

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна; e-mail: andrpd@ukr.net;

²Старший викладач кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна; e-mail: sergey.shilo@gmail.com;

³Старший викладач кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: alexandr.kaplienko@gmail.com.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ З ІМПУЛЬСНИМИ СХЕМАМИ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Мета: Метою роботи є дослідження динаміки двигуна постійного струму послідовного збудження з імпульсним регулюванням частоти обертання і визначення можливості спрощення схеми електропривода.

Методика: Методи імітаційного моделювання й аналітичні методи розрахунку та дослідження електромеханічних процесів в серієсному двигуні постійного струму при різних схемах імпульсного керування.

Результати: Розроблено вдосконалену схему імпульсного регулювання двигуна постійного струму послідовного збудження. Для запропонованої існуючої схем імпульсного регулювання розроблені моделі, за допомогою яких досліджені електромеханічні процеси тягового електроприводу в цих схемах і виконано їх порівняльний аналіз. Наведено результати дослідження модернізованої імпульсної схеми регулювання частоти обертання двигуна постійного струму в режимах розгону, вибігу і електродинамічного гальмування. Проведено аналіз величини пульсації струму якоря та вплив на неї частоти комутації при використанні модернізованої схеми імпульсного регулювання.

Наукова новизна: Розроблено нові імітаційні моделі, які дозволяють виконувати дослідження електромеханічних процесів тягового електроприводу при різних схемах імпульсного регулювання.

Практична значимість: Розроблено вдосконалену схему імпульсного регулювання двигуна постійного струму послідовного збудження за рахунок введення в схему імпульсного регулятора діода, який шунтує обмотку збудження, що дозволяє знизити швидкість загасання струму в обмотці збудження та використовувати режим електродинамічного гальмування при самозбудженні електродвигуна. Запропоноване схемне рішення дозволяє уникнути застосування додаткових незалежних джерел струму та спростити технічну реалізацію і зменшити витрати.

Ключові слова: імпульсне регулювання, серієсний електродвигун, послідовне збудження, імітаційна модель

ВСТУП

В даний час в електротранспорті застосовуються електродвигуни з серієсними електродвигунами постійного струму. Спектр застосування електроприводів постійного струму з двигунами послідовного збудження (ДПЗ) досить широка - тяговий електропривод рухомого складу міського та залізничного транспорту. Це зумовлено тим, що зміна моменту навантаження для даних механізмів добре узгоджується з електромеханічною характеристикою ДПЗ.

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

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Існує кілька схем регулювання швидкості серієсного двигуна постійного струму (ДПС), це: реостатна і імпульсна схеми [1, 2].

Найбільш поширена реостатна схема регулювання швидкості серієсного ДПС [1], має такі недоліки як:

– наявність великої кількості контактної апаратури;

– втрати в пускових резисторах, що знижують ККД тягового привода;

– необхідність проведення регулярних діагностик і технічного обслуговування, що підвищує витрати на експлуатацію рухомого складу.

Отже, даний вид тягового електропривода (ТЕП) є досить неефективним як з енергетичної, так і з економічної точок зору.

З розвитком силової електроніки найбільш раціональним способом усунення недоліків, наведених вище, є застосування імпульсних регуляторів частоти обертання ДПС, що дозволяє знизити до мінімуму число одиниць контактної апаратури і знизити споживання електроенергії в режимі пуску, гальмування, вибігу [2, 3].

Імпульсна схема є більш економічною, але в режимі електромагнітного гальмування вимагає наявності додаткового обладнання для підтримки струму в обмотці збудження за допомогою додаткових незалежних джерел струму. Актуальною задачею є модернізація імпульсної схеми, яка дозволить спростити її та зробити ТЕП більш енергоефективним та енергоощадним.

Таким чином, модернізація класичної схеми імпульсного регулювання та порівняння динаміки ДПЗ при

різних схемах регулювання, яке дозволило б визначити найбільш ефективну і найменш складну з них є актуальною науково-практичною задачею.

Метою роботи є дослідження динаміки двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПЗ) з імпульсним регулюванням частоти обертання і визначення можливості спрощення схеми електропривода.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Авторами була розроблена модель, яка ілюструє таку схему пуску (рис. 1).

При моделюванні не враховувався вплив реакції якоря. Нелінійність кривої намагнічування враховувалася таблично за методикою [7].

Параметри імітаційної моделі розраховано для тягового двигуна 1ДТ-003.5У[7] за методикою[6]:

- номінальна напруга, $U = 750$ В,
- потужність, $P = 235$ кВт,
- сила струму, $I = 345$ А,
- частота обертання, $n = 1250$ хв⁻¹,
- маса, $m = 2300$ кг.

Всі подальші розрахунки та графіки залежностей наведені у відносних одиницях. За базові значення прийняті наступні:

- електромагнітний момент $M = 5$ кН*м;
- кутова частота обертання $\omega = 130$ рад/с;
- струм $I = 345$ А.

