

I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.316.718

Курись Л. В.¹, Бялобржеський О. В.²

¹Аспірант, кафедра Систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна, E-mail: wow.lesichka@mail.ru

²Канд. техн. наук, доцент кафедри Систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна

СХЕМА ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

В роботі проведено аналіз існуючих способів підвищення енергетичної ефективності транспортних засобів з електричною трансмісією, на підставі якого визначене особливе місце накопичувачів електроенергії. Для дослідження перехідних процесів в режимах роботи транзисторного перетворювача розроблена математична модель тягового електротехнічного комплексу. В моделі реалізовані динамічний (розгін) та стаціонарний (ослаблення магнітного потоку) режими двигуна постійного струму з конденсаторним накопичувачем енергії.

Ключові слова: електрифікований транспорт, система диференціальних рівнянь, математична модель, перехідні процеси, ослаблення магнітного потоку, накопичувач енергії.

ВСТУП

Проблема ефективного використання енергетичних ресурсів в цілому та електроенергії зокрема набуває все більшого значення [1, 2]. Дана проблема на різних рівнях та в різні періоди може мати різні цілі, пріоритети, завдання.

В епоху розвитку електрифікації міського електричного транспорту виявлені нові тенденції економії та енергозбереження електроенергії [3]. Реальним, ефективним засобом енергозбереження та підвищення надійності роботи для міського електротранспорту є застосування накопичувачів електроенергії [4].

Накопичувачі енергії, дозволяють забезпечити прийом надлишкової енергії електричної рекуперації шляхом відведення заряду та обмеження напруги у вузлі до якого під'єднані. Деякі виробники використовують накопичувачі енергії для підвищення енергетичної ефективності засобів міського транспорту [1, 3].

Ефективність використання накопичувача залежить від схемного рішення в якому він застосовується та алгоритму функціонування системи управління. Використання повністю керованих напівпровідникових пристроїв дозволяє реалізувати багатофункціональні силові схеми [2]. Але взаємозв'язок між характеристиками зазначених схем та бажаними характеристиками руху, як правило, не враховується.

МЕТА РОБОТИ

Розробка схеми тягового електротехнічного комплексу транспортного засобу, що має накопичувач енергії.

МАТЕРІАЛІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Тяговий електропривод широко використовується для енергозберігаючого та екологічно чистого міського громадського транспорту з живленням, як від контактної мережі, так і від акумуляторної батареї [3].

Тяговий електропривод з накопичувачем енергії скорочує викиди пилу від колодок механічних гальм через

наявність електродинамічного гальмування, забезпечує роботу при відсутності напруги в контактній мережі, що скорочує простой в пробках при обривах контактної мережі, забезпечує транспортну роботу з мінімальними затратами, за рахунок мінімізації пускових втрат та рекуперації енергії гальмування [3].

Одним з основних факторів, які істотно впливають на якість електроспоживання електротранспорту, є високі коливання напруги в контактних мережах [5]. Це цілий комплекс питань, які потребують перегляду з точки зору сучасних підходів до електропостачання та енергозбереження.

У деяких зарубіжних країнах стабілізація тягової напруги здійснюється електромашинними інерційними накопичувачами електроенергії – маховиками [6]. У інших країнах на тяговій підстанції встановлюють нерегульовані випрямлячі, які живлять через трансформатор від трифазної мережі [7] надвисокоємні конденсатори (суперконденсатори) – джерела струму нового покоління [4]. На кожній підстанції пропонують встановлювати комплект суперконденсаторів ємністю кілька сотень Фарад. При виникненні на лінії великого пікового навантаження комплект суперконденсаторів або інерційних накопичувачів бере на себе компенсацію цього навантаження, не викликаючи перевантажень мережі, а розподіляючи навантаження рівномірно в часі.

Особливий інтерес серед індуктивних накопичувачів енергії в системах тягового електропостачання представляють надпровідникові індуктивні накопичувачі енергії (НПН) з можливістю тривалого терміну її зберігання [8].

У деяких зарубіжних країнах розпочато роботу з оснащення тягових ліній вторинними джерелами струму: комплектами акумуляторних батарей [4]. Головні недоліки існуючих методів стабілізації тягової напруги: значна собівартість та небезпека для персоналу при експлуатації накопичувачів, істотні капіталовкладення для розміщення таких систем, існує загроза екологічної безпеки.

