



V. ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

УДК 621.313.2

DOI: 10.37128/2520-6168-2019-4-8

ОПТИМІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕТВОРЮВАЧА В ГАЛЬМІВНИХ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ ТЯГОВОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Видмиш Андрій Андрійович к.т.н., доцент
Возняк Олександр Миколайович к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет

Vydmysh Andriy, Ph.D., Associate Professor
Voznyak Olexander, Ph.D., Associate Professor
Vinnytsia National Agrarian University

Розглянуто умови оптимізації характеристик перетворювача для гальмівних режимів двигуна постійного струму. При гальмуванні забезпечується мінімізація рівня пульсацій струму при використанні різноманітних способів регулювання струму.

Розв'язання проблем ефективного використання тягового двигуна постійного струму та створення безпечних режимів його роботи за допомогою забезпечення оптимального режиму.

Введення в схеми додаткових елементів дозволяє знизити швидкість затухання струму в гальмівних обмотках.

Істотною перевагою запропонованої модернізації схем, полягає у введенні в схему діодів, що дозволить використати самозбудження електродвигуна для електричного гальмування.

Запропоноване рішення дозволяє спростити технічну реалізацію і зменшити витрати через відсутність додаткового незалежного джерела живлення гальмівних обмоток.

Істотним чинником підвищення рентабельності роботи електротранспорту в цілому може бути заміна існуючого тягового електроприводу (ТЕП) на більш сучасні їх види.

Розроблено імітаційні моделі, які дозволяють досліджувати електромеханічні процеси в серієсному двигуні постійного струму.

Введення в схему імпульсного регулятора діода, який шунтує обмотку збудження, дозволяє знизити швидкість затухання струму в цій обмотці.

Запропонована модернізація схеми полягає у введенні в схему діодів, накопичувача енергії, що дозволяє використовувати гальмівні режими при самозбудженні електродвигуна та уникнути застосування додаткових незалежних джерел струму.

Ключові слова: оптимізація, імпульсне регулювання, двигун постійного струму, мостовий перетворювач, електропривод, керування двигуном постійного струму, перехідний режим.

Рис.6. Літ.19

1. Постановка проблеми

У системах електроприводів постійного струму електротранспорту разом з механічними засобами використовуються три основних способи електричного гальмування двигуна постійного струму (ДПС): рекуперативне – з передаванням енергії до мережі або до іншого споживача в цій мережі; гладку вально – із зміною полярності живлення однієї з обмоток – електродинамічне, коли енергія поглинається додатковим опором. Введення імпульсного регулювання в процес гальмування дає змогу за рахунок зміни параметрів імпульсів керування: періоду T , часу імпульсу t_i і часу паузи t_n встановити оптимальний режим гальмування, найчастіше забезпечити сталий струм гальмування I_0 [1].

Важливе місце в сучасній транспортній інфраструктурі міст займає електротранспорт. Роль його буде зростати, оскільки він є екологічним та достатньо енергоефективним. В подальшому подібні дослідження можна реалізувати в електромобілях.

Основою електрорухомого складу є електропривод. В якості приводних двигунів найчастіше використовуються тягові двигуни постійного струму.

Використання таких двигунів супроводжується значними втратами енергії в пускових та гальмівних режимах, а також при зміні навантажень двигуна. Це пов'язано із обмеженою можливістю використання рекуперованої електроенергії (часто ця енергія не відповідає нормам) та



призводить до її значних втрат, а як наслідок значно зростає вартість перевезень. Поліпшення керованості електроприводів дозволяє зменшити електричні втрати, підвищити якість та спрямувати рекуперовану енергію для використання іншими споживачами, і таким чином підвищити ефективність всієї системи.

На сучасному етапі розвитку електротехніки та електромеханіки питання щодо керування електродвигунами не може бути вирішено в повній мірі. Зокрема, головним недоліком цілого ряду перетворювачів є відсутність обмеження пускового струму, що створює небезпечні режими для ключів і двигуна, а також неможливість рекуперації енергії за відсутності інших споживачів при роботі в колі вторинної мережі живлення. Це призводить до створення небезпечних режимів елементів електропривода і збільшення втрат електроенергії в двигуні.

Тому вирішення проблеми покращення характеристик перетворювача в гальмівних перехідних режимах, енергоощадності та забезпечення безпечних режимів роботи тягового двигуна постійного струму шляхом забезпечення оптимального режиму імпульсного електропривода є актуальною задачею сучасної електромеханіки.

2. Мета статті

Метою роботи є отримання оптимальних режимів перетворювача при дослідженні динаміки двигуна постійного струму послідовного збудження з імпульсним регулюванням частоти обертання і визначення можливості спрощення схеми електропривода.

В більшості приводів електродвигуни в основному працюють у перехідних режимах (наприклад в електротранспорті: пуск, гальмування, збільшення та зменшення швидкості), що складає 20-50% загального часу роботи. З аналізу даних КП «Вінницька транспортна компанія» для міста Вінниці, де відстані між зупинками невеликі (50-300 м) часто електропривод працює тільки в перехідних режимах. В таких режимах перенавантажується як двигун, так і перетворювач електропривода. Тому метою даної роботи є дослідження режимів роботи мостового перетворювача для контролю роботи електропривода, що дасть змогу забезпечити зменшення втрат енергії та безпечність роботи як в нормальних та і перехідних режимах.

Розробка математичного апарату для оптимізації імпульсного регулювання ДПС під час гальмування та дослідження його режиму роботи також є актуальним завданням.

6. Виклад основного матеріалу

Задача дослідження імпульсного регулювання при роботі ДПС розглянута в [1, 2]. Оптимізація цієї задачі є важливою при побудові ефективних алгоритмів керування ДПС з високою точністю та швидкодією [3, 5].

Існуючі перетворювачі, що вирішують дану задачу часто не забезпечують умов технологічного процесу в різноманітних режимах. [1-3]. Як правило, вирішення однієї проблеми призводить до появи ряду інших не менш значних проблем, що унеможлиблює використання такого перетворювача в інших галузях.

