

ОПТИМІЗАЦІЯ ІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ГАЛЬМУВАННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

© Поджаренко В.О., Дрючин О.О., Васілевський О.М., 2005

Розглянуто умови оптимальної передачі енергії двигуна постійного струму під час його гальмування до вторинної мережі живлення, а також мінімізація рівня пульсацій струму гальмування при широтно-імпульсному, частотно-імпульсному і релейному регулюванні струму.

The optimal conditions for transmitting of direct current motors energy under the braking to the secondary power sources are defined in this work. Also, the problem of the minimal current pulsation under the braking with the wide pulse, frequency pulse and relay control is considered.

1. Вступ

У системах електропривода постійного струму, особливо на електротранспорті, для гасіння механічної енергії двигуна постійного струму (ДПС) нарівні з механічними засобами гальмування широко використовують і електричні види гальмування: електродинамічне, коли енергія передається до баластного опору, і рекуперативне – з передаванням енергії до мережі або до іншого споживача в цій мережі. 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 постійний струм гальмування I_0 [1].

2. Аналіз стану досліджень та публікацій

Задача імпульсного регулювання під час гальмування ДПС частково розглянута в [1, 2]. Оптимізація цієї задачі є важливою при побудові ефективних алгоритмів керування ДПС з високою точністю та швидкодією.

3. Формування цілей статті

З огляду на вищесказане метою статті є розробка математичного апарату для оптимізації імпульсного регулювання ДПС під час гальмування та дослідження його режиму роботи.

4. Виклад основного матеріалу

Спрощену еквівалентну схему ДПС і мережі під час гальмування можна зобразити у вигляді, наведеному на рис. 1.

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 :

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

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 джерелом вторинного 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.

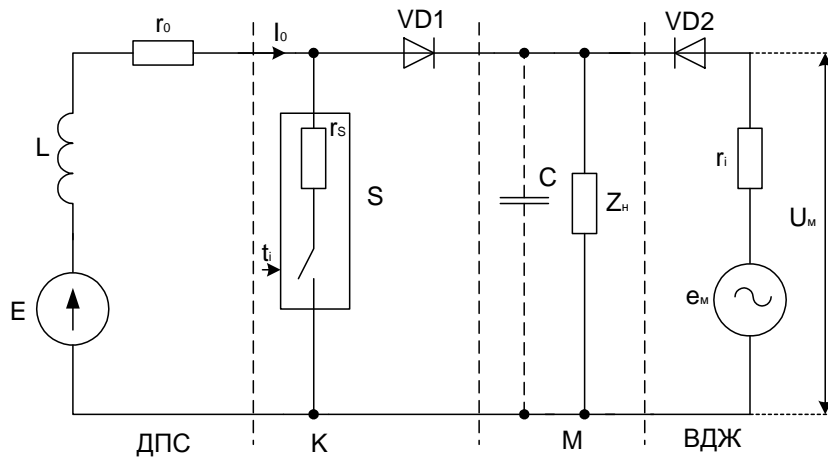


Рис. 1. Еквівалентна схема ДПС і мережі під час гальмування

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

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

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 :

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

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_H . 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:

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

де $W_{r\Pi}$ – енергія, яка втрачається на ДПС і ключі $VD1$.

Ефективність гальмування визначимо максимумом енергії двигуна, яка передається до навантаження, тобто коефіцієнтом рекуперації:

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

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:

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

але значення коефіцієнта рекуперації η :

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

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

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

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

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

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

Значення приросту струму ΔI визначається з допустимого рівня 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

$$T_p = t_i / \gamma_p = \tau (\Delta I / \Delta I_m) / (1 - r / R) \cdot \lim_{x \rightarrow \infty} \sqrt{b^2 - 4ac} \quad (12)$$

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).