В основу побудови швидкодіючих трансформаторно-напівпровідникових стабілізаторів було покладено

принцип модуляції і демодуляції змінної напруги з широтно-імпульсним регулюванням додаткової напруги [9].

Таким чином, в даний час є необхідна елементна база для використання накопичувачів в структурі електричної частини міського електричного транспорту.

На рис. 1 приведена силова схема для регулювання тягового електроприводу з накопиченням енергії. Дана система дозволяє забезпечити накопичення надлишкової енергії, яка виробляється електродвигуном в процесі гальмування, на конденсаторному накопичувачі та в її подальшому використанні в режимі розгону.

В стаціонарному режимі живлення якірної обмотки *Я* двигуна здійснюють від транзисторного перетворювача напруги, з'єднаного через фільтр *F* та діод *VD12* з мережею постійного струму через струмоприймач.

При русі вперед у режимі повного магнітного потоку транзистор *VT6* постійно включений, а транзистором *VT11* здійснюється регулювання напруги, що прикладається до якірної обмотки *Я* та обмотки збудження *L*, послідовно з'єднаної з останньою за допомогою діода *VD8*.

При постійності заданого значення струму в колі якірної обмотки *Я* шпаруватість регулювання транзистора *VT11* зі збільшенням швидкості руху також збільшується, і при певній швидкості транзистор *VT11* відкривається повністю.

Подальша підтримка заданої величини струму якірної обмотки *Я* здійснюється ослабленням магнітного потоку електродвигуна за допомогою зміни шпаруватості регулювання транзистора *VT9*. При включеному стані транзистора *VT9* струм якірної обмотки *Я* замикається по колу: контактна мережа – діод *VD12* – транзистор *VT6* – якірна обмотка *Я* – транзистор *VT9* – контактна мережа, а струм в обмотці збудження *L* замикається по колу: обмотка збудження *L* – транзистор *VT11* – діод

VD9 – діод *VD8* – обмотка збудження *L*, при цьому зменшуючись із постійною часу цього ланцюга.

Слід відмітити, що в цьому режимі по елементах *VT9* та *VD9* протікає різниця струму якоря та струму збудження. При виключеному стані транзистора *VT9* складова струму рівна різниці між струмом якірної обмотки *Я* та струмом обмотки збудження *L* замикається через діоди *VD8* та *VD7*. При роботі в розглянутому режимі величина відношення середнього значення струму обмотки збудження *L* електродвигуна до середнього значення струму якірної обмотки *Я* при збільшенні шпаруватості регулювання транзистора *VT9* зменшується.

При русі вперед у гальмівному режимі регулювання шпаруватості роботи транзистора *VT7* забезпечується величина струму в обмотці збудження *L*, необхідна для забезпечення заданої величини струму в якірній обмотці *Я*. Зі зменшенням швидкості руху транспортного засобу та постійному значенні струму в колі якірної обмотки *Я*, регульованому за допомогою зміни струму в обмотці збудження *L*, останній збільшується та при певній швидкості стає рівним струму в якірній обмотці *Я*. У цьому режимі роботи електроприводу й режимах, що відповідають меншим значенням швидкостей, при включеному стані транзистора *VT7* струм якірної обмотки *Я* та струм обмотки збудження *L* замикаються по колу: якірна обмотка *Я* – транзистор *VT7* – обмотка збудження *L* – транзистор *VT11* – діод *VD9* – якірна обмотка *Я*.

При подальшому зменшенні швидкості шпаруватість регулювання транзистора *VT7* збільшується й при певній швидкості, при якій е.р.с. якірної обмотки *Я* стає рівною сумарному падінню напруги на елементах кола: якірна обмотка *Я* – транзистор *VT7* – обмотка збудження *L* – транзистор *VT11* – діод *VD9* – якірна обмотка *Я*, транзистор *VT7* відкривається повністю.