Базовий перетворювач (Рис. 1) працює в наступному режимі:

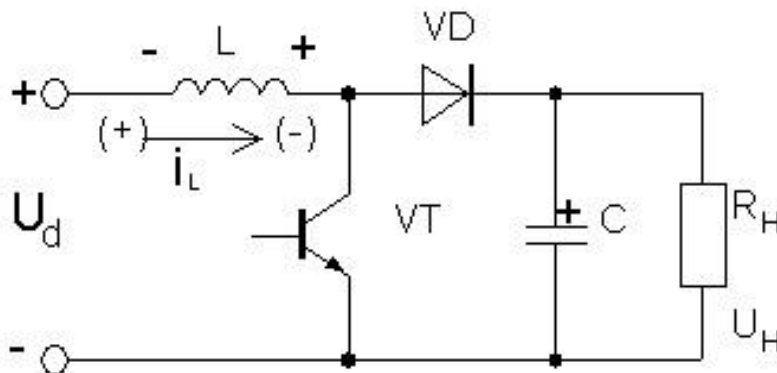
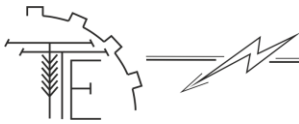


Рис. 1. Схема імпульсного перетворювача

При відпиранні транзистора VT дросель L під'єднується до джерела живлення U_d . Струм у



дроселі зростає і відбувається накопичення енергії. При запиранні транзистора VT відкривається діод VD і конденсатор заряджається від послідовно з'єднаних джерела живлення Ud і дроселя L. На цьому етапі роботи ЕРС самоіндукції дроселя має полярність вказану без дужок (рис.1). Напруга на конденсаторі, а отже і на навантаженні Un більша за напругу джерела живлення ($U_n \geq U_d$). При черговому відпиранні транзистора VT діод VD закривається за рахунок напруги на конденсаторі C, а струм у навантаженні підтримується за рахунок енергії, накопиченої у конденсаторі C. Така схема достатньо неефективна в динамічних режимах.

Пропонується спрощена еквівалентна схема ДПС і мережі під час гальмування (Рис. 2)

На цій схемі ДПС представлений еквівалентною індуктивністю L, опором втрат r_0 і джерелом ЕРС E, яка залежить від типу двигуна і кількості обертів N та розраховується за формулою:

$$E = C_e * N\Phi, \quad (1)$$

де C_e – конструктивний коефіцієнт; Φ – магнітний потік.

Ключ S, і діод VD1 утворюють імпульсний комутатор K, який разом з ДПС створюють перетворювач з підвищенням напруги. В багатьох випадках живлення ДПС здійснюється від мережі змінного струму e_m через випрямляч, VD2 з внутрішнім опором r_i , які щодо мережі M є вторинним джерелом живлення (ВДЖ). При використанні багатофазних випрямлячів і живленні потужних ДПС ємність C на виході випрямляча не встановлюють і тому в простішому випадку мережа та її споживачі можуть бути представлені еквівалентним опором Z_n , а за наявності тільки споживачів – активним опором R_n . Таке спрощення дає змогу також розглянути режим електродинамічного гальмування при виключенні зі схеми ВДЖ.

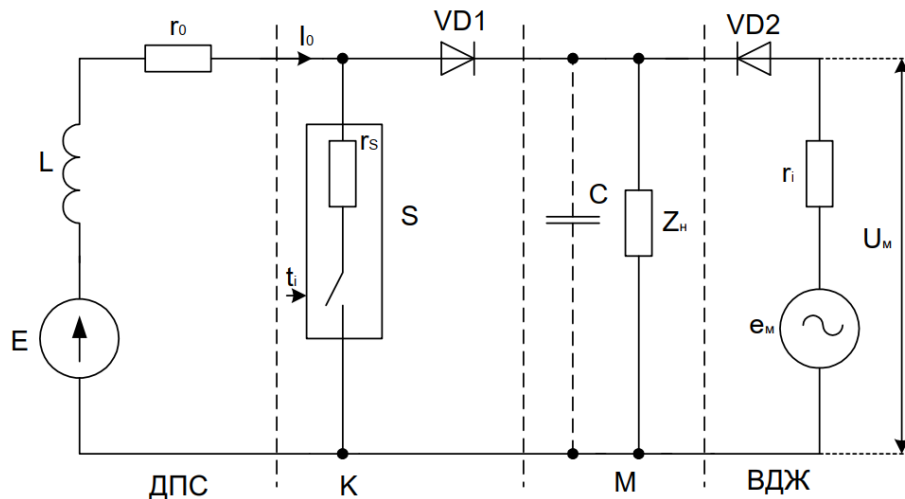


Рис. 2. Еквівалентна схема ДПС і мережі під час гальмування

Потрібне значення струму гальмування I_0 , а відповідно і механічного моменту M_0 встановлюють часом замикання t_i ключа S:

$$i_0(t) = I(0) + I_{mm} e^{\left(\frac{-t_s}{\tau}\right)}, \quad (2)$$

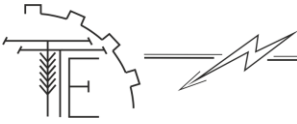
де $I_{mm} = E / (r_0 + r_s)$ – максимальний струм ДПС при фіксованому N; $\tau = L / (r_0 + r_s)$ – еквівалентна стала часу кола «ДПС-ключ».

За умови, що за час регулювання t_i кількість обертів N не змінюється, на обмотках ДПС і ключі втрачається частина енергії W_i та розраховується за формулою:

$$W_i = I_0^2 (r_0 + r_s) t_i = I_0^2 r t_i, \quad (3)$$

де $r = (r_0 + r_s)$ – еквівалентний опір втрат ДПС і ключа.

Під час паузи ключ S розімкнутий і струм I_0 двигуна замикається через опір навантаження R_n . При живленні від ВДЖ за рахунок зростання проти ЕРС індуктивності L діоди випрямляча VD2



зачинені і струм також замикається через опір споживачів R_H . Вважаючи, що внутрішній опір діода VD1 і ключа r_S , приблизно однакові, можна визначити енергію, яку втрачає двигун під час паузи за формулою:

$$W_{\Pi} \approx I_0^2 r t_{\Pi} + I_0^2 R t_{\Pi} = W_{r\Pi} + W_R, \quad (4)$$

де W_{Π} – енергія, яка втрачається на ДПС і ключі VD1.

Ефективність гальмування визначимо максимумом енергії двигуна, яка передається до навантаження, тобто коефіцієнтом рекуперації ЯКИЙ можна визначити за формулою:

$$\eta = W_R / (W_i + W_{r\Pi} + W_R) = R_H t_{\Pi} / (r(t_i + t_{\Pi}) + R_H t_{\Pi}), \quad (5)$$

Максимальному значенню коефіцієнта η відповідає опір навантаження R_H , який значно перебільшує внутрішній опір ДПС, і коли практично вся енергія передається до навантаження.

