

УДК 621.314.5:681.5:621.313.3

канд. техн. наук, доцент, докторант Д. О. Кулагін
Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна

Дослідження електромагнітних процесів самозбудження асинхронного тягового двигуна при рекуперативному гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності

В статті проведено визначення функцій електромагнітних процесів самозбудження асинхронного тягового двигуна при рекуперативному гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності. Проведене дослідження виконано в загальному вигляді, що дозволяє використовувати його результати для асинхронних тягових електроприводів різних серій.

Ключові слова: *самозбудження, перехідні процеси, асинхронний двигун, намагнічування, математична модель.*

Вступ. Важливою складовою побудови раціональної структури системи електроживлення автономного рухомого об'єкта є можливість здійснення рекуперації енергії під час гальмування або руху на вибігу. Даним питанням присвячено значне число робіт, проте на сьогодні не впроваджено в практику будівництва автономного рухомого складу залізниць жодної конструкції з можливістю рекуперації [1]. В системах тягових електроприводів електромобілів практичне впровадження рекуперації знаходиться на більш високому рівні, проте значна кількість дослідників відмічає відсутність раціональних структур електроприводів з можливістю здійснення рекуперації. Значний внесок в розгляд питання побудови автономних електромеханічних систем зроблено авторами робіт [2-5], де наведено основні наукові та практичні результати відділу електромеханічних систем ІЕД НАНУ, пов'язані з розробкою математичних моделей і методик розрахунку режимів асинхронних генераторів, їх експериментальними та розрахунковими дослідженнями, мікропроцесорних систем керування для автономних зварювальних мультисистем, асинхронних двигунів, машинно-вентильних комплексів на їх основі та електричних машин з постійними магнітами і вентильно-індукторних машин.

Практики та виробничники пояснюють це передусім відсутністю раціональної структури таких тягових електроприводів, недостатньою вивченістю цілої низки проблем, серед яких,

зокрема, задача самозбудження тягової асинхронної машини в гальмівному режимі при використанні рекуперації [1, 2, 4]. Проведені значні експериментальні дослідження [6] даного питання показали, що в більшості гальмівних режимів збудження асинхронної тягової машини забезпечується за рахунок енергії, накопиченої між фазами і додаткового живлення фаз від конденсаторного фільтра перетворювача частоти. Однак, залишається незрозумілим, чи в усіх усталених режимах подібне збудження є достатнім без живлення асинхронної тягової машини від синхронного генератора через випрямляч. Відповідно до висновку [6] в перехідних режимах, зокрема після ввімкнення гальмівного режиму після руху на вибігу або після тягового режиму, живлення від синхронного генератора може бути необхідним. Тому дане питання потребує значного поетапного опрацювання. На першому етапі вивчення даного питання необхідним є визначення функцій електромагнітних процесів самозбудження асинхронного тягового двигуна при рекуперативному гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності. Даному питанню і буде присвячено дану роботу.

Мета роботи – визначення математичного опису електромагнітних процесів самозбудження асинхронного тягового двигуна при рекуперативному гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності.

Матеріали дослідження. Для досягнення мети електромагнітні процеси будуть розглянуті на основі схеми тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02, до складу якої входять:

- дизельний двигун, що є первинним джерелом енергії;
- синхронний генератор; тяговий перетворювач частоти; тяговий двигун; перетворювач власних потреб;
- перетворювальні пристрої для забезпечення процесу заряд-розряд накопичувального елемента (питання вибору типу накопичувача в статті не розглядається – накопичувач замінено еквівалентною ємністю);
- система керування, що забезпечує узгоджену роботу всіх вузлів відповідно до оптимального режиму функціонування кожного з них, причому забезпечуючи найбільш раціональне споживання енергоресурсів кожним вузлом тягової електропередачі за даних умов експлуатації та при встановленому тяговому режимі моторвагонного поїзда. Формування встановлених тягових характеристик поїзда шляхом узгодженої рекуперації та споживання енергії від накопичувального елемента тягової електропередачі також є задачею системи керування [7-9].