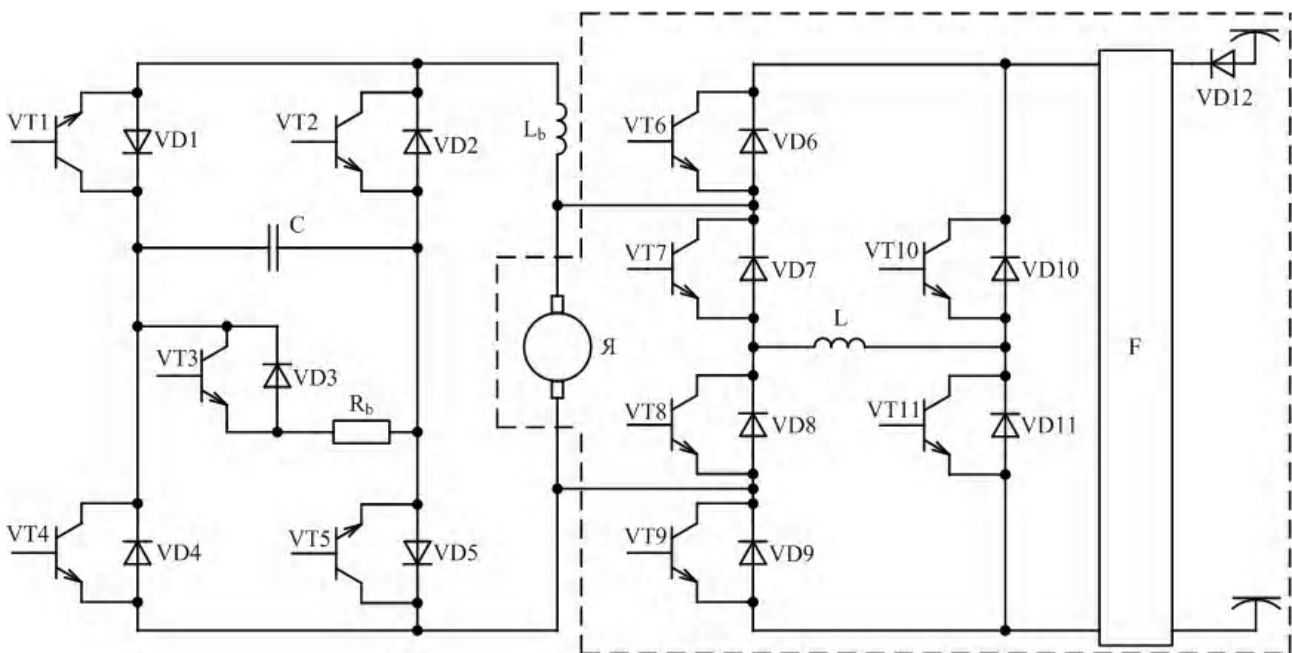


Рисунок 1 – Силовa схема для регулювання тягового електроприводу постійного струму з акумулюванням енергії

При подальшому зменшенні швидкості струм якірної обмотки $Я$ замикається по контуру: якірні обмотка $Я$ – буферна індуктивність L_b – транзистор $VT2$ – конденсатор C – транзистор $VT3$. Потужність, вироблювана електродвигуном у цьому режимі, не передається в контактну мережу, а накопичується на конденсаторі C , протікаючи по контуру якірні обмотка $Я$ – буферна індуктивність L_b – діод $VD1$ – конденсатор C – діод $VD5$.

Якщо в процесі гальмування значення напруги на конденсаторі C підвищується до допустимого значення вмикається транзистор $VT3$, за допомогою якого забезпечується контур замикання струму якірної обмотки $Я$

через резистор R_b , тим самим передача в нього енергії, вироблюваної електродвигуном у цьому режимі [10].

Для наведених режимів роботи складено системи диференціальних рівнянь [11] зведені у табл. 1, де прийняті наступні позначення u_M – напруга мережі, $u_{я}$ – напруга якоря, $i_{я}$ – струм якоря, $i_{зб}$ – струм обмотки збудження, i_{cm} – струм статичний, $i_{дин}$ – струм динамічний, E_0 – електрорушійна сила, C_e – еквівалентна ємність, R_H – опір навантаження, $R_{я}$ – опір якірної обмотки, $L_{я}$ – індуктивність якірної обмотки, $R_{зб}$ – опір обмотки збудження, $L_{зб}$ – індуктивність обмотки збудження, $k\phi$ – параметр магнітного потоку.