Але у такому разі різко зростає ЕРС, а відповідно і напруга на навантаженні, що призводить до аварійних режимів для самого ДПС, для систем його керування, споживачів і діодів ВДЖ.

При узгодженні опору ДПС і опору навантаження під час паузи до навантаження передається половина енергії двигуна а саме:

$$W_{r\Pi} = W_R = I^2 r t_{\Pi}, \quad (6)$$

але значення коефіцієнта корисної дії в режимі рекуперації η що можна визначити за формулою:

$$\eta = r t_{\Pi} / (r(t_i + r_{\Pi}) + r t_{\Pi}) = (1 - \gamma) / (2 - \gamma), \quad (7)$$

де $\gamma = t_i / (t_i + t_{\Pi})$ – коефіцієнт заповнення, який не перевищує 0,5 тільки коли ДПС постійно підключений до мережі і її стан не змінюється.

Такому режиму притаманна нестабільність струму гальмування I , за рахунок його поступового спаду. Необхідність підтримки постійним середнього значення струму вимагає здійснювати періодичну комутацію ключа S і коефіцієнт γ вже відрізняється від нуля, а відповідно і коефіцієнт рекуперації η стає меншим, ніж 0,5.

Вирівнювання енергії втрат W_2 і рекуперації WR за період $T=(t_i + t_{\Pi})$ можливо, якщо:

$$\begin{cases} I_0^2 r T = I_0^2 R_H t_{\Pi} = I_0^2 R_H (1 - \gamma) T; \\ R_H = r / (1 - \gamma). \end{cases} \quad (8)$$

Значення коефіцієнта η становить 0,5. Тобто при постійному навантаженні R_H і виборі коефіцієнта заповнення буде

$$\gamma_p = 1 - r / R, \quad (9)$$

та широтно-імпульсній модуляції (ШІМ) можлива передача половини енергії двигуна до інших споживачів. Період T ШІМ визначатиметься часом t_i встановлення необхідного рівня струму I_m гальмування (2). За умови, що стала часу двигуна τ значно більша від тривалості імпульсу та буде виглядати так:

$$i_0(t) \approx I(0) + \Delta I_m t_i / \tau, \quad (10)$$

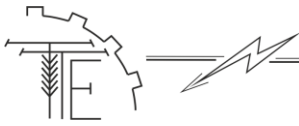
де $\Delta I_m = I_{mm} - I(0)$ – максимальний приріст струму на інтервалі комутації.

Значення приросту струму ΔI визначається за допустимим рівнем пульсації струму гальмування I_0 . Звідси можна визначити тривалість імпульсу t_i :

$$t_i = \tau \Delta I / \Delta I_m, \quad (11)$$

і відповідно період ШІМ, за якого до мережі передається половина енергії ДПС:

$$T_p = t_i / \gamma_p = \frac{\tau (\Delta I / \Delta I_m)}{(1 - r / R)}. \quad (12)$$



Такі умови в практичному випадку важко реалізувати, тому що стан мережі постійно змінюється і для підтримки рівня пульсацій в допустимих межах, необхідно забезпечити тривалість паузи такою, щоб приріст струму ΔI_+ і спад ΔI_- збігалися, інтервал T_1 (рис. 2).

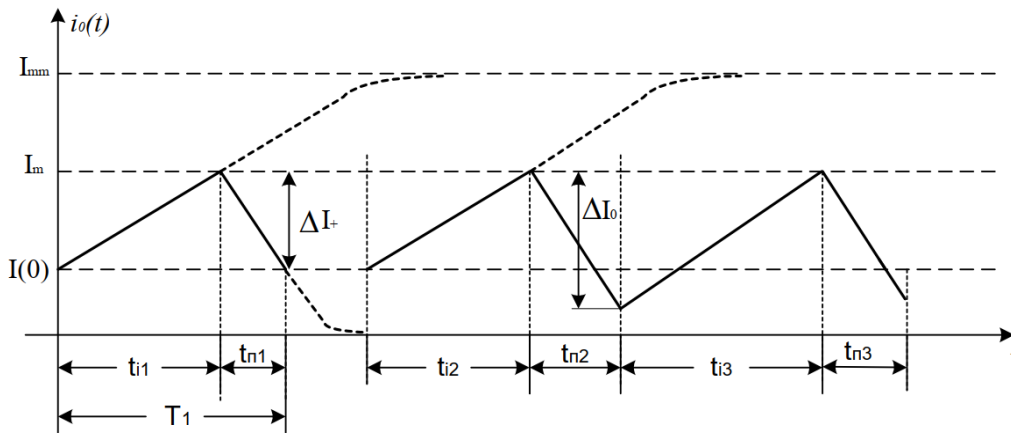


Рис. 3. Зміна струму гальмування при регулюванні з ШІМ

Додатний приріст визначається за виразом

$$\Delta I_+ = I_0(1 + \delta) \approx \Delta I_m t_i / \tau. \quad (13)$$

Від'ємний

$$\Delta I_- = I_0(1 - \delta) \approx \Delta I_m t_{\Pi} / \tau_e, \quad (14)$$

де δ – відносне значення допустимих пульсацій.

Порівнявши прирости і позначивши відносне значення максимального струму гальмування I_{mm} до середнього значення I_0 як коефіцієнт K_i , отримуємо

$$[K_i - (1 - \delta)] t_i / \tau = (1 + \delta) t_{\Pi} / \tau_e \quad (15)$$

Тоді тривалість паузи, за якої частота пульсацій збігатиметься з частотою комутації при фіксованому опорі навантаження, визначимо як

$$t_{\Pi} = t_i \frac{(K_i - 1 + \delta)}{1 + \delta} * \frac{\tau_e}{\tau} \approx t_i (K_i - 1) \frac{\tau_e}{\tau}, \quad (16)$$

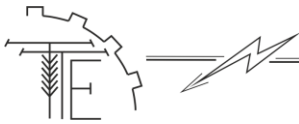
Приблизному співвідношенню відповідає малий рівень пульсацій, $\delta \gg 1$.

Коефіцієнт заповнення γ_i , у такому разі визначатиметься як:

$$\gamma_i = \frac{(1 + \delta)\tau}{(K_i - 1 + \delta)\tau_e + (1 + \delta)\tau} \approx \frac{\tau}{(K_i - 1)\tau_e + \tau} = \frac{R_H + r}{K_i r + R_H}. \quad (17)$$

Як випливає з (16) і (17), час паузи, відповідно і період, а також коефіцієнт заповнення, за якого пульсації за частотою збігаються з частотою комутації і не містять низькочастотної складової, залежать не тільки від опору навантаження, а і від значення струму гальмування I_0 , точніше від співвідношення між ним і максимально можливим струмом I_{mm} , який залежить від кількості обертів N ДПС.