Значний практичний інтерес становлять схемні рішення, що дозволяють використання електродинамічного гальмування при самозбудження електродвигуна. Проте використання цього режиму, пов'язано з певними труднощами, так як при гальмуванні потрібна наявність залишкового магнітного потоку в двигуні. В існуючих моделях електроприводу використовуються додаткові незалежні джерела струму. Їх наявність призводить до уск-

ладнення схемного рішення і додатковим економічним витратам на ремонт і обслуговування.

Відома класична схема електроприводу постійного струму, в якій здійснюється імпульсне регулювання швидкості обертання за допомогою зміни періоду роботи ключа Т1 (рис. 1) [2].

Проведення аналітичного опису даної схеми досить складно, оскільки присутній квадратична залежність потоку збудження, електромагнітного моменту і частоти обертання двигуна. Тому дослідження проводилося за допомогою програмного пакету Matlab з застосуванням бібліотеки SimPowerSystem [3–5]. На рис. 2 показана модель такої системи.

Наведемо опис елементів моделі: Е – джерело живлення (напруга джерела живлення дорівнює 750В); Т1 – силовий ключ; Т2 – силовий ключ, що включає гальмівний резистор R_t ; D2 – діод зворотного струму; М – двигун постійного струму послідовного збудження; ШИМ – блок, що реалізує управління силовим ключем Т1; БВМН – блок, який проводить обчислення моменту навантаження двигунів М; D3, D4 – діоди, що вводяться в схему при дослідженні модернізованої системи імпульсного регулювання частоти обертання двигуна М. (показаний пунктиром).

За допомогою цієї моделі проведені дослідження як класичної (рис. 1, а), так і модернізованої (рис. 1, б) схеми імпульсного регулювання. Результати розрахунку моделі наведено на рис. 3 (для класичної схеми) і рис. 4 (для модернізованої), де I_a – струм якоря двигуна; I_e – струм збудження двигуна; Мем – електромагнітний момент двигуна; ω – кутова частота обертання двигуна.

У класичній схемі регулювання частоти обертання [2] швидкість спадання струму якоря визначається постійною часу ланцюга якоря. На ділянці силовий ключ Т1-обмотка якоря М1-обмотка збудження F1 струм наростає (ключ Т1 відкритий), і спадає по ланцюгу діод D2-обмотка якоря М1-обмотка збудження F1 (ключ Т1 закрито).

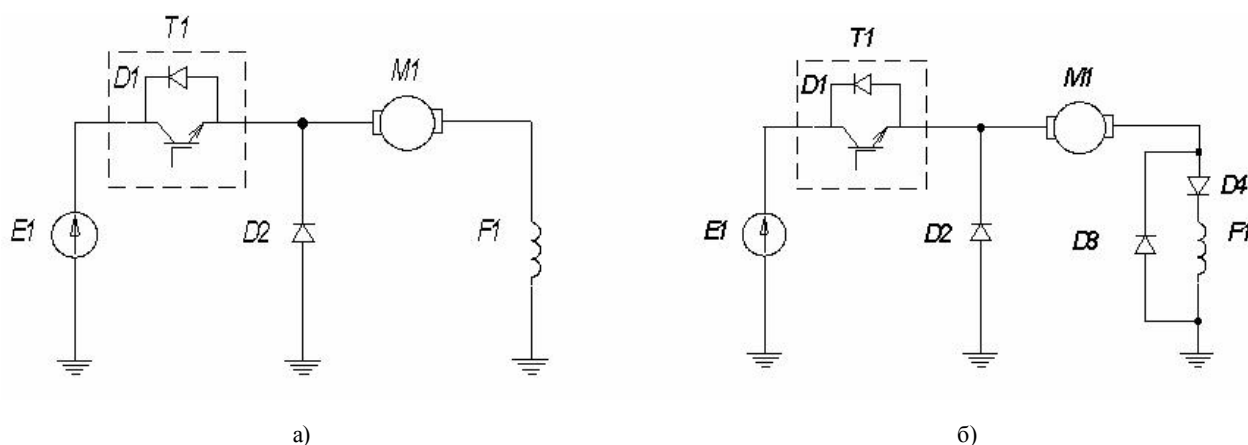


Рисунок 1 – Схема імпульсного регулювання швидкості обертання електроприводу з ДПЗ: а) класична схема імпульсного регулювання; б) модернізована схема імпульсного регулювання

При введенні в схему діода D3 (рис. 1) струм збудження буде замикатися по контуру шунтувальний діод D3-обмотка збудження F1. Результати моделювання показують, що запропонована модернізація схемного рішення дозволяє збільшити час спадання струму в обмотці збудження двигуна постійного струму у 8 раз (рис. 5). Це, у свою чергу, веде до більш повільного спадання магніт-

ного поля в двигуні постійного струму. Тому при даному схемному рішенні використання електродинамічного гальмування при самозбудженні електродвигуна є можливим. У той же час, швидкість наростання (спадання) струму в обмотці якоря через наявність діода D3 визначається тільки параметрами ланцюга якоря, що ілюструється збільшенням пульсацій (рис. 4).