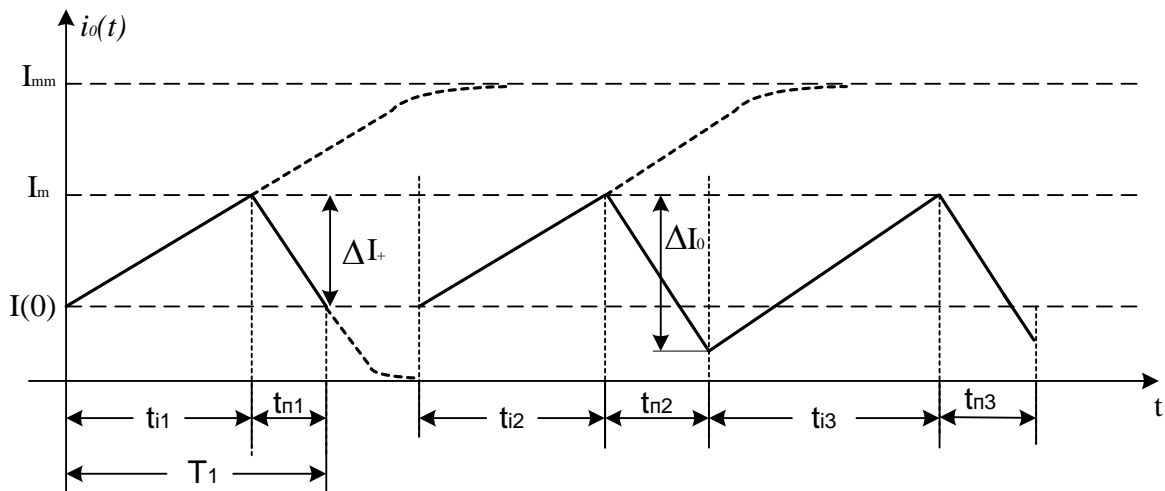


Рис. 2. Зміна струму гальмування при регулюванні з ШІМ

Додатний приріст

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

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

$$t_{II} = t_i \frac{(K_i - 1 + \delta)}{1 + \delta} \cdot \frac{\tau_e}{\tau} \approx t_i (K_i - 1) \frac{\tau_e}{\tau}. \quad (16)$$

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

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] 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 [2], такий спосіб спрощує схему керування, але ускладнює силовий ФНЧ, параметри якого мають визначатись за максимально можливими тривалостями 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 [3] (рис. 3).

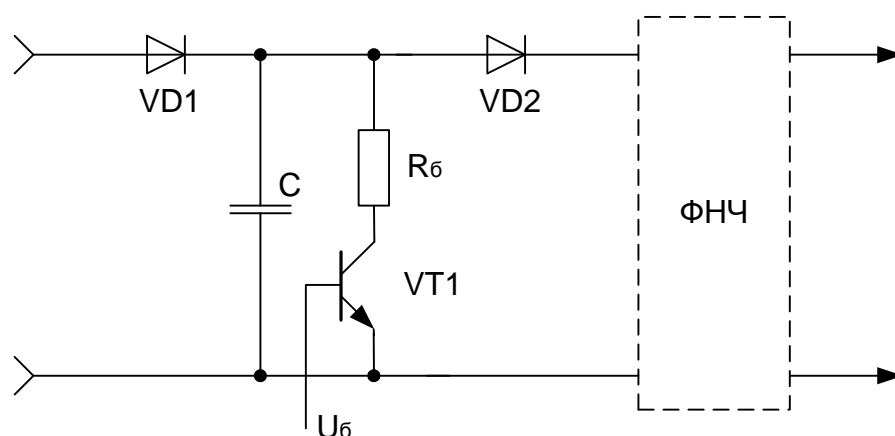


Рис. 3. Схема узгодження ДПС з мережею в режимі гальмування

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 VT2, 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.

5. Висновки

Отже, оптимізація режиму гальмування ДПС, зокрема при використанні ШІМ стає можливою при введенні проміжного накопичення енергії і додаткового її споживання. Забезпечуються безпечні режими електропривода і мережі, як при різкій зміні стану мережі, так і електропривода, наприклад при розриві струмознімача .

Ефективність таких заходів була експериментально підтверджена при керуванні і гальмуванні тягового двигуна потужністю 120 кВт.

1. *Электрические машины и микромашины / Д.З. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М., 1990.* 2. *Быстродействующие электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями / М.Е. Гольц, А.Б. Гудзенко, В.М. Остреров и др. – М., 1986.* 3. Пат. 47111А, МКІ Н02 Р3/08. *Спосіб гальмування двигуна постійного струму та пристрій для його реалізації / О.О. Дрючин; Опубл.17.06.02, Бюл. №6.*

УДК 621.317.77

В.О. Поджаренко, В.Ю. Кучерук, В.М. Севастьянов, О.П. Войтович

Вінницький національний технічний університет,
кафедра метрології і промислової автоматики

ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ДЛЯ ПОВІРКИ ТАХОМЕТРІВ

© Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М., Войтович О.П., 2005

Виконано дослідження та оцінювання достовірності відтворення зразкового сигналу моделлю системи для повірки тахометрів у динамічному режимі. Показано, що при різних законах розподілу шуму, зокрема і нормальному, на виході системи отримуємо сигнал з похибкою, відмінною від нормального.

The reliability of a reference signal reproduction by model of system for checking tachometers in a dynamic mode is investigated and estimated in this article. It is shown, that at different noise signals including normal, in system output we received a signal with an error which distribution differs from normal.

1. Вступ

Вимірювання кутової швидкості є доволі важливим для визначення характеристик електродвигунів. Зокрема, залежність кутової швидкості в часі є вихідною для опосередкованих вимірювань кутового пришвидження, моменту інерції ротора, динамічного моменту. Вимірювання кутової швидкості в сучасній техніці здійснюється за допомогою тахометричних перетворювачів з нормованими метрологічними характеристиками у статичному режимі. Проте сучасні інформаційно-вимірювальні системи все частіше працюють в динамічних режимах, що вимагає нормування метрологічних характеристик тахометричних перетворювачів у цьому самому режимі. Однак наявне метрологічне забезпечення не дає змоги повірять тахометри в динамічному режимі, а отже, і визначити їх динамічні метрологічні характеристики.