

КОМПЕНСАЦІЯ СТАТИЗМУ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА, ЩО ПІДВИЩУЄ НАПРУГУ ДЖЕРЕЛА

О. О. Шавьолкін, к.т.н., доц., Д. М. Мірошник, ас.
Донецький національний технічний університет
вул. Артема, 58, 83001, м. Донецьк, Україна
E-mail: sha@dgtu.donetsk.ua

Запропоновано компенсацію статизму за навантаженням для системи автоматичного регулювання вихідною напругою імпульсного перетворювача, що підвищує напругу джерела постійного струму шляхом визначення активного струму джерела. Це дозволяє значно покращити динаміку контуру регулювання вихідної напруги перетворювача. При цьому максимальний статизм системи не перевищує 3 %, що дозволяє використати систему у тяговому асинхронному електроприводі з акумуляторною батареєю.

Ключові слова: імпульсний перетворювач, регулятор напруги, компенсація статизму за навантаженням.

Вступ. Застосування імпульсного перетворювача постійної напруги (ІППН), що підвищує напругу акумуляторної батареї (АБ), у тяговому асинхронному електроприводі (ТАЕП) з автономним інвертором напруги (АІН) дозволяє забезпечити універсальність схемного рішення відносно напруги асинхронного двигуна (АД) і виключити вплив нестаціонарності вихідної напруги джерела U_{AB} (внутрішній опір АБ R_{AB} змінюється в залежності від ємності АБ) на характеристики ТАЕП [1–4].

Аналіз попередніх досліджень. При розв'язанні даної задачі у ТАЕП (рис. 1) зі скалярним або векторним керуванням швидкістю доцільно застосувати комбіноване формування напруги на статорі асинхронного двигуна (АД) за рахунок регулювання напруги у ланці постійного струму U_d і використання ШІМ [4]. У порівнянні з ШІМ це дає можливість зменшити втрати потужності у АД від вищих гармонійних складових струму статора (складають до 10 % від загальних втрат [4]) до 9 разів. При цьому ІППН повинен забезпечити можливість роботи з двобічним потоком енергії при високих статичних та динамічних показниках [5]. Швидкодія у регулюванні вихідної напруги [2] залежить від значення індуктивності дроселя L , що входить до складу ІППН. Зі зменшенням L можна поліпшити динаміку системи, але при цьому або збільшуються пульсації струму джерела ΔI_{AB} (збільшуються втрати потужності джерела), або необхідно збільшувати частоту комутації ключів ІППН (збільшуються втрати потужності ІППН). У [2] показано, що за умови обмеження частоти комутації ключів ІППН на рівні 2 кГц при індуктивності $L=2,5$ мГн використання ІППН разом з АІН не призводить до зниження ККД при потужності навантаження $P_H=15$ кВт і $U_{AB}=130$ В (у порівнянні з живленням АІН безпосередньо від АБ). При цьому ΔI_{AB} становлять 10 % від номінального струму АБ I_{AB} , що відповідає P_H . Ємність на виході ІППН, окрім обміну реактивної потужності з АД і фільтрування вхідної напруги АІН, також впливає на динаміку роботи системи. У [1] показано, що при $P_H=15$ кВт достатнім є значення ємності $C=1$ мФ. Отже, актуальним є завдання синтезу системи автоматичного регулювання вихідної напруги (САРН) ІППН, що забезпечує мінімальну статичну похибку і покращує динаміку системи при заданих значеннях L і C [6].