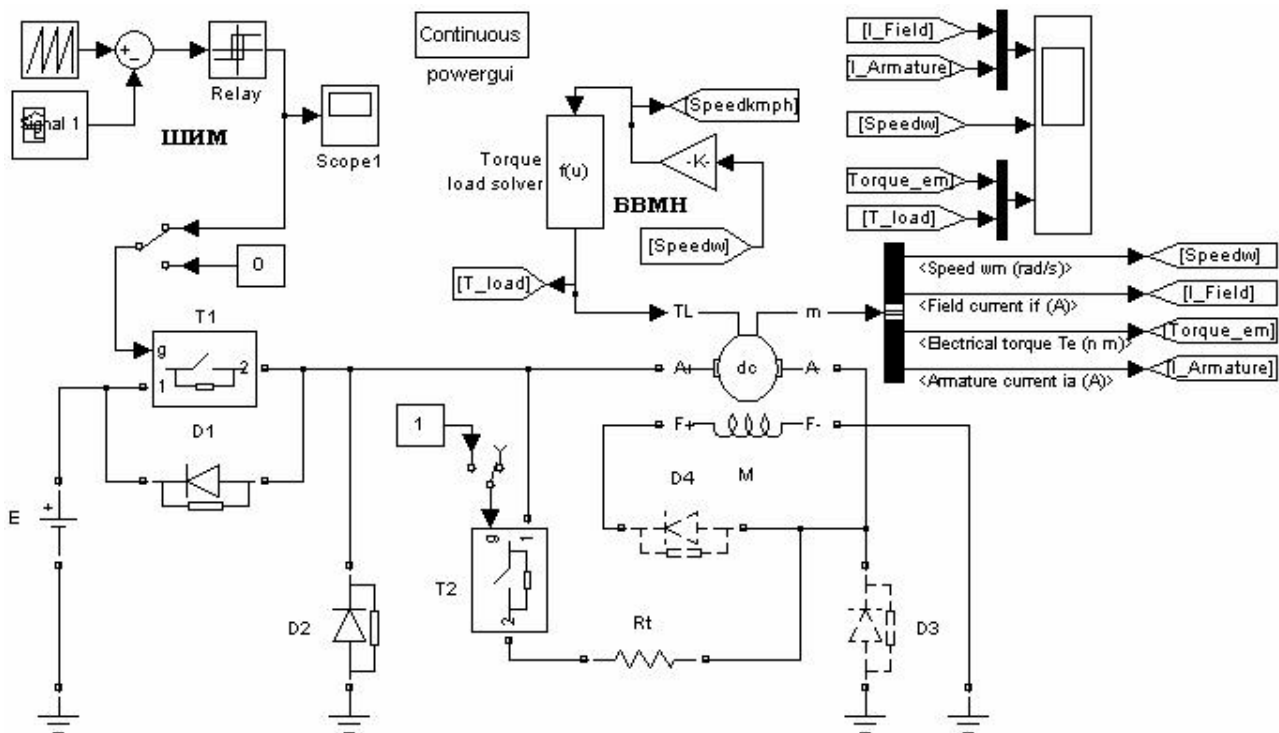


Рисунок 2 – Модель імпульсного регулювання швидкості обертання електроприводу з ДПЗ