Таблиця 1 – Системи диференціальних рівнянь для режимів роботи системи для регулювання тягового електроприводу з акумулюванням енергії

Схема роботи	Диференціальне рівняння
<p>Режим повного магнітного потоку</p>	$\begin{cases} u_M = \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt + E_0 + i_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + i_{зб} R_{зб} + L_{зб} \frac{di_{зб}}{dt}; \\ i_{я} = i_{cm} + i_{дин}; \quad \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt + E_0 = i_{cm} \cdot R_H; \\ k\phi = f(i_{зб}); \quad i_{зб}(0) = i_{я}(0). \end{cases}$
<p>Режим ослаблення магнітного потоку (VT9 відкритий)</p>	$\begin{cases} u_{я} = \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt + E_0 + i_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt}; \\ 0 = i_{зб} R_{зб} + L_{зб} \frac{di_{зб}}{dt}; \\ i_{я} = i_{cm} + i_{дин}; \quad \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt + E_0 = i_{cm} \cdot R_H; \\ k\phi = f(i_{зб}); \quad i_{зб}(0) = i_{я}(0). \end{cases}$
<p>Режим ослаблення магнітного потоку (VT9 закритий)</p>	$\begin{cases} u_{я} = \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt + E_0 + i_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + i_{зб} R_{зб} + L_{зб} \frac{di_{зб}}{dt}; \\ i_{я} = i_{зб} + i'_{я}; \\ 0 = i'_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di'_{я}}{dt} + \frac{1}{C_e} \int i'_{я} dt + E_0; \\ k\phi = f(i_{зб}). \end{cases}$
<p>Режим гальмування (VT2 відкритий)</p>	$\begin{cases} u_M \gamma = i_{зб} R_{зб} + L_{зб} \frac{di_{зб}}{dt}; \\ (E_0 + u_c) + \frac{1}{C} \int i_{дин} dt + \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt = i_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + L_b \frac{di_{я}}{dt}. \end{cases}$
<p>Режим гальмування (VT2 закритий)</p>	$\begin{cases} u_M \gamma = i_{зб} R_{зб} + L_{зб} \frac{di_{зб}}{dt}; \\ (E_0 - u_c) + \frac{1}{C} \int i_{дин} dt + \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt = i_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + L_b \frac{di_{я}}{dt}. \end{cases}$

Наведену на рис. 1 силову схему, можна розглядати у загальному випадку, як схему з двома каналами управління: струмом якоря та ослабленням збудження. Для розрахунку контуру струму за рис. 2 а необхідно представити тяговий електродвигун як ланку типової замкнутої системи авторегулювання за відхиленням. Цю ланку за теорією автоматичного управління можна розглянути як нелінійну інтегруючу ланку з двома вхідними величинами ($U = U_1 k$ та β) та з вихідною величиною – струм i . Тут k – коефіцієнт заповнення імпульсного перетворювача ($0 \leq k \leq 1$), β – коефіцієнт ослаблення збудження тягового електродвигуна.