Отже, застосування ШІМ з постійною частотою [1-4] не дає змоги забезпечити оптимальні режими рекуперативного гальмування ні за енергією, що повертається, ні за рівнем пульсацій струму. Використання ЧІМ з постійною тривалістю імпульсу дає змогу зміною часу паузи



оптимізувати цей режим або за пульсаціями, або за енергією, але тільки при фіксованих значеннях обертів N і струму гальмування I_0 , навіть при зміні стану мережі з еквівалентним опором R_H . Тобто для режиму рекуперативного гальмування стаціонарних систем, які працюють з фіксованою швидкістю ЧІМ є доцільнішим способом комутації силового ключа.

Очевидно, що для динамічних транспортних систем, в яких можливі зміни умов руху і стану мережі доцільнішим буде спосіб, за якого здійснюється адаптація часу комутації t_i і часу паузи t_{II} за пульсаціями або за енергією, тобто двопозиційне (релейне) регулювання. Як відомо [5-8], такий спосіб спрощує схему керування, але ускладнює силовий ФНЧ, параметри якого мають визначатись за максимально можливою тривалістю імпульсу комутації і паузи, згідно з (11) і (12) або (11) і (16).

Водночас живлення від вторинної мережі і вартість елементів потужних приводів на перший план ставить задачу створення безпечних режимів їх праці і зменшення габаритів ФНЧ, тому при будь-якому способі регулювання потрібні заходи з контролю напруги у вторинній мережі і компенсації «зайвої» енергії рекуперації. Це стає можливим у разі застосування нарівні з рекуперативним і електродинамічного гальмування, а також проміжного накопичення енергії [8-11] (рис. 4).

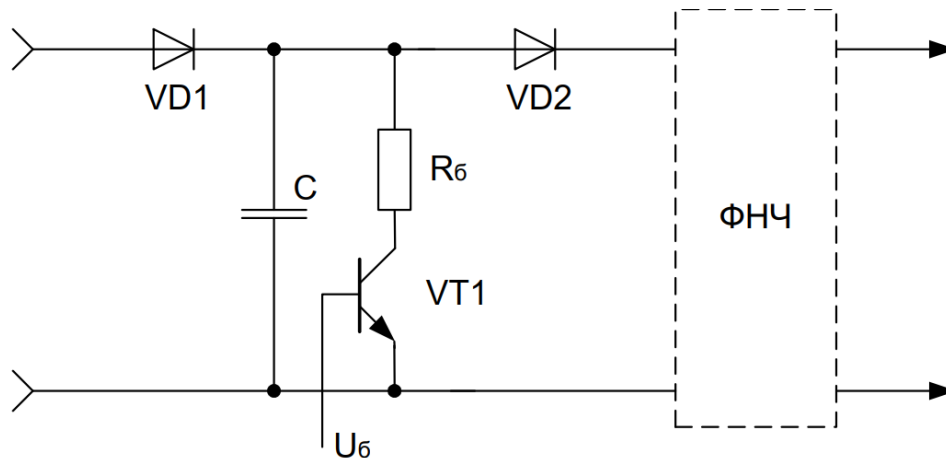


Рис. 4. Схема узгодження ДПС з мережею в режимі гальмування

Під час паузи заряд ємності C здійснюється майже постійним струмом, що зменшує рівень пульсацій і втрат на обмотках. За відсутності інших споживачів, або при великому їх еквівалентному опорі R_H , напруга в мережі зростає приблизно за лінійним законом, а не стрибком, що дає змогу з певною інерційністю її контролювати додатковим ключем VT_2 , який вмикає баластний опір R_6 , при досягненні допустимого значення перенапруг в мережі. «Зайва» енергія двигуна витрачається не тільки на обмотках а і на баластному опорі. За наявності інших споживачів енергія, що накопичена в ємності C , передається до них не тільки під час паузи, а і під час імпульсу, що збільшує кількість поверненої енергії щодо інших способів гальмування, розглянутих раніше. Своєю чергою, накопичення і контроль енергії рекуперації дає змогу застосувати ШІМ з фіксованою частотою, спростити ФНЧ і схему керування.

Відомі системи перетворювачів в яких за рахунок імпульсного керування є можливість реалізувати електродинамічне або рекуперативне гальмування, але проблема зменшення втрат так і залишається не достатньо вирішеною. Поставлена задача вирішується тим, що до складу перетворювача для керування двигуном постійного струму вводяться додаткові елементи: діоди, накопичувач енергії, баластний резистор (рис. 5).

На рис. 1 наведена структурна схема перетворювача для керування двигуном постійного струму в якій використовуються наступні позначення: ЗФ – гладкувальний фільтр, МІ – мостовий інвертор, ДПС – двигун постійного струму, БК – блок керування, НЕ – накопичувач енергії, ЕК – електронний ключ.