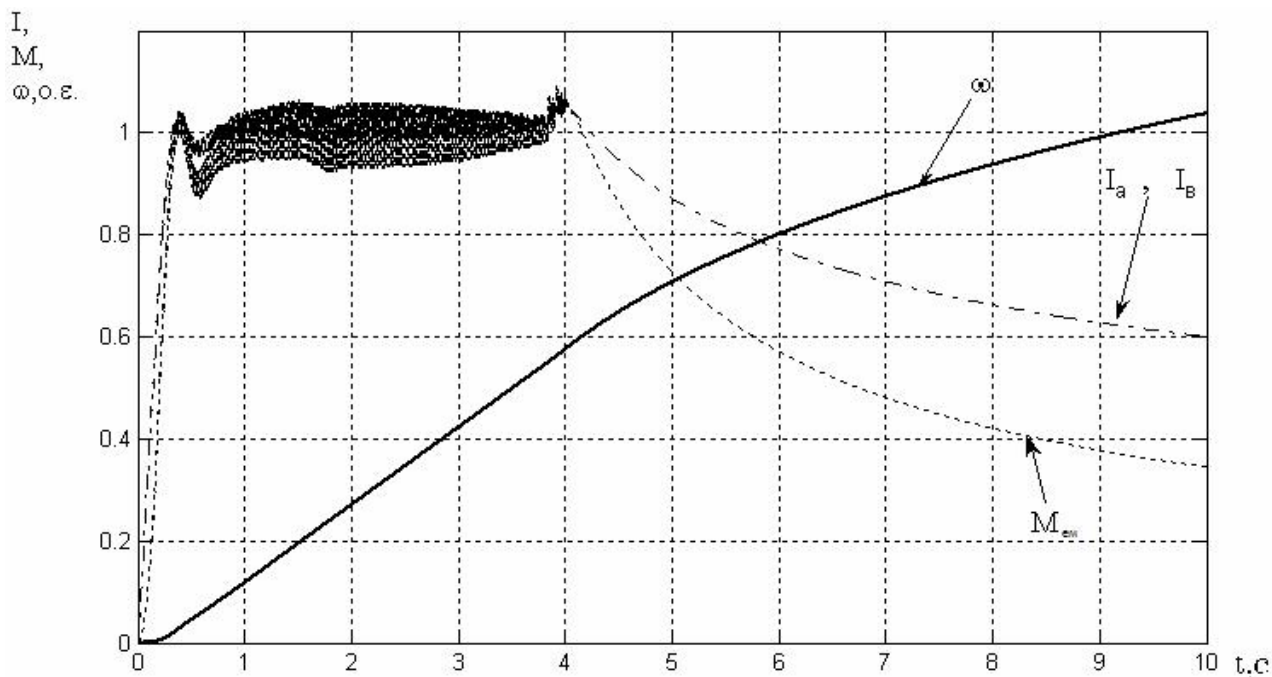


Рисунок 3 – Результати дослідження імпульсної схеми регулювання частоти обертання двигуна постійного струму (частота комутації 300 Гц)

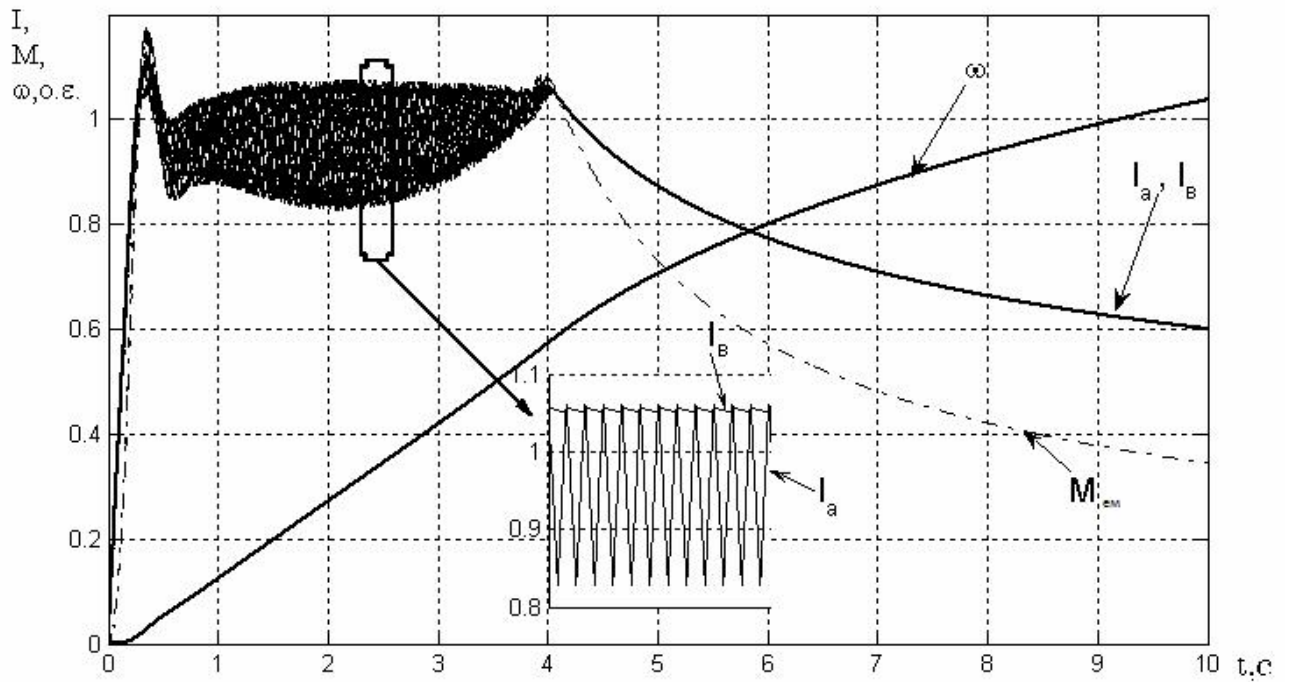


Рисунок 4 – Результати дослідження модернізованої імпульсної схеми регулювання частоти обертання двигуна постійного струму (частота комутації 300 Гц)