При цьому накопичувач енергії в поєднанні з перетворювальною системою, що забезпечує його роботу, повинен в комбінації з основними елементами тягової

електропередачі забезпечувати вказані вимоги до електропередачі поїзда в усіх наступних режимах експлуатації:

- холостого ходу, при котрому відсутній обмін енергією між окремими компонентами передачі;
- тяги з одночасною передачею енергії від ланки дизель – синхронний генератор та ланки накопичувача енергії на приводні колеса через тяговий перетворювач частоти;
- тяги з використанням енергії тільки від ланки дизель – синхронний генератор на приводні колеса через тяговий перетворювач частоти, а в разі надлишку енергії - одночасної передачі надлишкової енергії до ланки накопичувача енергії для послідуєчого її використання за можливості;
- вибігу з одночасним зарядом накопичувача енергії;
- рекуперативного гальмування з одночасним переводом дизеля в режим холостого ходу [8].

Тягова електропередача візка дизель-поїзда ДЕЛ-02, представлена функціональною схемою рис. 1 і складається з дизеля Д, двохобмоточного синхронного генератора СГ, некерованих випрямлячів НВ, до кожного з яких підключено гальмівний резистор ГР, блок фільтрів БФ, автономний інвертор напруги АІН, давач швидкості ДШ.

Окрім того, в каналі керування АІН міститься комплексний пристрій автоматики КПА, до якого входять сигнали зворотного зв'язку за швидкістю і фазним струмом з АД, сигнал давача завантаження дизеля ДЗД.

Керуючий сигнал U_{KM} від комп'ютера машиніста КМ діє на рівень подачі палива паливним насосом ПН до дизеля Д. Відповідно до швидкості обертання колінчатого вала дизеля ДЗД, що механічно зв'язаний з дизелем, формує сигнал про завантаженість дизеля на рівні від 0 до 5 В, який подається до КПА. Відповідні сигнали зворотних та керуючих зв'язків КПА для другого АД візка на схемі для спрощення не показано.

Схема містить блок керування струмом збудження БКСЗ, що задає струм збудження $i_{zб}$ для СГ. Перетворювач для забезпечення власних потреб ПВП (навантаження власних потреб НВП включає в себе опалення вагонів, освітлення, підігрів води, системи пожежогасіння та сигналізації, кондиціонування, паливопідігрівачі та ін.) підключено до загальної шини постійного струму візка.

На рис. 1 пунктирною лінією виділено тяговий перетворювач частоти та його система автоматичного керування (САК), перетворювач власних потреб ПВП та систему давачів.

Сигнали, що входять до КПА обробляються за певними законами в залежності від режиму роботи дизель-поїзда і подаються на регулятори швидкості та струму, які вбудовані до КПА.

де U_m – амплітуда напруги синхронного генератора; α_0 – кут керування випрямлячем, який відповідає початку рекуперації; n – порядковий номер інтервалу дискретності функції напруги; t_1 – змінна координата часу в межах інтервалу дискретності $0 < t_1 < T$; T – тривалість інтервалу дискретності; x – коефіцієнт, який характеризує початкову фазу напруги $1 \leq x \leq 2$; ϖ – відносна частота зміни напруги від одного інтервалу дискретності до іншого.

Відносна частота зміни напруги ϖ залежить від крутизни зміни сигналу керування випрямлячем λ та характеризує дискретне прирощення кута керування $\Delta\alpha$ в інтервалі дискретності.

Для випрямляча з роздільним керуванням, виконаного за мостовою схемою (найчастіше використовуються в системах автономного живлення транспортних об'єктів) мають місце наступні співвідношення [6, 9]:

$$\varpi = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{\lambda}{\lambda - 1}, \quad (2)$$

$$T = \frac{\pi}{3\omega} \cdot \frac{1}{\lambda - 1}, \quad (3)$$

З урахуванням виразу (1) маємо функцію струму в ланці постійного струму:

$$i_d(t) = \pm \left(\frac{U_m}{Z} \sin \left(\omega t_1 + \varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3} x + \varphi \right) - \frac{U_{c0}}{R_d} - \frac{k_t I_{1d}}{C_\phi R_d} (t - T_d) + A_1 e^{-\frac{t}{T_d}} \right), \quad (4)$$

де $Z = \sqrt{R_d^2 + (\omega \cdot L_d)^2}$, а величини R_d та L_d є сталими параметрами ланки перетворювача;

$\varphi = \arctg(-\omega \cdot T_d)$; A_1 – постійна інтегрування.