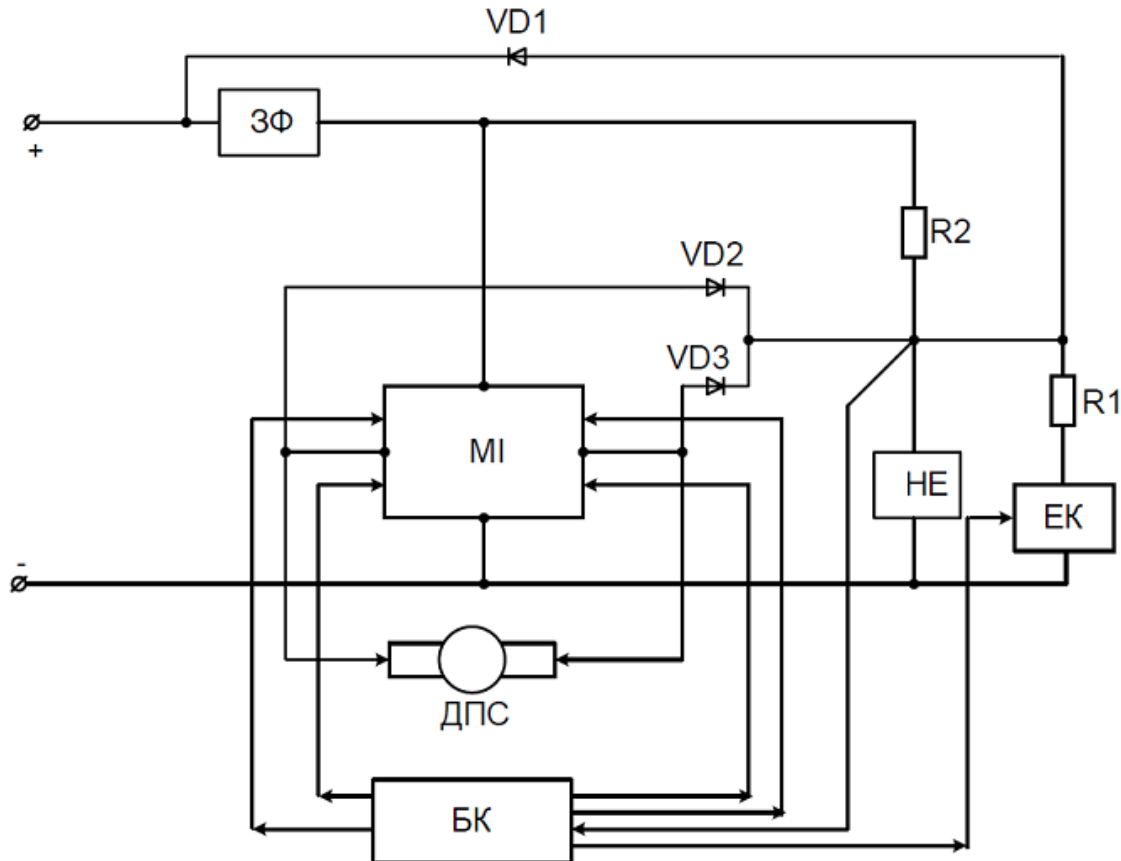
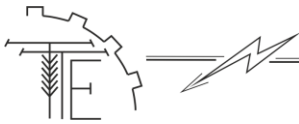


Рис. 5. Структурна схема перетворювача для керування двигуном постійного струму

Робота пристрою побудована наступним чином. Подача живлення переводить пристрій в підготовчий стан. Всі транзистори мостового інвертора і електронний ключ знаходяться у зачиненому стані. Ємності накопичувача енергії заряджуються через допоміжний резистор до напруги U_C близької до напруги живлення перетворювача E . Якщо знехтувати часом встановлення напруги на виході гладку вального фільтру, то час підготовки T_0 , в основному, визначається часом заряду реактивності накопичувача енергії. При ємнісній реалізації

$$T_0 \approx 3R_D * C_{HE}, \quad (18)$$

де R_D – опір допоміжного резистору;

C_{HE} – ємність накопичувача енергії.

Напруга на виході накопичувача енергії контролюється за додатковим входом блоку керування і, коли вона досягає рівня близького до рівня напруги живлення E , формується сигнал, який дозволяє блоку керування перейти до стану пуску.

В стані пуску сигналами з виходів блоку керування відпирається один із «верхніх» транзисторів мостового інвертора, в залежності від напрямку обертання двигуна постійного струму, і електронний ключ. Перший або другий додатковий діод відчиняються і до двигуна постійного струму

прикладається напруга $U_{ДПС}$ [7]:

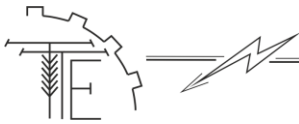
$$U_{ДПС} = E - U_C \approx E \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{R_B * C_{HE}}\right) \right], \quad (19)$$

де R_B – опір баластного резистора;

E – ЕРС двигуна;

U_C – напруга на накопичувачі;

C_{HE} – ємність накопичувача.



У виразі (19) впливом допоміжного резистора можна знехтувати, оскільки його опір R_D має бути значно більшим ніж опір R_B баластного резистору [8]. За рахунок поступового розряду накопичувача електроенергії, напруга що прикладається до двигуна постійного струму зростає повільно, аналогічно зростає і пусковий струм I_p , на відміну від типових рішень, де вона майже миттєво зростає до напруги живлення E , що зумовлює скачок пускового струму до величин:

$$I_{\max} \approx \frac{E}{R_{ДПС}} \quad (20)$$

де $R_{ДПС}$ – активний опір обмоток двигуна постійного струму.

В запропонованому перетворювачі, навіть за відсутності проти е.р.с, величина пускового струму обмежена та не може бути більшою ніж:

$$I_{n\max} < \frac{E}{(R_{ДПС} + R_B)} \quad (21)$$

тобто здійснюється обмеження пускового струму і забезпечується більш безпечний режим роботи двигуна постійного струму і ключів мостового інвертора. Окрім того, обмеження пускового струму можна здійснювати і за рахунок індуктивності обмоток двигуна постійного струму при імпульсному регулюванні відчиненого стану одного з «верхніх» транзисторів мостового інвертора [9].

Після закінченню стану пуску, при досягненні сталого обертання ротору двигуна постійного струму, починається стан робочого ходу. На цьому етапі електронний ключ зачиняється, а після підзаряду ємностей накопичувача енергії, зачиняються додаткові діоди. Регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму та напрямку обертання здійснюється попарною комутацією ключів мостового інвертора за рахунок використання одного із відомих способів імпульсного регулювання. Робочий режим запропонованого перетворювача відрізняється від аналогічного режиму інших приводів тим, що в паузах регулювання, при яких зачиняються всі ключі мостового інвертора, частина струму двигуна постійного струму направляється до накопичувача енергії, і підтримує напругу на його виході близьку до напруги живлення E . У випадку підключення до мережі іншого споживача, що призведе до зменшення напруги мережі, енергія, від накопичувача енергії через діод передається до мережі, тобто в паузі можлива рекуперація енергії і збільшення ККД електроприводу.

Зупинка двигуна постійного струму може бути здійснена плавно за рахунок поступового зменшення часу відкриття ключів мостового інвертора або за рахунок одного із видів електричного гальмування: електродинамічного чи рекуперативного. В будь-якому режимі гальмування «верхні» ключі мостового інвертора зачинені. При електродинамічному гальмуванні від блоку керування на вхід електронного ключа подається сигнал, який відчиняє електронний ключ і струм гальмування протікає через один із додаткових діодів, в залежності від попереднього напрямку обертання, баластний резистор, електронний ключ, спільний провід (другий полюс джерела живлення) і один із «нижніх» зворотних діодів мостового інвертора. При цьому механічна енергія двигуна постійного струму витрачається на баластному резисторі, але такий режим мало ефективний з енергетичної точки зору і в запропонованому перетворювачі, використовується тільки за відсутності в мережі живлення іншого споживача для створення безпечного режиму ключів мостового інвертору, які знаходяться в цей час в закритому стані.