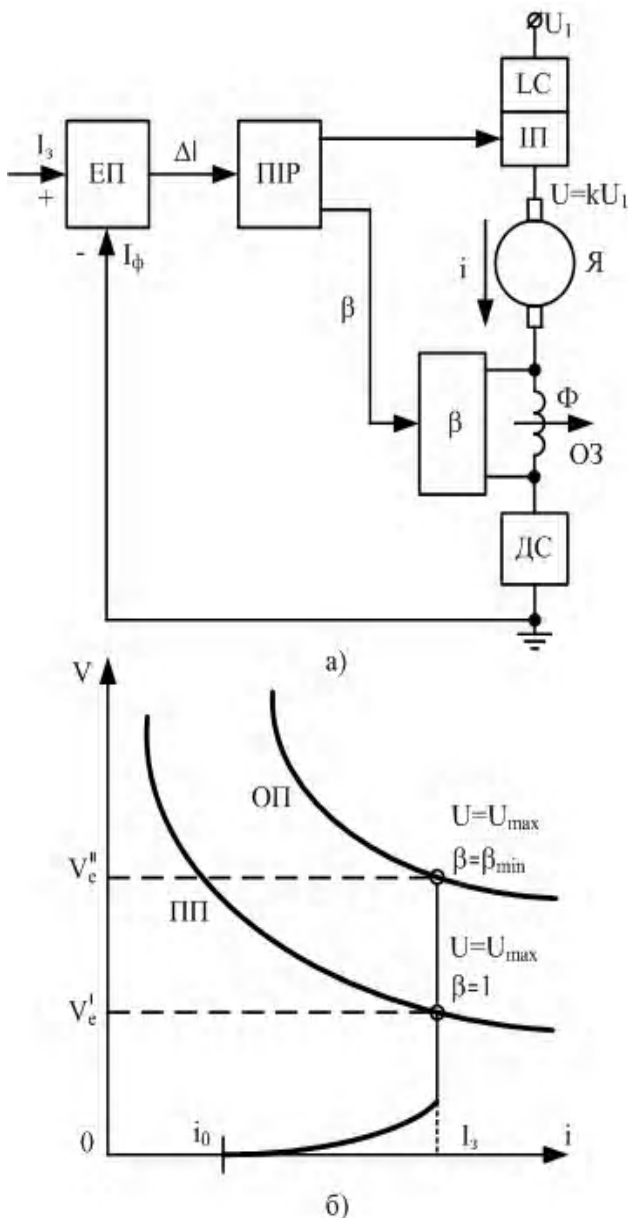


Рисунок 2 – Функціональна схема регулювання струму тягового електричного двигуна (а) та діаграма її роботи (б): ЕП – елемент порівняння; ПП – пропорційно-інтегральний регулятор; ІП – імпульсний перетворювач; ДС – датчик струму; ОЗ – обмотка збудження

Для побудови розрахункової моделі цієї ланки доцільно скористатися представленням магнітної характеристики тягового електродвигуна в аналітичній формі, названої також формулою Фроліша:

$$k\phi = \frac{\beta i}{A\beta i + B}, \quad (1)$$

де ϕ – магнітний потік; k – постійна; A, B – коефіцієнти апроксимації.

Підставивши (1) в рівняння електричної рівноваги тягового електродвигуна

$$I = \frac{U - k\phi\omega}{R}, \quad (2)$$

де R – опір обмоток; ω – частота обертання; $k\phi\omega$ – електрорушійна сила тягового електродвигуна, отримаємо вираз для регульованої величини, а точніше аналітичний запис статичної характеристики регулювання двигуна в неявному вигляді

$$I = \frac{U}{R} - \frac{\beta i \omega}{(A\beta i + B)R}. \quad (3)$$

На базі схеми рис. 1 з урахуванням позицій наведених на рис. 2 в програмному пакеті Matlab розроблена математична модель тягового електротехнічного комплексу постійного струму для дослідження перехідних процесів в динамічному режимі.

В основі математичної моделі тягового приводу лежить вбудована в Simulink модель машини постійного струму. Для моделювання основного питомого опору руху задається момент опору M_o , пропорційний квадрату швидкості машини:

$$\left. \begin{aligned} w_0(v) &= 12 + 0,004v^2 \\ M_o &= w_0(v) \frac{M_{EPC} R_k}{\mu_{ред}} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

де R_k – радіус колеса транспортного засобу, $\mu_{ред}$ – передавальне число тягового редуктора, M_{EPC} – фізична маса транспортного засобу.

Тяговий електродвигун постійного струму послідовного збудження ДК210-А3 в математичній моделі представлений блоком DC Machine: напруга $U_H = 550$ В, потужність $P_H = 110$ кВт, частота обертів $n_H = 1500$ об/хв, опір якорної обмотки $R_{я} = 0,0062$ Ом, опір обмотки збудження $R_{зб} = 0,0048$ Ом. Величина ємності конденсатора дорівнює $C = 12,71$ Ф.

В моделі реалізовані режими розгону, послаблення поля та гальмування, елементи перехідних процесів наведені на рис. 3. Аналіз результатів (рис. 3) показує працездатність запропонованої схеми та наступне:

1. Робота схеми відбувається за рахунок періодичної комутації вентилів зумовленою системою регулювання, при цьому амплітуда пульсацій струму на перевищує 3%.

2. При послабленні поля (рис. 3 б) короточасні шунтування обмотки збудження, та відповідно прямі підключення якоря до джерела живлення призводять до виникнення пульсацій струму які складають близько 5%.

3. Підтримка струму якоря (рис. 3в) при гальмуванні забезпечується системою управління накопичувача на заданому рівні а пульсації не перевищують 7%.

ВИСНОВКИ

1. Запропонована схема силового перетворювача, який забезпечує роботу машини постійного струму послідовного збудження з регулюванням напруги якоря та струму збудження, яка дозволяє реалізувати необхідні тягові характеристики.