Завдання напруги $U_1(t)$ у вигляді гратчастої функції (1) дозволяє знайти рішення виразу (4) у вигляді різницевого рівняння. Для знаходження різницевого рівняння скористаємось граничними значеннями для n -го інтервалу дискретності:

на першому інтервалі дискретності

$$\begin{cases} t = nT; \\ t_1 = 0; \\ i_d(t) = i_d[n], \end{cases} \quad (5)$$

на другому інтервалі дискретності

$$\begin{cases} t = (n+1)T; \\ t_1 = T; \\ i_d(t) = i_d[n+1]. \end{cases} \quad (6)$$

З урахуванням системи (5) знаходимо з виразу (4) постійну інтегрування A_1 .

Вирішуючи рівняння (4) з урахуванням системи (6), отримуємо різницеве рівняння першого порядку

$$i_d[n+1] - i_d[n]e^{-\frac{T}{T_d}} = \left(\frac{U_m}{Z} \left[\sin\left(\omega T + \varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3}x + \varphi\right) - \sin\left(\varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3}x + \varphi\right)e^{-\frac{T}{T_d}} \right] - \frac{U_{c0}}{R_d} \left(1 - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) - \frac{k_i I_{1a}}{C_\phi R_d} \left[(nT - T_d) \left(1 - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) + T \right] \right). \quad (7)$$

Застосовуючи до виразу (7) пряме дискретне перетворення Лапласа (динамічні процеси в дискретних системах керування описуються рівняннями в кінцевих різницях, для яких зручним методом вирішення є операційний метод, заснований на дискретному перетворенні Лапласа, яке є узагальненням звичайного перетворення Лапласа на дискретні функції, при тому що багатьом співвідношенням і операціям над оригіналами відповідають простіші співвідношення над їх зображеннями), отримуємо алгебраїчне рівняння відносно шуканої ступінчатої функції струму $i_d^*(q)$

$$i_d^*(q) = \frac{e^q}{e^q - e^{-\frac{T}{T_d}}} i_d[0] + \frac{U_m}{\left(e^q - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) Z} D\{A_2\} - \frac{e^q U_{c0}}{R_d \left(e^q - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) (e^q - 1)} \left(1 - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) - \frac{k_i I_{1a}}{C_\phi R_d} \cdot \frac{e^q \left(1 - e^{-\frac{T}{T_d}}\right)}{\left(e^q - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) (e^q - 1)} - \frac{k_i I_{1a}}{C_\phi R_d} \cdot \frac{e^q \left(T - T_d \left(1 - e^{-\frac{T}{T_d}}\right)\right)}{\left(e^q - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) (e^q - 1)}, \quad (8)$$

де $i_d[0]$ – початкове значення струму випрямляча для відповідної фази рекуперації на етапі початку рекуперації; q – абсциса ступінчастості величини струму; $D\{A_2\}$ – операція диференціювання за часом виразу

$$A_2 = \sin\left(\omega T + \varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3}x + \varphi\right) - \sin\left(\varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3}x + \varphi\right)e^{-\frac{T}{T_d}}.$$

Використовуючи в подальшому основні теореми, таблиці відповідності, а також зворотне перетворення Лапласа, знаходимо гратчасту функцію струму у режимі рекуперації:

$$i_d[n] - i_d[0]e^{-\frac{Tn}{T_d}} = \frac{U_m}{Z} \sum_{m=0}^{n-1} A_2 e^{-\frac{T}{T_d}(n-m-1)} - \frac{U_{c0}}{R_d} \left(1 - e^{-\frac{Tn}{T_d}}\right) - \frac{k_i I_{1a}}{C_\phi R_d} \cdot \left(T_d \left(1 - e^{-\frac{Tn}{T_d}}\right) - Tn\right). \quad (9)$$

Активний опір фільтра, як правило, має мале значення, а в перетворювачах потужністю більш 40 кВА значення T_d лежить у межах 0.1 – 0.3 с, тому величиною R_d можна знехтувати. Вважаючи $R_d = 0$, отримуємо різницеве рівняння у більш зручному для аналізу вигляді

$$i_d[n+1] - i_d[n] = \frac{2U_m}{\omega L_d} \sin \frac{\omega T}{2} \sin \left(\frac{\omega T}{2} + \varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3} x \right) - \frac{U_{c0}}{L_d} T - \frac{k_i I_{1a}}{2C_\phi L_d} (2n+1) T^2, \quad (10)$$

так як тяговий інвертор в режимі рекуперації вмикається майже безінерційно на заданий кут $\alpha > 90^\circ$, $\alpha = 180 - \beta$.