Під час рекуперативного гальмування один із «нижніх» ключів мостового інвертора відчиняється, в залежності від напрямку обертання, за допомогою сигналу з виходу блоку керування. Струм гальмування I_0 зростає в залежності від тривалості відкритого стану ключа t_j , до потрібного значення струму $I_{ДПС}$ [10]:

$$I_{ДПС} \approx I_0 + \left(\frac{E}{R_e} \right) * \exp \left(-t_i * \frac{R_e}{L_e} \right), \quad (22)$$

де R_e – загальний активний опір обмоток, відкритого ключа і «зворотного» діоду;



L_e – еквівалентна індуктивність обмоток двигуна постійного струму.

Після зачинення ключа мостового інвертора, в паузі гальмування t_p за рахунок ЕРС. Відчиняється один з додаткових діодів і здійснюється заряд струмом ІДПС накопичувача енергії, напруга U_{HE} на виході якого зростає. В момент, коли напруга U_{HE} зрівняється з напругою мережі E відчиняється діод і струм гальмування замикається через опір R_H іншого споживача або через внутрішній опір r_i між першим і другим полюсами джерела живлення, тобто здійснюється рекуперація енергії двигуна постійного струму до мережі, а відповідно здійснюється і підвищення ККД. Всього електропривода [11-17]. Якщо опір іншого споживача R_H менший ніж еквівалентний опір двигуна постійного струму та відкритих діодів, тобто до тієї ж мережі підключений більш потужний споживач або внутрішній опір r_i між полюсами джерела живлення значно менший ніж той же еквівалентний опір (при живленні від акумулятора). Гальмування здійснюється практично постійним струмом, як під час відкритого стану ключа t_i , так і під час паузи t_p . Це дозволяє зменшити втрати на обмотках двигуна і здійснити регулювання струму гальмування. Напруга на всіх елементах перетворювача не перевищує напруги живлення, чим забезпечуються безпечні режими їх функціонування.

При живленні мережі від випрямляча, наприклад на електротранспорті, можлива ситуація коли до полюсів джерела одночасно з перетворювачем підключений менш потужний споживач або він взагалі відсутній, то R_H значно більше R_e . Тоді під час паузи гальмування, за відсутності контролю, напруга ΔU рекуперації на полюсах джерела живлення досягла б великих значень:

$$\Delta U \approx I_{ДПС} * R_H \gg E, \quad (23)$$

що призвело б до неприпустимих величин напруг на елементах перетворювача і випрямляча мережі, а також до спаду струму гальмування. Це робить неможливим режим рекуперації під час гальмування.

Запропонована система була промодельована в пакеті прикладних програм Simulink результати моделювання наведені на рисунку 6 [16].

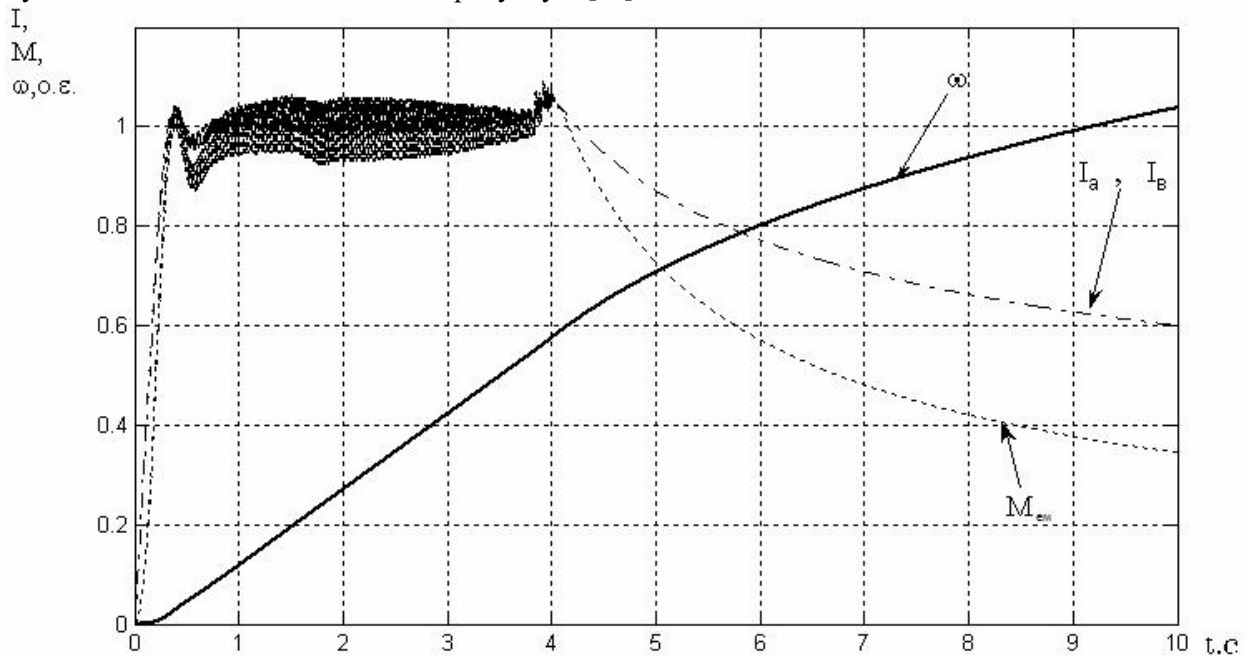


Рис. 6. – Результати дослідження імпульсної схеми регулювання частоти обертання двигуна постійного струму

6. Обґрунтування результатів

Проведене моделювання створює передумови реалізації такого схемного рішення, яке дозволить піти від використання додаткових незалежних джерел струму для обмотки збудження



тягового електродвигуна (при переході з режиму руху під струмом в режим електродинамічного гальмування). Це підвищить ефективність використання електричної енергії і знизить витрати на експлуатацію та ремонт незалежного джерела струму [19].