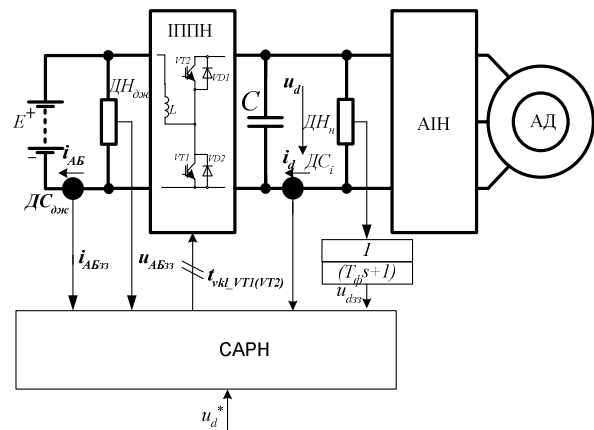


Рисунок 1 – Функціональна схема ТАЕП з ІППН

Мета роботи. Покращення статичних і динамічних показників системи автоматичного регулювання вихідною напругою ІППН шляхом виконання синтезу і порівняльного аналізу різних структур САРН.

Матеріал і результати дослідження. Регулювання u_d можливе двома шляхами [7]: з постійним періодом комутації ключів $T_{кІППН}=const$ (ШІМ); з підтриманням постійних пульсацій струму або напруги $T_{кІППН}/(\gamma(1-\gamma))=const$ (γ - відносна тривалість імпульсів керування ключем ІППН).

Закон $T_{кІППН}=const$ описаний у [8]. Його формування можливе за умови використання САРН з розгорткою ШІМ. Проте ця система не дає можливості регулювання напруги U_d у режимі рекуперативного гальмування.

При використанні у внутрішньому контурі регулювання i_{AB} релейного регулятора струму (РРС) перехідний процес зміни цього параметру буде оптимальним за швидкістю [5] у відповідності до закону регулювання $T_{кІППН}/(\gamma(1-\gamma))=const$. При цьому обмеження ΔI_{AB} буде відповідати ширині петлі гістерезису РРС. Структура САРН представлена на рис. 2.

Згідно математичної моделі ІППН [1] встановлено, що астатизм у регулюванні u_d можна забезпечити двома шляхами: 1) використанням П-регулятора (рис. 2, а) з каналом компенсації статизму за навантаженням подібно [9, 10]; 2) при використанні ПІ-регулятора (рис. 2, б), що утворює