Для першої різниці струму $\omega T = \frac{\pi}{3}$, $\varpi n = 0$ з системи (6) отримаємо наступне:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta i[1]}{T} &= \frac{i_d[1] - i_d[0]}{T} = \frac{2U_m}{\omega L_d} \sin \frac{\omega T}{2} \sin \left(\frac{\omega T}{2} + \pi - \beta + \frac{\pi}{3} x \right) - \\ & - \frac{U_{c0}}{L_d} - \frac{k_i I_{1a} T}{2C_\phi L_d} = \frac{1}{L_d} \left(U_{d0} \cos \beta - U_{c0} - \frac{I_{1a} \pi}{6C_\phi \omega} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Вважаючи, що $\Delta i[1] = I_{1am}$ з останнього виразу отримаємо умову, за виконання якої забезпечується максимальний темп рекуперативного гальмування

$$I_{1am} = \frac{U_{d0} \cos \beta - U_{c0}}{6\omega L_d C_\phi + \pi T} \cdot 6T\omega C_\phi. \quad (12)$$

Так як при рекуперації в системі тягового автономного інвертора напруги завдання на зміну частоти визначається сигналом завдання на струм рекуперації та при зміні частоти забезпечується підтримка встановленого закону керування (наприклад закону Костенко), тоді напруга та конденсаторі у замкнутій системі регулювання завжди буде знаходитись у жорсткій відповідності до напруги інвертування. Тоді можна вважати, що $i_d[n] = k_i I_{1a}$, а з урахуванням викладеного, маємо струм рекуперації при гальмуванні:

$$i_d[n] = \frac{2C_\phi L_d}{2C_\phi L_d + T^2 n^2} \left(i_d[0] - \frac{2U_m}{\omega L_d} \sin \frac{\omega T}{2} \sin \left(\frac{\omega T}{2} + \varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3} x \right) - \frac{U_{c0}}{L_d} T n \right). \quad (13)$$

Таким чином, у замкнутій системі регулювання струм рекуперації визначається: величиною кута регулювання ϖn (крутизною λ), початковою напругою на конденсаторі та параметрами фільтра.

Можливість підтримки реактивної складової статорного струму тягового асинхронного двигуна на даній частоті шляхом живлення від системи живлення рухомого електротехнічного комплексу (від синхронного генератора через тяговий випрямляч) забезпечує надійне збудження асинхронного двигуна в генераторному режимі та, як наслідок, стабільне гальмування електротехнічного комплексу, яке відбувається шляхом зміни співвідношення між частотою струму статора та ротора двигуна, що дозволяє забезпечити від'ємну величину ковзання. Зміною величини ковзання та струму додаткового живлення двигуна від випрямляча, використовуючи регулювання інвертором, регулюють величину ЕРС асинхронного двигуна та, як наслідок, потужність гальмування на даній

швидкості. Однак все це має місце лише на високих швидкостях руху. По мірі зменшення швидкості обертання ротора в процесі гальмування величина ЕРС стає меншою напруги синхронного генератора. При цьому гальмівний резистор буде споживати струм від випрямляча, заданий виразом (4), що є проблемою з огляду на неприпустимість даного процесу. Для запобігання підживлення гальмівного резистора необхідно відключити ланку постійного струму від синхронного генератора шляхом запирання випрямляча. При цьому джерелом реактивної потужності в системі може бути тільки конденсатор накопичувальної системи. Але, в цьому разі повстає проблема конденсаторного збудження тягового двигуна. Величина ємності накопичувальної системи електротехнічного комплексу повинна забезпечувати самозбудження асинхронної машини в режимі рекуперативного гальмування.

Умовою забезпечення стійкого самозбудження тягового двигуна є розміщення вольт-амперної характеристики конденсаторів накопичувальної системи нижче від кривої холостого ходу асинхронної машини. Пояснимо дане міркування за допомогою рис. 2 [1].

На рис. 2 крива $0ACE$ являє собою криву холостого ходу тягової асинхронної машини, а лінія $0BCD$ є вольт-амперною характеристикою. На кривій $0ACE$ ділянка $0AC$ відповідає процесу стійкого самозбудження, яке припиняється після точки C . Надалі машина знаходиться у збудженому стані.