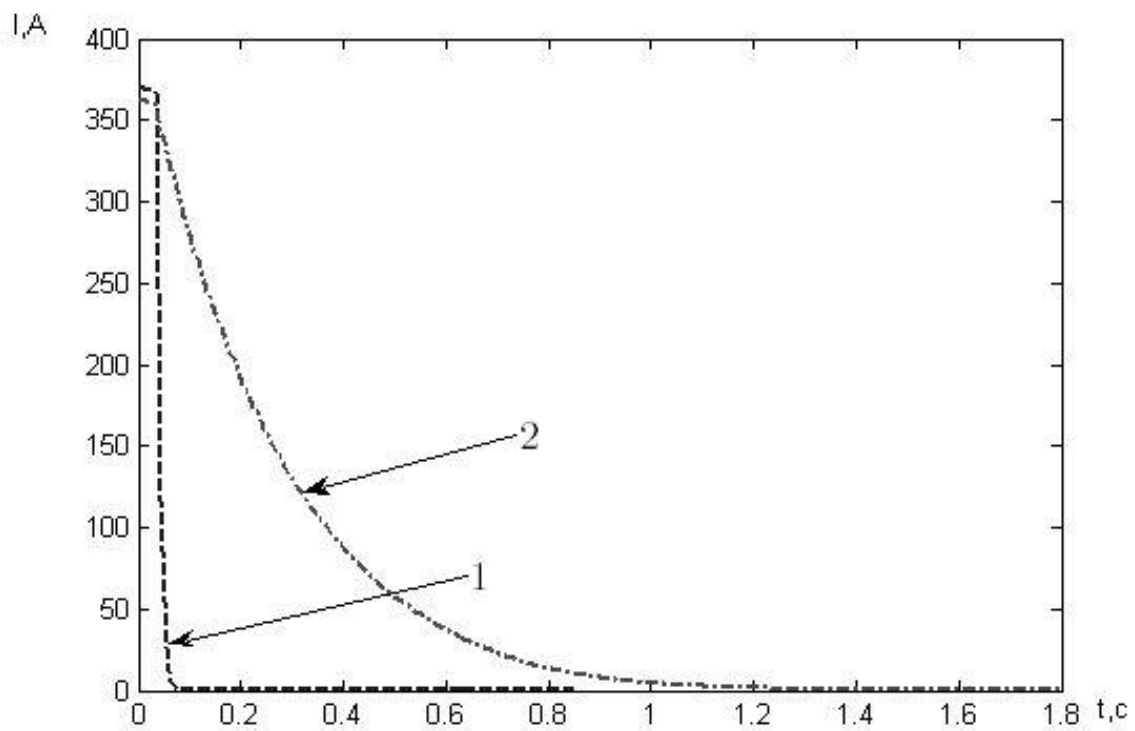


Рисунок 5 – Графік спадання струму в обмотці збудження: 1 – без діода D3; 2 – з діодом D3

Проведене дослідження 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.

На рис. 6 наведено результати дослідження модернізованої імпульсної схеми регулювання частоти обертання двигуна постійного струму в режимах розгону, вибі-

гу і електродинамічного гальмування. При моделюванні досліджувались наступні режими:

- в момент часу $t = 0$ розпочато розгін електродвигуна;
- в момент часу $t = 8,6$ с відключається подача струму на двигун, здійснюється режим вибігу;
- в момент часу $t = 9,2$ с ввімкненням силового ключа T2 в ланцюг якоря вводиться гальмівний резистор Rt;
- розрахунок іде до моменту повної зупинки якоря електродвигуна ($\omega^* = 0$).