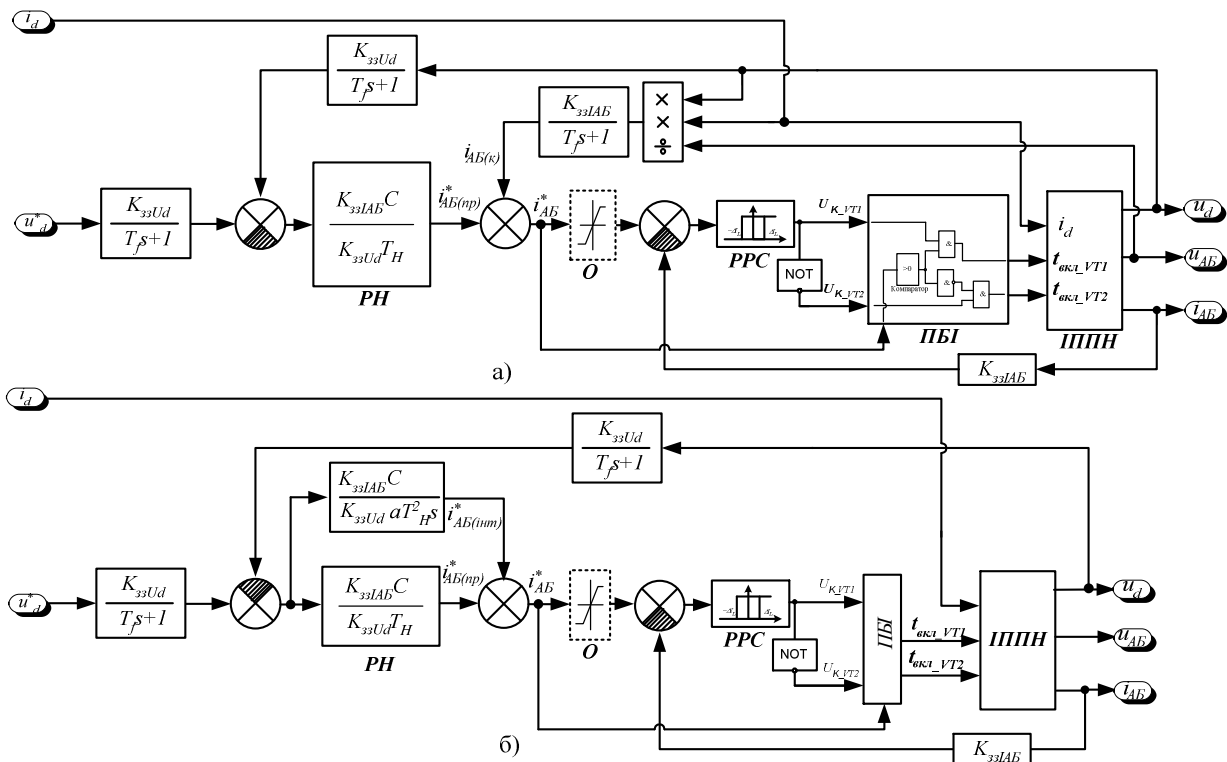


Рисунок 2 – Структура системи автоматичного регулювання вихідною напругою ІППН: а) з використанням компенсації статизму; б) ІП РНдв

двократноінтегральну САРН [10]. Таким чином, у подальших дослідженнях необхідно виконати синтез регулятора, який би забезпечував мінімальну статичну і динамічну похибку при регулюванні напруги, а також порівняти дані варіанти з відомим ШІМ регулюванням [8].

Сигнал завдання на контур регулювання струму АБ i_{AB}^* надходить від регулятора напруги ІППН у режимі двигуна (РН_{дв}). У відповідності до моделі ІППН [1], передавальна функція П-РН_{дв} компенсує ємність конденсатора С:

$$W_{PHдв}(s) = \frac{K_{33I_{AB}} C}{K_{33U_d} T_{Hдв}(\Pi)}, \quad (1)$$

де $T_{Hдв}(\Pi)$ – стала часу пропорційного РНдв; $K_{33I_{AB}}$, $K_{33U_{AB}}$ – коефіцієнти зворотного зв'язку за I_{AB} і U_{AB} .

Тоді у відповідності до [10] система потребує компенсації статичної похибки у регулюванні U_d :

$$\Delta U_{d(cm)} = \frac{T_{Hдв}(\Pi)}{C} I_{AB}. \quad (2)$$

Якщо С задана і її значення змінити відносно $T_{Hдв}(\Pi)$ неможливо, то зменшувати $T_{Hдв}(\Pi)$ відносно С можна за умови обмеження швидкості зростання завданого значення i_{AB}^* , яка повинна бути більше поточної швидкості зростання струму джерела (при замиканні VT1 на рис. 1):

$$\frac{I_d}{T_{Hдв}(\Pi)} \geq \frac{E}{L},$$

звідки: $T_{Hдв}(\Pi)_{min} = I_d L / E$, а $\Delta U_{d(cm)} \geq E/2$ (потужність навантаження $P_H = 15$ кВт).

Для подальшого аналізу і синтезу системи введемо умовні поняття активної $I_{AB(a)}$ і реактивної $I_{AB(p)}$

складових середнього значення струму АБ за період $T_{кІППН}$. При цьому $I_{AB(p)} = I_{AB}(1-\gamma) \cdot i_d$ (γ – відносна тривалість імпульсів керування ключем ІППН) визначає заряд/розряд ємності, а $I_{AB(a)}$ визначає споживання активної потужності елементами схеми і навантаженням: $U_{AB} I_{AB(a)} = I_{AB(a)}^2 R_{II} + U_d i_d$.