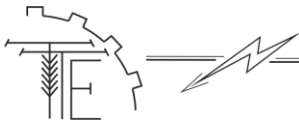
В запропонованому перетворювачі, при досягненні напруги УНЕ на виході накопичувача енергії максимально допустимого значення E_M , сигналом за додатковим входом блоку керування формується сигнал відкриття електронного ключа і напруга УНЕ починає зменшуватись, за рахунок розряду накопичувача енергії через баластний резистор. Під час паузи, струм гальмування підтримується близьким до сталого за рахунок підзарядки накопичувача енергії і відгалуження на баластний резистор і до мережі. Якщо напруга УНЕ стане меншою напруги живлення E діод D закривається, рекуперативна складова струму зникає. Напруга УНЕ також буде зменшуватись за рахунок розряду накопичувача енергії через баластний резистор і коли вона досягне мінімально допустимого значення E_m сигналом за додатковим входом блоку керування сформується сигнал, який зачиняє електронний ключ. З цього моменту струмом гальмування здійснюється зарядка накопичувача енергії, напруга УНЕ на його виході зростає, і знову відчиняється діод та здійснюється рекуперация. В момент, коли УНЕ досягає максимально допустимого значення E_M , відчиняється електронний ключ і процеси повторюються. Таким чином здійснюється підвищення ККД всього електропривода.

5. Висновки та пропозиції

1. Оптимізація динамічних режимів двигуна постійного струму, зокрема при використанні широтно-імпульсної модуляції є можливою при введенні додаткового накопичувача енергії.
2. Введення додаткових діодів, допоміжного і баластного резисторів дозволяють плавно регулювати і обмежувати пусковий струм.
3. Реалізація схеми дозволяє зменшити втрати на обмотках двигуна постійного струму і забезпечити безпечні режими експлуатації елементів електроприводу.
4. За рахунок того, що напруга на елементах перетворювача контролюється додатковим входом блоку керування і ніколи не перевищує максимально допустимих значень.
5. Важливим результатом дослідження є можливість додаткового споживання електричної енергії в гальмівних режимах.
6. Ефективність запропонованих заходів була експериментально підтверджена при керуванні і гальмуванні тяговим електроприводом.

Список літератури

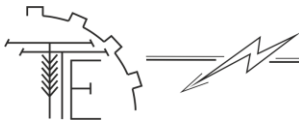
1. Бурлака В. В., Гулаков С. В., Поднебенна С. К. Удосконалення схемних рішення частотно-регульованого електропривода. *Університетська наука – 2019* : тези доп. Міжнар. науково-техн. конф., 16-17 травня 2019 р.: в 4 т. ДВНЗ «ПДТУ» :Маріуполь, 2019. Т. 1. С. 247–248.
2. Брускин Д. З., Зорохович А. Е., Хвостов В. С., Электрические машины и микромашины : Учебник 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1990. 528 с.
3. Видмиш А. А., Трошин О. І. Теорія електропривода. Вінниця: УНІВЕРСУМ. Вінниця, 2003. 135 с.
4. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. М.: Учитель и ученик, КОРОНА принт, 2002 г. 304 стр.
5. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК СПб.: КОРОНА принт, 2003. 256 с.
6. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. СПб.: КОРОНА принт, 2001. 320 с.
7. Глазенко Т. А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока Ленинград : Энергия, 1973. 304 с.
8. Гольц М. Е., Гудзенко А. Б., Остреров В. М. Быстродействующие электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями. Москва : Энергоатомиздат, 1986 184 с.
9. Андриенко П. Д., Каплиенко А. О., Шило С. И., Немудрый И. Ю. Исследование режимов торможения в системе импульсного регулирования серийного электродвигателя. *Електротехніка та електроенергетика*. 2007. №2. С. 11–14.



10. Метельський В. П. Електричні машини та мікромашини. Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. 616 с.
11. Мокін Б. І., Мокін В. Б., Мокін О. Б. Математичні методи ідентифікації динамічних систем: навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2010. 260 с.
12. Пегов Д. В., Бурцев П. В., Андреев В. Е. Руководство по устройству электропоездов ЭТ2, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭТ2М. Москва: Центр коммерческих разработок, 2003. 184 с.
13. Перльмутер В. М., Сидоренко В. А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
14. Спосіб гальмування двигуна постійного струму та пристрій для його реалізації : пат. 47111А Україна : МКІ Н02 Р3/08; Дрючин О. О. № 2001045382; заявл. 27.07.2001 ; опубл. 17.06.2002, Бюл. №6.
15. Бородій В. А., Нестерова О. Ю. Компенсація різко-змінного струму якоря потужних синхронних приводів засобами автоматичної системи збудження із нестандартним алгоритмом керування. *Науковий журнал*. 2018. №1. С. 72–80.
16. Видмиш А. А., Бабій С. М., Петрусь В. В.. Теорія електропривода. (Курсове та дипломне проектування. Самостійна та індивідуальна робота студентів). Вінниця: ВНТУ, 2012. 96 с.
17. Казачковский Н. Н. Сопоставление законов частотного управления на примере преобразователя частоты ALTIVAR 21. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2018. №100. С. 69–72.
18. Aspalli M., Asha R., Hunagund P. Three phase induction motor drive using IGBTs and constant V/F method. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2012. №1. С. 463–469.
19. Bondar R. P., Podoltsev A. D. Complex model with frequency dependent parameters for electrodynamic shaker characteristics. *Technical electrodynamicics*. 2017. №1. С. 44–51. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2017.01.044>.