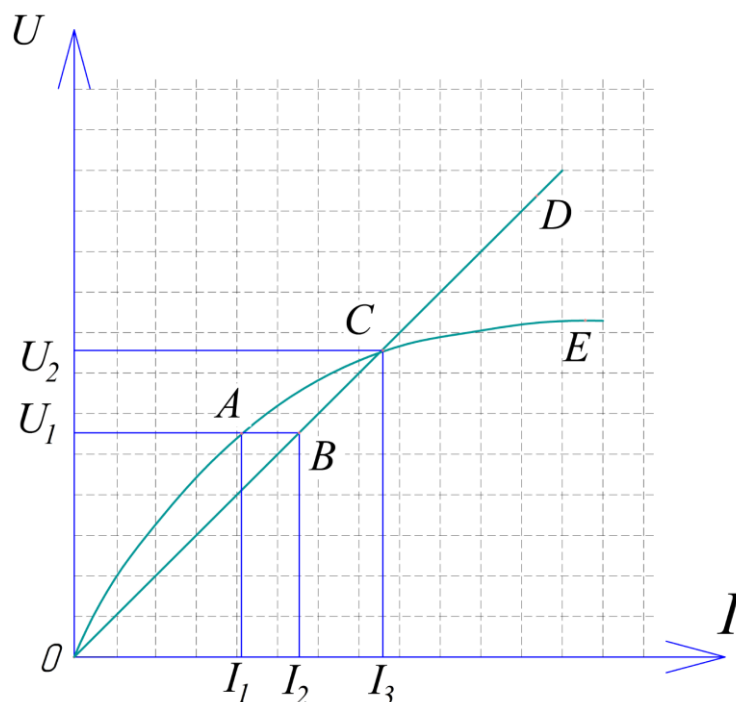


Рис. 2. Графічна інтерпретація умови стійкого самозбудження тягового двигуна від накопичувальної системи

Розглянемо довільну точку роботи тягового двигуна – A , та відповідну робочу точку конденсаторної установки – B . Струм, який споживає тягова машина при одній і тій самій

напрузі є меншим від струму, що його може забезпечувати накопичувальна установка, тобто доки виконується умова

$$I_1 < I_2 \quad (14)$$

в позначеннях, прийнятих на рис. 2, доти забезпечується стійке самозбудження тягового двигуна за рахунок споживання струму від накопичувального елемента. Проте, необхідним для рухомих електротехнічних комплексів є пошук технічних рішень по зменшенню величини ємності конденсатора.

Розглянемо умови збудження асинхронної машини в гальмівному режимі при включенні гальмівного резистору у ланку постійного струму, тобто між випрямлячем та інвертором. В цьому випадку реактивна енергія, необхідна для збереження магнітного потоку тягової машини може бути отримана шляхом обміну енергією між фазами через тиристори, розряду конденсатору фільтра та накопичувальної установки або живлення струмом від синхронного генератора (заданого виразом (9)). Частина реактивної енергії отримується також від конденсаторів вузла комутації, але ця частина у зв'язку з короткістю комутаційного інтервалу та при надто високих частотах струму асинхронної машини невелика. В подальшому вона не враховується.

Живлення струмом від синхронного генератора при гальмівному режимі вкрай не бажане, так як призводить до збільшення витрати палива дизелем та може понизити величину гальмівної потужності, що розвиває тяговий двигун в наслідок поглинання у резисторі частини струму синхронного генератора. Тому доцільно при гальмівному режимі тримати випрямляч в закритому стані шляхом зниження збудження синхронного генератора так, щоб випрямлена напруга останнього, задана виразом (1), була нижче випрямленої напруги асинхронної машини.

При зниженні коефіцієнта потужності асинхронної машини величина реактивної енергії, необхідної для її збудження, збільшується та відповідно збільшується струм розряду конденсатору. Конденсатор фільтра, призначений для згладжування пульсацій напруги (1), що створюються головним чином роботою інвертора. Збільшення ємності більш того, що потребується для цієї мети є небажаним для уникнення збільшення маси та об'єму інвертора. Тому при низьких коефіцієнтах потужності може виявитись доцільним ввімкнення випрямляча та живлення асинхронної машини від синхронного генератора струмом (10) шляхом збільшення його збудження. Це ввімкнення повинно відбуватись автоматично при збільшенні розрядного струму конденсатору фільтра та накопичувальної установки до деякого допустимої межі.