Компенсувати статизм системи у регулюванні U_d (2) можна шляхом введення до виходу П-РН з відповідним коефіцієнтом передавання прогнозованого значення $I_{AB(a)}$. Його можна визначити з балансу потужностей ІППН при використанні датчиків (рис. 1): струму навантаження з боку АІН (ДС₁), напруги АБ (ДН_{дж}) і напруги навантаження (ДН_н):

$$I_{AB(a)} \approx I_d \frac{U_d}{U_{AB}}. \quad (3)$$

Вираз (3) не враховує втрати потужності в ІППН при перетворенні вихідної напруги АБ. При моделюванні [1] втрати потужності можуть бути враховані опором R_{II} у колі накопичення енергії дроселя. Але оскільки ККД ІППН дорівнює 98% [2, 4], можна очікувати мінімальну похибку від використання компенсації статизму, що майже не впливає на характеристики ТАЕП.

При синтезі РН_{дв} можна обрати обмеження струму $I_{AB(p)} = I_{AB(НОМ)} = 0,5 I_{ABmax}$, де I_{ABmax} – максимальний струм ключів ІППН, за допомогою блоку (О) на рис. 2. Цим виключається необхідність збільшення потужності ключів ІППН і збільшується надійність їх роботи. Крім того, необхідно врахувати обмеження до похідної у часі від завданого й поточного струмів джерела.

Для розрахунку сталої часу $T_{Hдв}(\Pi)$ пропорційного РН_{дв} з компенсацією статизму (рис. 2, а) можна

застосувати графоаналітичний метод згідно рис. 3, а, де показаний початок перехідного процесу відпрацювання системою стрибкоподібного сигналу завдання u_d^* при одночасному стрибку струму навантаження i_d (як найгірший випадок).

На рис.3: $\tau = 0,5I_{AB\max} L/E$ – час реакції контуру регулювання i_{AB} , визначає час затримки у часі перехідної функції регулювання U_d ; ΔU_d^* – значення стрибкоподібної зміни сигналу завдання U_d ; $\Delta I_d = I_d(0_+) - I_d(0_-)$ – стрибкоподібна зміна струму навантаження; $U_d(0_-)$, $I_d(0_-)$ – відповідно значення вихідної напруги і струму навантаження до початку перехідного процесу; T_f – стала часу фільтра (рис. 2).

Обмеження за $T_{H06(II)}$ у відповідності до похідної у часі від завданого і поточного значень струму джерела:

$$\frac{I_d(0_+)}{T_{H06(II)}} K_{33IAB} - \frac{I_d(0_+)^2}{cu_{AB}} K_{33IAB} \leq \frac{E}{L} K_{33IAB},$$

звідки:

$$T_{H06(II)} \geq \frac{1}{E/(I_d(0_+)L) + I_d(0_+)/cu_{AB}}.$$

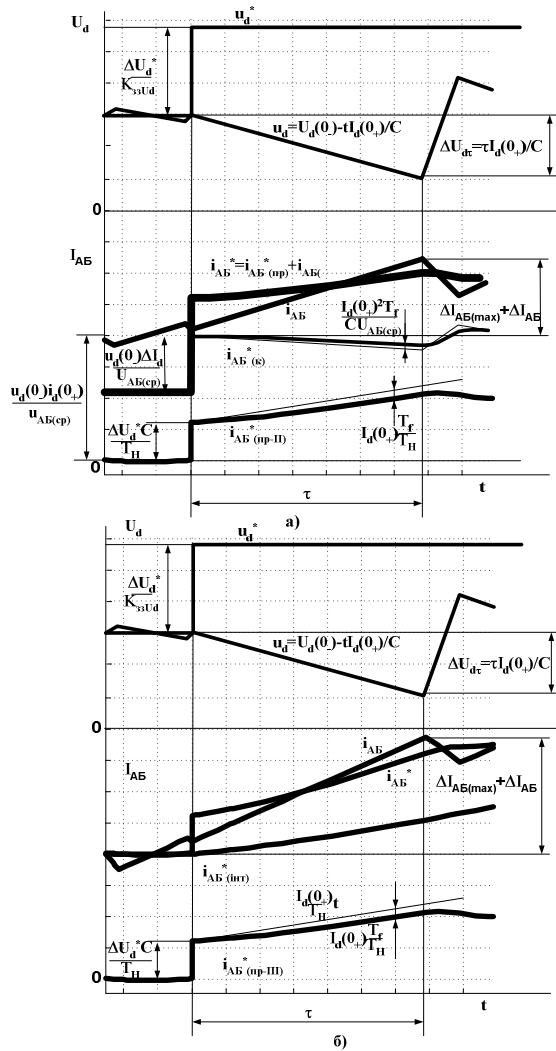


Рисунок 3 – Визначення сталої часу T_H : а) П-РН з компенсацією статизму; б) ІІ РНдв

Виключення статичної похибки можливе при використанні інтегрально-пропорційного (ІІ) РНдв [10] з передавальною функцією:

$$W_{PHдв}(s) = \frac{K_{33IAB}}{K_{33Ud}} \frac{C}{T_{Hдв(II)}} \frac{aT_{Hдв(II)}s + 1}{aT_{Hдв(II)}s},$$

де $T_{H06(III)}$ – стала часу ІІ РНдв; a – коефіцієнт РНдв.

Подібно РНдв з компенсацією статизму у структурі з ІІ РНдв (рис. 2, б) визначення $T_{H06(III)}$ і коефіцієнта a можливе графоаналітичним методом згідно рис. 3, б, де показаний початок перехідного процесу відпрацювання системою стрибкоподібного сигналу завдання u_d^* при одночасному стрибку струму навантаження i_d (як найгірший випадок).

Для того, щоб амплітуда пульсацій струму джерела ΔI_{AB} не збільшувалася за рахунок ΔI_{AB}^* (рис. 3, а-б), необхідне встановлення фільтра 1-го порядку із сталою часу T_f . У результаті моделювання роботи схеми з параметрами згідно з [4] ($L=2,5$ мГн, $C=1$ мФ, $I_d=27,5$ А, $R_{AB}=0,07$ Ом, $R_{III}=0,0035$ Ом, $E=130$ В, $\Delta I_{AB}=10$ А) з'ясувалося, що у фільтрі достатньо сталої часу $T_f=0,5$ мс, при цьому ΔI_{AB} відповідає заданому значенню.

У гальмівному режимі прийемо структуру системи автоматичного регулювання, аналогічну до режиму двигуна. При використанні релейного регулятора струму у генераторному режимі необхідно, щоб VT2 вмикався за умови $i_{AB}^* > i_{AB}$. Але оскільки ці значення негативні, тоді РРСген буде формувати логічний сигнал керування VT2 U_{k_VT2} , що буде інверсним до U_{k_VT1} (рис. 2, а, б).

Подібно структурі САРНдв, у САРНген постає необхідність використання безперервного РНген ІІ-типу або ІІ-типу з каналом компенсації статизму.

Оскільки структура вихідної ланки ІІПН [1] залишається незмінною (струми – негативні), тоді РНген компенсує збільшення u_d . При цьому стала часу $T_{Hген}$ не має обмежень, оскільки задане і поточне значення струму АБ знаходяться у протифазі. Так, при ввімкненні VT2 i_{AB} збільшується у напрямку заряду АБ і має негативну похідну ($di_{AB}/dt < 0$). При цьому u_d зменшується, а різниця її заданого і поточного значень збільшується ($di_{AB}^*/dt > 0$). Якщо ж навпаки VT2 розмикається, знак похідних змінюється на протилежний. Тоді можна обрати $T_{Hген} = T_{H06}$.

Оскільки обидва транзистори не можуть працювати одночасно, тому їх сигнали керування U_{k_VT1} і U_{k_VT2} (рис. 2) блокуються пристроєм блокування імпульсів (ПБІ), що визначає режим роботи ІІПН і забезпечує керування тільки одним з його двох транзисторів. При цьому робота ПБІ може організуватися відповідно значенню i_{AB}^* (рис. 2).