References

- [1] Burlaka, V. V., Hulakov, S. V., Podnebenna, S. K. (2019). Udoskonalennia skhemnykh rishennia chastotno-rehulovanoho elektropryvoda. *Universytetska nauka : tezy dop. Mizhnar. naukovo-tekhn. konf.*, (pp. 247–248). Mariupol. [in Ukrainian].
- [2] Bruskin, D. Z., Zorokhovich, A. E., Khvostov, V. S. (1990). *E`lektricheskie mashiny` i mikromashiny`* (3th ed). M.: Vy`ssh. shk. [in Russia].
- [3] Vydmysh, A. A., Troshyn, O. I. (2003). *Teoriia elektropryvoda*. Vinnytsia: UNIVERSUM. [in Ukrainian].
- [4] Herman-Halkyn, S. H. (2002). *Sylovaia elektronika: Laboratornye raboty na PK*. M.: Uchitel` i uchenik. [in Russia].
- [5] Herman-Halkyn, S. H., Kardonov, H. A. (2003). *Elektrycheskiye mashyny: Laboratornye raboty na PK*. SPb.: KORONA print [in Russia].
- [6] Herman-Halkyn S. H. (2001). *Kompiuternoe modelyrovanye poluprovodnykovykh system v MATLAB 6.0*. SPb.: KORONA print. [in Russia].
- [7] Hlazenko, T. A. (1973). *Poluprovodnykovye preobrazovateli v elektropryvodakh postoiannoho toka*. Leningrad : E`nergiya. [in Russia].
- [8] Holts, M. E., Hudzenko, A. B., Ostrerov, V. M. (1986). *Bystrodeistvuiushchye elektropryvody postoiannoho toka s shyrotno-ypulsnyimi preobrazovateliami*. Moskva : E`nergoatomizdat. [in Russia].
- [9] Andryenko, P. D., Kaplyenko, A. O., Shylo, S. Y, Nemudryi, Y. Yu. (2007). Yssledovanye rezhymov tormozheniya v systeme ympulsnoho rehulyrovaniya seryesnoho elektrodvyhatelia. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2, 11-14. [in Russia].
- [10] Metelskyi, V. P. (2005). *Elektrychni mashyny ta mikromashyny*. Zaporizhzhia : ZNTU. [in Ukrainian].
- [11] Mokin, B. I., Mokin, V. B., Mokin, O. B. (2010). *Matematychni metody identyfikatsii dynamichnykh system*. VNTU : Vi`nnytsya [in Ukrainian].
- [12] Pehov, D. V., Burtsev, P. V., Andreev, V. E. (2003). *Rukovodstvo po ustroystvu elektropoezdov ЭТ2, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭТ2М*. Moscow. Center for Commercial Development. [in Russia].
- [13] Perlmuter, V. M., Sydorenko, V. A. (1988). *Sistemy upravleniya tyristornymi elektropryvodami postoiannoho toka*. M.: E`nergoatomizdat. [in Russia].
- [14] Dryuchin, O. O. (2002). Sposib halmuvannia dvyhuna postiinoho strumu ta prystrii dlia yoho realizatsii pat 47111A MKI N02 RZ/08; Ukrainian. [in Ukrainian].
- [15] Borodij, V. A., Nesterova, O. Yu. (2018). Kompensaciya rizko-zminnogo strumu yakorya potuzhnykh



- синхронних приводів засобами автоматичної системи збудження із нестандартним алгоритмом керування. *Naukovij zhurnal*, 1, 72–80. [in Ukrainian].
- [16] Vydmysh, A. A., Babii, S. M., Petrus, V. V. (2012). *Teoriia elektropryvoda. Samostiina ta individualna robota studentiv*. Vinnytsia: VNTU. [in Ukrainian].
- [17] Kazachkovskij, N. N. (2018). Sopotavlenie zakonov chastotnogo upravleniya na primere preobrazovatelya chastoty ALTIVAR 21. *Girnicha elektromehanika ta avtomatika*, 100, 69–72. [in Russia].
- [18] Aspalli, M., Asha, R., Hunagund, P. (2012). Three phase induction motor drive using IGBTs and constant V/F method. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 1, 463–469. [in English].
- [19] Bondar, R. P., Podoltsev, A. D. (2017). Complex model with frequency dependent parameters for electrodynamic shaker characteristics. *Technical electrodynamics*, 1, 44–51. doi: 10.15407/techned2017.01.044. [in English].

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ТОРМОЗНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотрены условия оптимизации характеристик преобразователя для тормозных режимов двигателя постоянного тока. При торможении обеспечивается минимизация уровня пульсаций тока при использовании различных способов регулирования тока.

Решение проблем эффективного использования тягового двигателя постоянного тока и создания безопасных режимов его работы посредством обеспечения оптимального режима.

Введение в схемы дополнительных элементов позволяет снизить скорость затухания тока в тормозных обмотках.

Существенным преимуществом предлагаемой модернизации схем, заключается во введении в схему диодов, что позволит использовать самовозбуждения электродвигателя для электрического торможения.

Предложенное решение позволяет упростить техническую реализацию и уменьшить расходы из-за отсутствия дополнительного независимого источника питания тормозных обмоток.

Существенным фактором повышения рентабельности работы электротранспорта в целом может быть замена существующего тягового электропривода (ТЭП) на более современные их виды.

Разработаны имитационные модели, которые позволяют исследовать электромеханические процессы в серийном двигателе постоянного тока.

Введение в схему импульсного регулятора диода, который шунтирует обмотку возбуждения, позволяет снизить скорость затухания тока в этой обмотке.

Предложенная модернизация схемы заключается во введении в схему диодов, накопителя энергии, что позволяет использовать тормозные режимы при самовозбуждении электродвигателя и избежать применения дополнительных независимых источников тока.

Ключевые слова: оптимизация, импульсное регулирование, двигатель постоянного тока, мостовой преобразователь, электропривод, управление двигателем постоянного тока, переходной режим.

Рис. 6. Лит. 19.

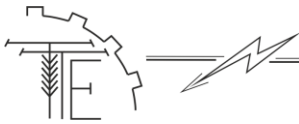
OPTIMIZATION OF THE CONVERTER CHARACTERISTICS IN BRAKING TRANSITION MODES OF TRACTION ENGINE

Described conditions of converter optimization for DC engine braking modes. Braking minimizes the level of current ripple when using various methods of current regulation.

Solving problems of efficient use of a DC traction engine and create safe modes of operation by ensuring optimal mode.

The introduction of additional elements in the scheme allows to reduce the rate of attenuation of the current in the brake coils.

A significant advantage of the proposed circuit modernization is the introduction of diodes in the circuit, which will allow the use of self-excitation of the electric motor for electrical braking.



The proposed solution simplifies the technical implementation and reduces costs due to the lack of an additional independent power source for the brake coils.

A significant factor in increasing the profitability of electric transport in general may be the replacement of an existing traction electric drive (TEP) with their more modern types.

Simulation models have been developed to allow the study of electromechanical processes in a serial DC engine.

Introduction to the circuit of a pulsed regulator diode, which shunts the excitation winding, reduces the rate of attenuation of the current in this winding.

The proposed modernization of the circuit is to introduce into the circuit the diodes, an energy storage, which allows the use of brake modes for self-excitation of the motor and to avoid the use of additional independent sources of current.

Key words: optimization, pulse control, DC engine, bridge converter, electrical drive, DC engine control, transient mode..

Fig. 6. Ref. 19.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Видмиш Андрій Андрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: andrijvydmysh1966@gmail.com).

Возняк Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: alex.voz1966@gmail.com).

Видмыш Андрей Андреевич - кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетики, электротехники и электромеханики» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, email: andrijvydmysh1966@gmail.com).

Возняк Александр Николаевич - кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетики, электротехники и электромеханики» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, email: alex.voz1966@gmail.com).

Vidmysh Andriy - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyschna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, email: andrijvydmysh1966@gmail.com).

Voznyak Olexandr - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyschna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, email: alex.voz1966@gmail.com).