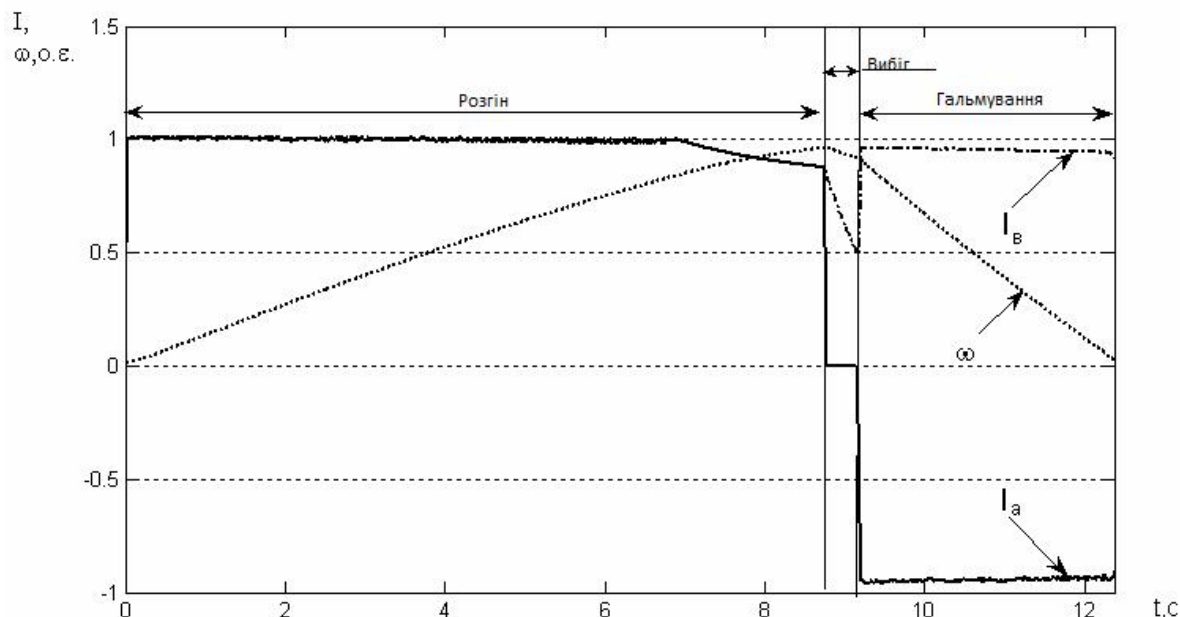


Рисунок 6 – Результати дослідження модернізованої імпульсної схеми регулювання частоти обертання двигуна постійного струму в режимах руху, вибігу, електродинамічного гальмування (частота комутації 2000 Гц)

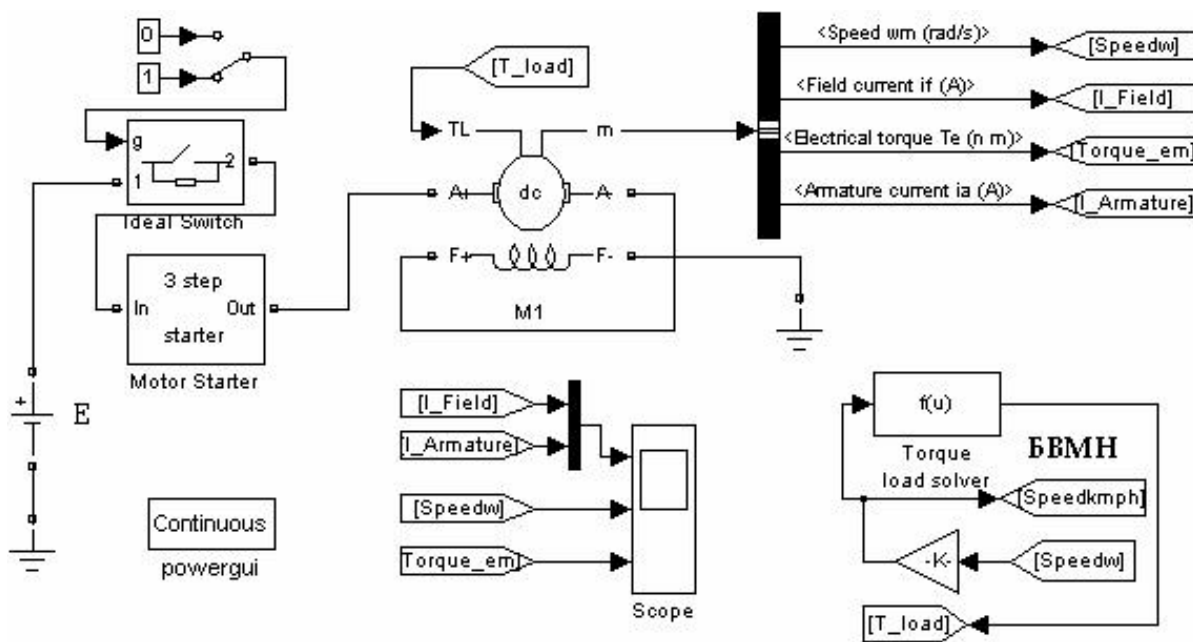


Рисунок 7 – Модель реостатного пуску серієсного електродвигуна

Наведені залежності вказують на можливість реалізації режиму електродинамічного гальмування електродвигуна без застосування додаткових засобів підтримки струму в обмотці збудження ДПЗ.

Авторами були проведені дослідження модернізованої схеми при різних частотах комутації силового ключа Т1: в діапазоні від 300 до 2000 Гц. Результати дослідження вказують на те, що усунення явища збільшення пульсацій досягається підвищенням частоти комутації до 1–1,5 кГц. Так само зниження рівня пульсацій можливо досягти при введенні в ланцюг якоря згладжуючих елементів, таких як згладжуючий реактор і конденсатор.

Додатково авторами було розроблено імітаційну модель реостатної схеми регулювання частоти обертання якоря ДПС (рис 7).

Наведемо опис елементів моделі: Е – джерело живлення (напряга джерела живлення дорівнює 750В); Motor Starter – пусковий реостат, що забезпечує 4 ступені регулювання; М1 – двигуни постійного струму послідовного збудження; БВМН – блоки, що здійснюють обчислення моменту навантаження двигунів М1.

Результати дослідження, проведеного на даній моделі, представлені на рис. 8.

ВИСНОВКИ

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

Проведене моделювання дозволило зробити порівняльний аналіз декількох схем імпульсного регулювання, результати якого вказують на високу ефективність модернізованої схеми.

Введення в схему імпульсного регулятора діода D3, який шунтує обмотку збудження, дозволяє знизити швидкість загасання струму в цій обмотці.

Запропонована модернізація, що полягає у введенні в схему діодів D3 та D4, дозволяє використовувати режим електродинамічного гальмування при самозбудженні електродвигуна.