У статичному режимі регулювання u_d , $I_{AB(p)}=0$, якщо $du/dt > 0$, $I_{AB(p)} > 0$ і навпаки: якщо $du/dt < 0$, $I_{AB(p)} < 0$. Таким чином, у процесі роботи ІІПН може бути необхідним відпрацювання різнополярних значень струмів $[I_{AB(a)} + I_{AB(p)}]$ і i_d . При цьому ТАЕП і ІІПН працюють у різних режимах. Якщо контролювати полярність значення i_{AB}^* , можна врахувати зміну полярності різниці $[I_{AB(a)} + I_{AB(p)}]$ відносно i_d .

Контроль напруги здійснюється у РН, на вхід якого надходить різниця між завданням і поточним значенням u_d . Отже, при збільшенні u_d зменшується i_{AB} , що є вихідним сигналом РН. Інерційність даного способу буде відповідати інерційності РН, що є меншою за інерційність при зміні електромагнітного моменту АД [11].

На рис. 4 показані осцилограми перехідних процесів відпрацювання системою збурення за навантаженням ($R_{AB}=0,07\text{ Ом}$, $R_{III}=0\text{ Ом}$, $E=130\text{ В}$, $\Delta I_{AB}=10\text{ А}$) з П-РН і компенсацією статизму (криві 2, $T_{H(II)}=2,6\text{ мс}$) і ІІ-РН (криві 1, $T_{H(III)}=2,5\text{ мс}$, $a=2$). З них видно, що зі статичних систем (П-РН, ІІ-РН і компенсацією статизму, П-РН з розгорткою ШІМ [8]) найменшим статизмом характеризується САРН з П-РН і компенсацією статизму. При цьому динамічні властивості цих систем будуть майже однаковими (рис. 4, а, б, перехідні функції 2, 3, 4). Утім, регулювання U_d у САРН з ІІ-РН характеризується значною динамічною похибкою (до шести разів більшою, рис. 4, в) і збільшеною у три рази тривалістю перехідного процесу відпрацювання збурення з боку навантаження, у порівнянні з П-РН і компенсацією статизму. Динамічна похибка залежить від величини стрибків навантаження (рис. 4, б, в, г), що можуть постійно збурювати систему у ТАЕП. Слід зазначити також, що система [8] має негативний статизм, що зменшує діапазон регулювання U_d .

Втім, при використанні компенсації статизму з визначенням $I_{AB(a)}$ не враховується зменшення напруги u_{AB} на величину $i_{AB}R_{III}$, що буде визначати статизм цієї системи. Оскільки у [2, 4] показано, що при $P_H=15\text{ кВт}$, $R_{III}=0,03\text{ Ом}$, отже максимальний статизм системи за навантаженням $[I_{AB(ном)} - I_{AB(a)}] T_H/C \approx 15\text{ В}$ (крива 1 на рис. 4, а) або 2,8 % від номінального значення $U_{d(НОМ)}=535\text{ В}$. Отже можна зробити висновок, що компенсація статизму дає найкращі результати і може бути використана при скалярному і векторному керуванні швидкістю АД у ТАЕП.

Подальше зменшення статизму цієї системи можливе за рахунок: 1) збільшення ємності конденсатора C , при використанні обмеження заданого значення струму джерела. При цьому зменшується статична похибка у регулюванні, проте перехідний процес характеризується збільшенням $I_{AB(p)}$; 2) урахування падіння напруги у ІІІІН $R_{III}I_{AB}$ при визначенні вхідної напруги ІІІІН; 3) при скалярному розімкненому керуванні, коли збільшення C є можливим, оскільки зміна сигналу завдання вихідної напруги змінюється достатньо повільно.