2. Шляхом введення в схему керованого конденсаторного накопичувача, та відповідного формування імпульсів управління транзисторами, реалізовано режими гальмування з накопиченням енергії гальмування на конденсаторі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи / А. Т. Бурков – М. : Транспорт, 2005. – 464 с.
2. Иньков Ю. М. ЭПС с электрическим торможением / Ю. М. Иньков, Ю. И. Фельдман – М. : УМЦ ЖДТ, 2008. – 412 с.
3. Малоземов Б. В. Энергосберегающие технологии технического обслуживания электрического транс-

4. Пакулин А. Г. Уменьшение потерь и повышение качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения / Пакулин А. Г. – Самара : СамИИТ, 1991. – 59 с.
5. Москаленко В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
6. Почаевец А. Г. Электрические подстанции / А. Г. Почаевец / – М. : Желдориздат, 2001. – 512 с.
7. Скляров В. Ф. Диагностическое обеспечение энергетического производства / В. Ф. Скляров, Р. А. Гуляев – Киев : Техника, 1985. – 184 с.
8. Шапиро С. В. Система стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта / С. В. Шапиро, С. Р. Муфтиев // Электротехника. 2010 № 3. С. 40–46.
9. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / П. П. Пархоменко. – М. : Энергия, 1981. – 320 с.
10. Пристрій для регулювання тягового електроприводу з акумулюванням енергії [Текст] : патент на корисну модель № 75123. Україна: МПК НО23 7/00 / Курись Л. В., Бялобржеський О. В., Лосіна К. І.; Заявник та патентовласник: Кременчуцький національний університет умені М. В. Остроградського. – заявл. 17.04.2012; опубл. 26.11.2012, бюл. №22, 2012.
11. Черный А. П. Моделирование электромеханических систем / А. П. Черный, А. В. Луговой, Д. И. Родькин. – Кременчуг, 1999. – 204 с.

*Стаття надійшла до редакції 24.03.2015
Після доробки 20.04.2015*

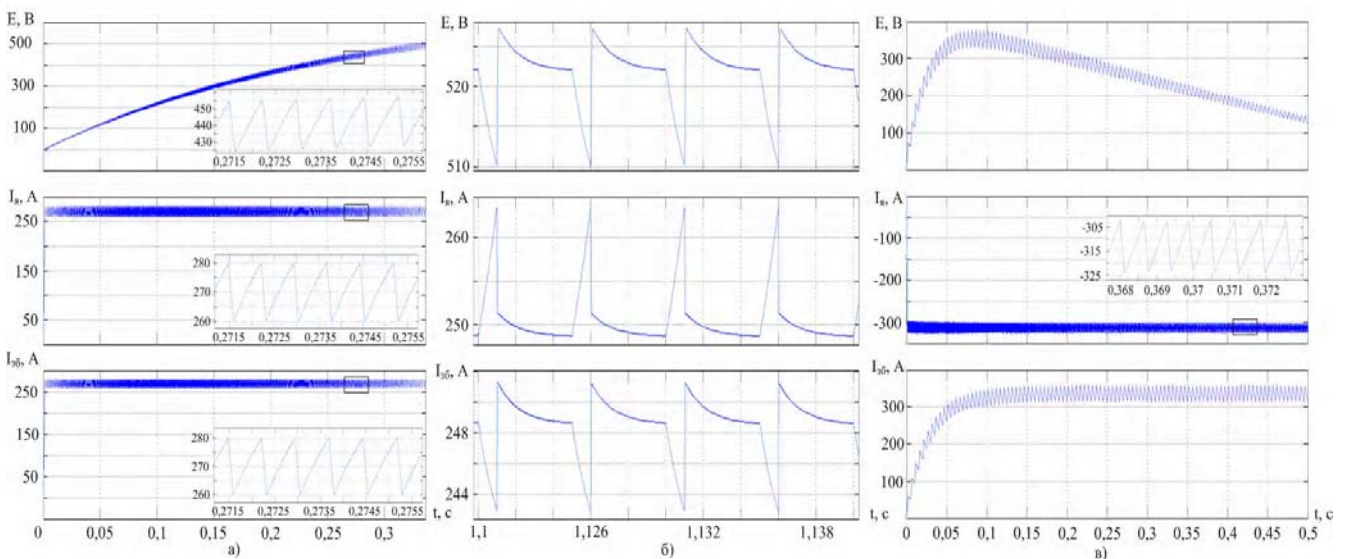


Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів електричної сили, струму якоря та струму збудження тягового електроприводу постійного струму в режимі повного магнітного потоку (а), режимі ослаблення магнітного потоку (б) та в режимі гальмування (в)

