривода трамвая з тяговими електро-двигунами постійного струму [Текст] / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2008. – 92 с.
6. Вешеневский, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе [Текст] / С. Н. Вешеневский. – М.: «Энергия», 1977. – 432 с.
7. Вишник, Г. В. Троллейбус пассажирский ЗиУ–682Б [Текст] / Г. В. Вишник, В. И. Шабалин, И. Г. Осипов и др. – М.: «Транспорт», 1977. – 208 с.
8. Корягина, Е. Е. Электрооборудование трамваев и троллейбусов [Текст] / Е. Е. Корягина, О. А. Коськин. – М.: Транспорт, 1982. – 296 с.
9. Преобразователь ПТКД–203М [Электронный ресурс]. – <http://www.eltroll.ru/>
10. Кривовяз, В. Тяговый электропривод постоянного тока модернизированного трамвайного вагона «Татра – 3Е» [Текст] / В. Кривовяз, П. Васильев, В. Маевский // Силовая электроника – 2007. – № 3. – С. 36–38.
11. Далека, В. Х. Основи електричної тяги: навч. посібник [Текст] / В. Х. Далека, П. М. Пушков, В. П. Андрійченко, Ю. В. Мінецьва. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 312 с.

*Проведено аналіз проблеми розробки робастних систем керування для об'єктів із значним часом запізнення. Для таких об'єктів важно забезпечити якісне керування, оскільки керування ведеться за попереднім станом виходу об'єкту. Досліджені основні методи налаштування ПІД регуляторів, а також альтернативних типів регуляторів. Рекомендовані найкращі методи синтезу робастних систем керування для об'єктів з великим запізненням*

*Ключові слова: пропорціональний, інтегральний, диференціальний, регулятор, упереджувач, модель, прогнозуючий, робастний, важкокерований, запізнення*

*Проведен анализ проблемы разработки робастных систем управления для объектов с большим временем запаздывания. Для таких объектов трудно обеспечить качественное управление, поскольку управление ведется по прошлому состоянию выхода объекта. Исследованы основные методы настройки ПИД регуляторов, а также альтернативных типов регуляторов. Рекомендованы лучшие методы синтеза робастных систем управления для объектов с большим запаздыванием*

*Ключевые слова: пропорциональный, интегральный, дифференциальный, регулятор, упредитель, модель, прогнозирующий, робастный, труднорегулируемый, запаздывание*

УДК 681.51

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59107

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБАСТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ОБЪЕКТАМИ С БОЛЬШИМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

**А. А. Стопакевич**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра компьютерно-интегрированных  
технологических процессов и производств  
Одесская национальная академия  
связи им. О. С. Попова  
ул. Кузнечная, 1, г. Одесса, Украина, 65029  
E-mail: stopakevich@gmail.com

**А. А. Стопакевич**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра автоматизации  
теплоэнергетических процессов  
Одесский национальный  
политехнический университет  
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044  
E-mail: stopakevich@mail.ru

### 1. Введение

Модели каналов динамики большинства технологических процессов являются устойчивыми и имеют в своем составе звено запаздывания, причиной появления которого являются особенности массо- и энергообмена, а также конструктивные особенностями технологических установок. И хотя известно множество

разных типов регуляторов, при разработке систем с запаздыванием используются, как правило, регуляторы ПИД-семейства и некоторые регуляторы специальной структуры.

Простота и эффективность регуляторов ПИД-семейства является основной причиной их широкого применения в промышленности. Больше 90 % всех систем управления технологическими процессами ис-