Висновки. У роботі доведено, що у системі автоматичного регулювання з внутрішнім контуром струму джерела і зовнішнім контуром регулювання вихідної напруги імпульсного перетворювача постійного струму є доцільним використання регулятора напруги пропорційного типу з компенсацією статизму з використанням прогнозованого значення

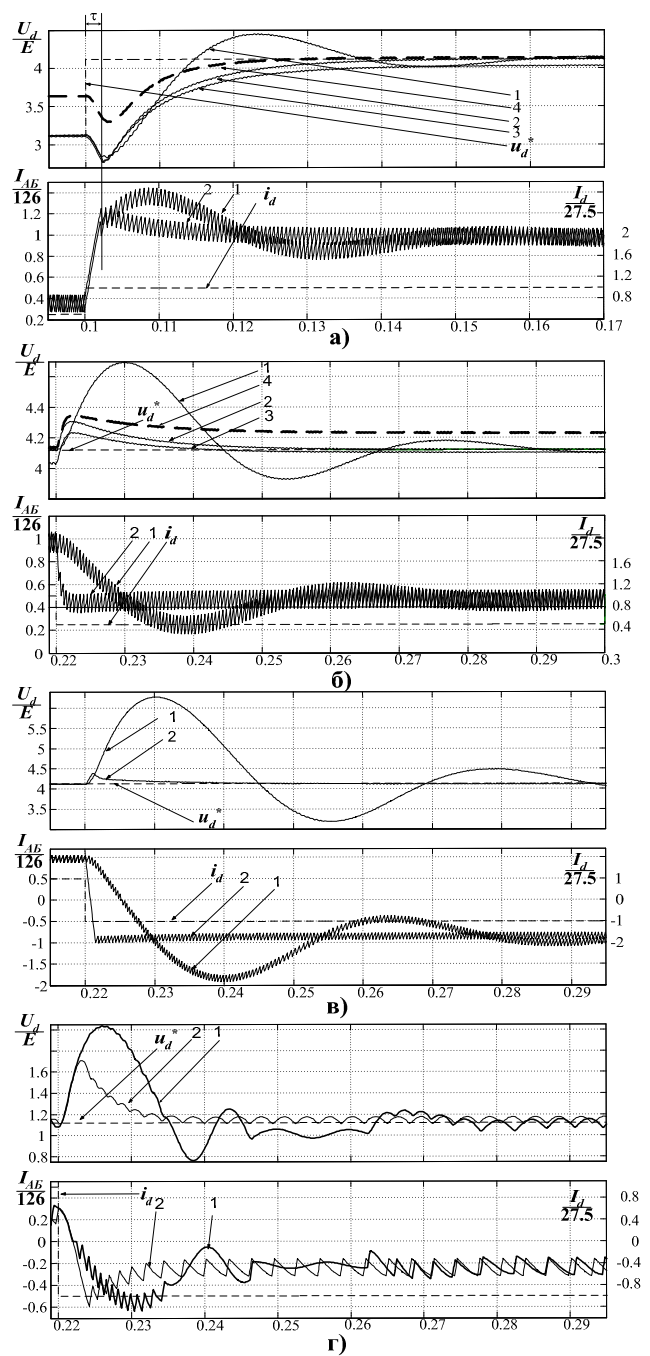


Рисунок 4 – Перехідні процеси відпрацювання різних збурень системою: 1) ІІ РН; 2) П РН з компенсацією статизму $R_{III}=0\text{ Ом}$; 3) П РН з компенсацією статизму $R_{III}=0,0035\text{ Ом}$; 4) Розгортка ШІМ [8]