Запропоноване схемне рішення дозволяє уникнути застосування додаткових незалежних джерел струму та спростити технічну реалізацію і зменшити витрати.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Метельський В. П. Електричні машини та мікромашини / В. П. Метельський. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 616 с.
2. Глазєнко Т. А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока / Т. А. Глазєнко. – Л.: Энергия, 1973. – 304 с.
3. Андриєнко П. Д. Исследование режимов торможения в системе импульсного регулирования серийного электродвигателя / П.Д. Андриєнко, А.О. Каплиєнко, С. И. Шило, И. Ю. Немудрый // Електротехніка та електроенергетика. – 2007. – № 2. – С. 11–14.

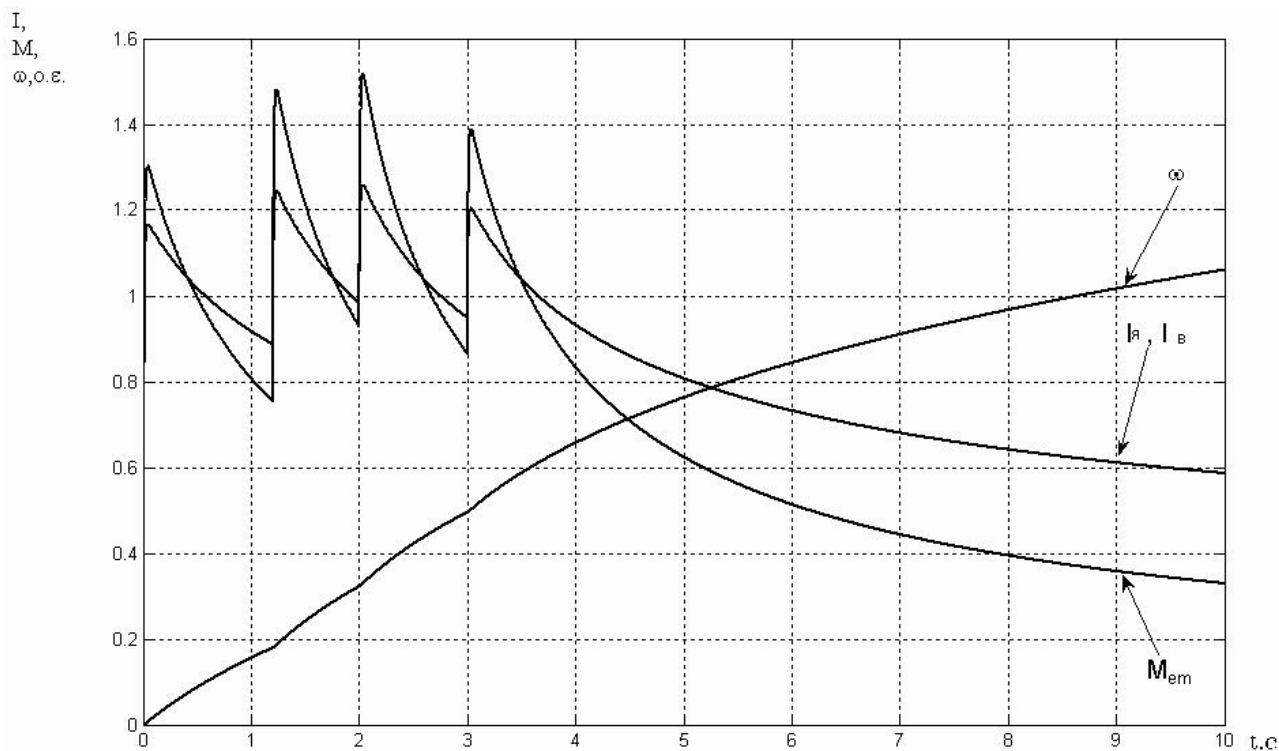


Рисунок 8 – Результати дослідження реостатної схеми пуску двигуна постійного струму Iа-струм якоря двигуна; Iв-струм збудження двигуна; Mem - електромагнітний момент двигуна; ω - кутова частота обертання двигуна

4. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Учитель и ученик, Корона-принт, 2002. – 304 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК / С. Г. Герман-Галкин, Кардонов Г. А. – СПб.: Учитель и ученик, Корона-принт, 2003. – 256 с.
6. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем / С.Г. Герман-Галкин.. – СПб.: Учитель и ученик, Корона-принт, 2001. – 319с.
7. Перльмутер В. М. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока / В. М. Перльмутер, В. А. Сидоренко. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
8. Пегов Д. В. Руководство по устройству электропоездов ЭТ2, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭТ2М / Д. В. Пегов, П. В. Бурцев, В. Е. Андреев – Москва: Центр коммерческих разработок, 2003. – 184 с.

Андриенко П. Д.¹, Шило С. И.², Каплиенко А. О.³

¹Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

²Старший преподаватель кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

³Старший преподаватель кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С ИМПУЛЬСНЫМИ СХЕМАМИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Цель: Целью работы является исследование динамики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с импульсным регулированием частоты вращения и определение возможности упрощения схемы электропривода.