ВИСНОВКИ

В статті проведено визначення функцій електромагнітних процесів самозбудження асинхронного тягового двигуна при рекуперативному гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності. Проведене дослідження виконано в загальному вигляді, що дозволяє використовувати його результати для асинхронних тягових електроприводів різних серій. Зокрема, показано, що підтримки реактивної складової статорного струму тягового асинхронного двигуна на даній частоті шляхом живлення від системи живлення рухомого електротехнічного комплексу забезпечує надійне збудження асинхронного двигуна в генераторному режимі та, як наслідок, стабільне гальмування електротехнічного комплексу. Причому, живлення струмом від синхронного генератора при гальмівному режимі вкрай не бажане, так як призводить до збільшення витрати палива дизелем та може понизити величину гальмівної потужності. Запропоновано при гальмівному режимі тримати випрямляч в закритому стані шляхом зниження збудження синхронного генератора так, щоб випрямлена напруга останнього була нижче випрямленої напруги асинхронної машини.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Родькин Д. И. Энергопроцессы в асинхронном двигателе с насыщенной сталью / Родькин Д. И., Мартыненко В. А., Барвинок Д. В., Гераскин А. С. // Вісник КДПУ . – 2002. – С. 174-181.
2. Шидловский А. К. Анализ энергетических показателей источника вторичного электропитания для низковольтных потребителей транспортных средств / Шидловский А. К., Юрченко О. Н., Скиданов В. М., Павлов В. Б. // Техническая электродинамика. – № 4. – 1989. – С. 27-31.
3. Мазуренко Л. И. Расчетно-экспериментальная оптимизация параметров емкостных систем возбуждения и анализ характеристик однофазных асинхронных генераторов / Мазуренко Л. И., Лесник В. А., Дынник Л. Н., Джура А. В. // Техн. електродинаміка. – № 4. – 2007. – С. 57-62.
4. Мазуренко Л. І. Електричні машини змінного струму та електромеханічні системи на їх основі / Мазуренко Л. І., Попович О. М., Гребеніков В. В., Бібик О. В., Головань І. В., Джура О. В., Шуруб Ю. В., Вербовий А. П., Романенко В. І. // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. – Вип 29. – К. : ІЕД НАНУ. – 2011. – С. 62-70.
5. Мазуренко Л. І. Електричні машини змінного струму та машинно-вентильні комплекси на їх основі / Мазуренко Л. І., Попович О. М., Гребеніков В. В., Бібик О. В., Головань І. В., Джура О. В., Шуруб Ю. В., Вербовий А. П., Романенко В. І. // Праці Інституту

електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. – Вип 26. – К. : ІЕД НАНУ. – 2010. – С. 63-71.

6. Расчет предельных и регулировочных характеристик электропередачи ТЭ-120 в режиме торможения. Разработка структурной схемы системы автоматического регулирования тормозного режима. Часть 1 (промежуточный отчет), 16/79, инв. № Б765805. – М. : МЭИ, 1979. – 58 с.

7. Кулагін Д. О. Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів : монографія / Дмитро Олександрович Кулагін. – Бердянськ : ФО-П Ткачук О. В., 2014. – 154 С.

8. Кулагін Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітних кіл / Кулагін Д. О. // Науковий вісник НГУ. – 2014. – № 6. – С. 103–110.

9. Кулагін Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення / Кулагін Д. О. // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 49–55.

Кулагин Д. А. Исследование электромагнитных процессов самовозбуждения асинхронного тягового двигателя при рекуперативном торможении с питанием от источника ограниченной мощности

В статье выполнено определение функций электромагнитных процессов самовозбуждения асинхронного тягового двигателя при рекуперативном торможении с питанием от источника ограниченной мощности. Проведенное исследование выполнено в общем виде, что позволяет использовать его результаты для асинхронных тяговых электроприводов различных серий.

Ключевые слова: самовозбуждение, переходные процессы, асинхронный двигатель, намагничивания, математическая модель.