активної складової струму джерела. Це дозволяє, у порівнянні з пропорційно-інтегральним регулятором напруги, втричі зменшити тривалість перехідного процесу і до 6 разів – динамічну похибку при відпрацюванні збурень з боку навантаження. Незважаючи на те, що помилка у регулюванні складає 3 %, використання компенсації статизму є доцільним у тяговому асинхронному електроприводі з низьковольтним джерелом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шавѐлкин А.А., Мирошник Д.Н. Преобразователь частоты с импульсным преобразователем в звене постоянного тока // Вісник національного університету “Львівська політехніка”. Зб. наук. праць “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”. – 2003. – № 485. – С. 156–163.
2. Шавѐлкин А.А., Мирошник Д.Н. Расчет потерь мощности в силовых ключах преобразователя частоты с промежуточным импульсным преобразователем напряжения // Електротехніка та енергетика: наук. пр. ДонНТУ. – Донецьк, 2005. – Вип. 98. – С. 116–120.
3. Особенности расчета силового дросселя для импульсных преобразователей постоянного напряжения / Е.Б. Ковалев, А.А. Шавѐлкин, Д.Н. Мирошник // Електротехніка та енергетика: наук. пр. ДонНТУ. – Донецьк. – 2006. – Вип. 112. – С. 58–62.
4. Мирошник Д.Н. Асинхронный электропривод с частотным управлением при регулировании напряжения в звене постоянного тока // Гірничі електромеханіка і автоматика: Наук.-техн. зб. – НГУ Дніпропетровськ. – 2007. – Вип. 79. – С. 147–153.
5. Казанцев Ю.М. Релейно-импульсное управление в полупроводниковых преобразователях // Электричество. – 1998. – № 3. – С. 58–63.
6. Аванесов В.М. Релейное управление следящими статическими преобразователями. Ч. 1. Структуры систем управления: анализ и синтез // Электричество. – 2000. – № 10. – С. 45–53.
7. Бирзникс Л.В. Импульсные преобразователи постоянного тока. – М.: Энергия. – 1974. – 256 с.
8. Казанцев Ю.М. Формирование квазискользящих режимов в импульсных преобразователях с ШИМ // Электричество. – 1993. – № 12. – С. 45–49.
9. Коцегуб П.Х., Толочко О.И. Компенсация статизма по нагрузке в системе вентильного электропривода с обратной связью по Э.Д.С преобразователя // Известия высш. уч. заведен. «Электромеханика». – 1977. – № 11. – С. 1246–1251.
10. Коцегуб П.Х. Синтез вентильных приводов постоянного тока: Уч. пособие. – Донецьк, ДПИ. – 1983. – 108 с.
11. Шавѐлкин А.А., Мирошник Д.Н. Особенности реализации векторного управления в асинхронном электроприводе при регулировании напряжения в звене постоянного тока // Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХП», 2008. – Вип. 30. – С. 431–432.

Стаття надійшла 29.06.2011 р.
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.
Прусом В.В.

КОМПЕНСАЦИЯ СТАТИЗМА ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПОВЫШАЮЩЕГО ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*А. А. Шавѐлкин, к.т.н., доц., Д. Н. Мирошник, асс.
Донецкий национальный технический университет
ул. Артема, 58, 83001, г. Донецк, Украина
E-mail: sha@dgtu.donetsk.ua*

Предложена компенсация статизма по нагрузке для системы автоматического регулирования выходным напряжением повышающего импульсного преобразователя методом определения активного тока источника. Это позволяет значительно улучшить динамику контура регулирования выходного напряжения преобразователя. При этом максимальный статизм системы не превышает 3 %, что позволяет использовать систему в тяговом асинхронном электроприводе с аккумуляторной батареей.

Ключевые слова: импульсный преобразователь, регулятор напряжения, компенсация статизма по нагрузке.

ERROR INDEMNIFICATION AT OUTPUT VOLTAGE CONTROL OF STEP-UP CONVERTER

*A. Shavyolkin, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., D. Miroshnik, ass.
Donetsk National Technical University
vul. Artema, 58, 83001, Donetsk, Ukraine
E-mail: sha@dgtu.donetsk.ua*

For automatic control system output voltage of step-up converter, it is offered error indemnification on loading by a method of definition of an active source current. It allows to improve considerably dynamics of an output voltage. Thus the maximum static error of system doesn't exceed 3 % that allows to use system in the traction asynchronous electric drive with the storage battery.

Key words: step-up converter, voltage controller, error indemnification on loading