Методика: Методы имитационного моделирования и аналитические методы расчета и исследований электромеханических процессов в серийном двигателе постоянного тока при различных схемах импульсного управления.

Результаты: Разработана усовершенствованная схема импульсного регулирования двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Для предложенной и существующей схем импульсного регулирования разработаны модели, с помощью которых исследованы электромеханические процессы тягового электропривода в этих схемах и выполнен их сравнительный анализ. Приведены результаты исследования модернизированной импульсной схемы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока в режимах разгона, выбега и электродинамического торможения. Проведен анализ величины пульсаций тока якоря и влияние на нее частоты коммутации при использовании модернизированной схемы импульсного регулирования.

Научная новизна: Разработаны новые имитационные модели, которые позволяют проводить исследования электромеханических процессов тягового электропривода в различных схемах импульсного регулирования.

Практическая значимость Разработана усовершенствованная схема импульсного регулирования двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Проведено усовершенствование схемы импульсного регулирования двигателя постоянного тока последовательного возбуждения за счет введения в схему импульсного регулятора диода, шунтирующего обмотку возбуждения, что позволяет снизить скорость затухания тока в обмотке возбуждения и использовать режим электродинамического торможения при самовозбуждении электродвигателя. Предложенное схемное решение позволяет избежать применения дополнительных независимых источников тока, упростить техническую реализацию и уменьшить расходы.

Ключевые слова: Импульсное регулирование, серийный электродвигатель, последовательное возбуждение, имитационная модель

Andrienko P. D.¹, Shilo S. I.², Kaplienko O. O.³

¹Doctor of Engineering Sciences, Prof., Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

²Senior lecturer, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

³Senior lecturer, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

RESEARCH OF SUCCESSIVE EXCITATION ELECTRIC MOTOR DYNAMIC MODES WITH PULSED SCHEMES OF THE ELECTRIC DRIVE REGULATION

Purpose: The purpose of the work is to research the dynamics of DC motor of series excitation with pulse speed control and determine the possibility of the drive circuit simplification.

Research methods: With the help of simulation and analytical methods of calculation techniques developed a simulation model, identified the advantages of using a modernized impulse control scheme.

The obtained results: The modernized scheme of series excitation DC current motor pulse control is designed. For the proposed and existing pulse regulation schemes the models are developed; they help to investigate the electromechanical processes of electric drive in these schemes and to perform the comparative analysis. The results of the modernized DC

motor speed impulse control scheme investigation in the acceleration mode, overrun and electro-dynamic braking are given.

Scientific novelty: Developed advanced pulse regulating sequential excitation DC motor scheme. For existing and proposed schemes impulse regulation developed models that allow study of electromechanical processes in electric drive for existing and proposed impulse control schemes.

The practical significance: It is shown that the addition of a shunt field winding diode to pulsed regulator scheme reducing the rate of current decay in the winding. It is determined that the proposed upgrade allows to use electro-dynamic braking mode at the motor self-excitation. The proposed scheme design avoids the use of additional independent power sources and simplify the technical implementation and reduce costs.

Keywords: pulse control, the electric motor of series excitation, series excitation, simulation model

REFERENCES

1. Metel's'kij V. P., Elektrichni mashini ta mikromashini. Zaporizhzhja, ZNTU, 2005, 616 s.
2. Glazenko T. A. Poluprovodnikovye preobrazovateli v jelektroprivodah postojannogo toka. Saint Petersburg, Jenergija, 1973, 304 s.
3. Andrienko P. D., Kaplienko A. O., Shilo S. I., Nemudryj I. Yu. Issledovanie rezhimov tormozheniya v sisteme impul'snogo regulirovaniya seriesnogo e'lektrodvigatelya, *Elektrotexnika ta elektroenergetika*, 2007, No 2, pp. 11–14.
4. German-Galkin S. G. Silovaja jelektronika: Laboratornye raboty na PK. Saint Petersburg, Uchitel' i uchenik, Korona-print, 2002, 304 s.
5. German-Galkin S. G., Kardonov G. A. Jelektricheskie mashiny: Laboratornye raboty na PK, Saint Petersburg, Uchitel' i uchenik, Korona-print, 2003, 256 s.
6. German-Galkin S. G. Komp'juternoe modelirovanie poluprovodnikovyh sistem, Saint Petersburg, Uchitel' i uchenik, Korona-print, 2001, 319 s.
7. Perl'muter V. M., Sidorenko V. A. Sistemy upravlenija tiristornymi jelektroprivodami postojannogo toka, Moscow, Jenergoatomizdat, 1988, 304 s.
8. Pegov D. V., Burcev P. V., Andreev V. E. Rukovodstvo po ustrojstvu jelektropoezdov JeT2, JeR2T, JeD2T, JeT2M, Moscow, Centr kommercheskih razrabotok, 2003, 184 s.