Kulagin D.O. Investigation of electromagnetic processes of self-excitation asynchronous traction motor with regenerative braking powered by limited power sources

In the article the definition of the functions of self-excitation of electromagnetic processes asynchronous traction motor with regenerative braking powered by limited power source. It is shown that the power of current synchronous generator with brake mode is not very desirable, as leading to increased fuel consumption diesel and can reduce the value of the braking power, traction engine which develops as a result of absorption of the resistor current synchronous generator. Therefore, it is advisable to keep in brake mode rectifier closed by lowering the

excitation synchronous generator so that the latter was rectified voltage below rectified voltage asynchronous machine. By reducing the power factor of asynchronous machine magnitude of reactive energy required for its excitation increases and increases according capacitor discharge current. Capacitor filter, designed to smooth the ripple voltage generated mainly work inverter. The increase in capacity over that required for this purpose is desirable to avoid increasing the weight and volume of the inverter. Therefore, the low power factor may be appropriate to enable the rectifier and power of asynchronous machine synchronous generator by increasing his excitement. This should happen automatically turn on with increasing discharge current filter capacitor installation and funded to some acceptable limits. The research carried out in general terms, it can be used for asynchronous traction results electric various series.

Keywords: *self-excitation, transients, asynchronous motor magnetization mathematical model.*

REFERENCES

1. Rodkin D. I. Energoprotsessyi v asinhronnom dvigatele s nasyischennoy stal'yu / Rodkin D. I., Martynenko V. A., Barvinok D. V., Geraskin A. S. // *Visnik KDPU*. – 2002. – S. 174-181.
2. Shidlovskiy A. K. Analiz energeticheskikh pokazateley istochnika vtorichnogo elektropitaniya dlya nizkovoltnykh potrebiteley transportnykh sredstv / Shidlovskiy A. K., Yurchenko O. N., Skidanov V. M., Pavlov V. B. // *Tehnicheskaya elektrodinamika*. – # 4. – 1989. – S. 27-31.
3. Mazurenko L. I. Raschetno-eksperimentalnaya optimizatsiya parametrov emkostnykh sistem vzbuzhdeniya i analiz harakteristik odnofaznykh asinhronnykh generatorov / Mazurenko L. I., Lesnik V. A., Dyinnik L. N., Dzhura A. V. // *Tehn. elektrodinamika*. – # 4. – 2007. – S. 57-62.
4. Mazurenko L. I. ElektrichnI mashini zmInnogo strumu ta elektromehanIchnI sistemi na Yih osnovI / Mazurenko L. I., Popovich O. M., GrebenIkov V. V., BIbIk O. V., Golovan I. V., Dzhura O. V., Shurub Yu. V., Verboviy A. P., Romanenko V. I. // *PratsI Institutu elektrodinamIki NatsIonalnoYi akademIYi nauk UkraYini: Zb. nauk. pr. – Vip 29. – K. : IED NANU. – 2011. – S. 62-70.*
5. Mazurenko L. I. ElektrichnI mashini zmInnogo strumu ta mashinno-ventilnI kompleksi na Yih osnovI / Mazurenko L. I., Popovich O. M., GrebenIkov V. V., BIbIk O. V., Golovan I. V., Dzhura O. V., Shurub Yu. V., Verboviy A. P., Romanenko V. I. // *PratsI Institutu elektrodinamIki NatsIonalnoYi akademIYi nauk UkraYini: Zb. nauk. pr. – Vip 26. – K. : IED NANU. – 2010. – S. 63-71.*
6. Raschet predelnykh i regulirovochnykh harakteristik elektroperedachi TE-120 v rezhime tormozheniya. Razrabotka strukturnoy shemyi sistemyi avtomaticheskogo regulirovaniya

tormoznogo rezhima. Chast 1 (promezhutochnyy otchet), 16/79, inv. # B765805. – M. : MEI, 1979. – 58 s.

7. Kulagin D. O. Proektuvannya sistem keruvannya tyagovimi elektroperedachami motorvagonnih poYizdIv : monografiya / Dmitro Oleksandrovich Kulagin. – Berdyansk : FO-P Tkachuk O. V., 2014. – 154 S.

8. Kulagin D. O. Matematichna model tyagovogo asinhronnogo dviguna z urahuvannyam nasichennya magnItnih kII / Kulagin D. O. // Naukoviy vIsnik NGU. – 2014. – # 6. – S. 103–110.

9. Kulagin D. O. Matematichna model tyagovogo asinhronnogo dviguna z urahuvannyam nasichennya / Kulagin D. O. // TehnIchna elektrodinamIka. – 2014. – # 6. – S. 49–55.