Курьсь Л. В.¹, Бялобржеский А. В.²

¹Аспирант, кафедра Систем електропостачання та енергетичного менеджмента, Кременчузький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна

²Канд. техн. наук, доцент кафедри Систем електропостачання та енергетичного менеджмента, Кременчузький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна

СТРУКТУРА ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

В работе проведен анализ существующих способов повышения энергетической эффективности транспортных средств с электрической трансмиссией, на основании, которого выделено особое место накопителей электроэнергии. Для исследования переходных процессов в режимах работы транзисторного преобразователя разработана математическая модель тягового электротехнического комплекса. В модели реализованы динамический (разгон) и стационарный (ослабление магнитного потока) режимы двигателя постоянного тока с конденсаторным накопителем энергии.

Ключевые слова: *электрифицированный транспорт, система дифференциальных уравнений, математическая модель, переходные процессы, ослабление магнитного потока, накопитель энергии.*

Kurys L.V.¹, Bialobrzeski O.V.²

¹Postgraduate Department Electricity consumption systems and power management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Ukraine

²Associate Professor Department. Electricity consumption systems and power management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Ukraine

THE STRUCTURE OF THE ELECTROTECHNIC TRACTION COMPLEX OF VEHICLE WITH ENERGY STORAGE

This paper analyzes the existing means of improving the energy efficiency of vehicles with electric transmission, on its basis the special place of electricity storage is allocated. The scheme of transistor converter for implementation of the DC motor traction characteristics by consistent or independent excitation modes of acceleration movement and braking is given. Additionally, the scheme is introduced for the controlled capacitor drive for accumulation of excess braking energy and use it during acceleration. To study the transition process in operation mode of transistor converter the mathematical model of electro-technical traction complex is developed. The model realizes the dynamic (acceleration) and stationary (weakening magnetic flux) modes of DC motor with capacitor energy storage.

Key words: *electrified transportation, system of differential equations, mathematical model, transitional processes, weakening magnetic flux, energy storage.*

REFERENCES

1. Burkov A. T. Elektronnaya tehnika i preobrazovateli. Moscow, Transport, 2005, 464 p.
2. In'kov U. M., Fel'dman U. I. E'PS s e'lektricheskim tormozheniem. Moscow, UMCZ ZHDCZ, 2008, 412 p.
3. Malozemov B. V. E'nergoberegaushie tehnologii tehnicheskogo obsluzhivaniya e'lektricheskogo transporta. E'lektroe'nergiya I buduchhee civilizachii: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Tomsk, 2004, pp. 391–393.
4. Pakulin A. G. Umen'shenie poter i povыshenie kachestva e'lektricheskoy e'nergii v sisteme tyagovogo e'lektrosnabzheniya. Samara, SamIIT, 1991, 59 p.
5. Moskalenko V. V. E'lektricheskii privod. Moscow, Akademiya, 2007, 368 p.
6. Pochaevecz A. G. E'lektricheskije podstanczii. Moscow, Zheldorizdat, 2001, 512 p.
7. Sklyarov V. F. Diagnosticheskoe obespechenie e'nergeticheskogo proizvodstva. Kyiv, 1985, 184 p.
8. Shapiro S. V. Sistema stabilizaczii napryazheniya tyagovy'h podstanczuy gorodskogo e'lektrotransporta, E'lektrotehnika, 2010, No. 3, pp. 40–46.
9. Parhomenko P. P. Osnovy' tehnicheskoy diagnostiki (optimizaczija algoritmov diagnostirovaniya, apparaturny'e sredstva). Moscow, 1981, 320 p.
10. Kurys L. V., Bialobrzeski O. V., Losina K. I. Prustriy dlya regulyvannya tyagovogo elektroprivodu z akumulyvannya energii: patent na korysnu model № 75123. Ukraina: MPK HO23 7/00, Zaiavnyk ta patentovlasnik: Kremenchuczkyy natsionalnyi universtet imeni M. V. Ostrogradskogo, zaiavl. 17.04.2012; opubl. 26.11.2012, biul. №22, 2012.
11. Chorny'y A. P. Modelirovanie e'lektromehaniicheskikh sistem. Kremenchug, 1999, 204 p.