

Висновки. Запропонована система керування формує статичні тягові характеристики та обмежує максимальний момент частотно керованого асинхронного електроприводу без застосування функціональних перетворювачів, забезпечуючи при цьому задовільну якість перехідних процесів регульованих координат.

1. Лисовская И.С., Миледин В.К., Начинкин Б.Н. Выбор характеристик регулирования асинхронного двигателя троллейбуса // *Электротехническая промышленность. Сер. Тяговое и подъемно-транспортное оборудование.* – 1980. – Вып. 5 [71]. – С. 8. 2. Ефремов И.С., Калошикина Л.С., Карасев С.И. Перспективы применения асинхронного электропривода на городском транспорте // *Электричество.* – 1984. – № 10. – С. 21–26. 3. Зачек О.І. Програмно-комп'ютерна система керування в тяговому асинхронному електроприводі // *Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”.* – 1999. – № 372. – С. 59–64. 4. Карплюк Л.Ф. Вибір системи регулювання для електроприводів транспортних механізмів // *Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”.* – 1997. – № 334. – С. 57–59. 5. James N. Nash. Direct Torque Control, Induction Motor Vector Control Without an Encoder // *IEEE Trans. Ind. Electronics.* – March/April 1997. – Vol. 33, N 2. – P. 333–341.

УДК 621.313.2:536.755

А.Р. Когут

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕАП

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ВТРАТ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕНЕРГІЇ

© Когут А.Р., 2005

Досліджено структуру енергетичних втрат неабсолютно спряженого термодинамічного перетворювача енергії. Отримані результати застосовано до електромеханічного перетворювача енергії, яким є електропривід постійного струму з шунтуванням якоря двигуна.

The structure of energy losses of a thermodynamical energy converter with a non-absolute coupling was researched here. The results reached here to the electromechanical energy converter, which is direct current electric drive with a motor's rotor shunting were appeared.

Постановка проблеми. Описуючи різного типу електроприводи (ЕП) постійного струму та досліджуючи їх з точки зору термодинаміки нерівноважних процесів (ТД НП), часто постає проблема коректного визначення термодинамічних потоків та сил. Особливо актуальною ця проблема стає при дослідженні ЕП, ступінь спряження потоків енергії яких не є максимальним. Тому правильно проаналізувавши шляхи протікання енергетичних потоків, можна оптимізувати функціонування ТД перетворювача енергії (ПЕ), наприклад, з погляду мінімізації втрат енергії в ньому.

Аналіз останніх досліджень. Розглядаючи електромеханічний ПЕ – двигун постійного струму (ДПС) з точки зору ТД НП, були описані його статичні [1, 2] та динамічні [3] режими роботи. При цьому було введено систему відносних одиниць, що дало змогу, крім уніфікації опису і спрощення аналізу, отримати ряд універсальних залежностей, які забезпечують оптимальні з різних точок зору режими роботи [1–3]. На жаль, мало уваги було приділено ЕП з неабсолютним спряженням виходу і входу, а точніше – їх енергетичним особливостям.

Мета роботи. Математично описати та дослідити складові втрат потужності в лінійному ТД ПЕ залежно від ступеня спряження вхідного та вихідного потоків. На прикладі ЕП постійного струму продемонструвати важливість отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу. Термодинамічний перетворювач вільної енергії з одним вхідним та одним вихідним енергетичними каналами, подано “чорною скринькою”, що перетворює вільну вхідну енергію у вільну вихідну енергію, як відомо з [4], загалом описується системою лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} J_1 = L_{11}X_1 + L_{12}X_2 \\ J_2 = L_{21}X_1 + L_{22}X_2 \end{cases}, \quad (1)$$

де J_1, J_2 – відповідно підібрані термодинамічні вхідний та вихідний потоки; X_1, X_2 – термодинамічні сили; L_{jk} – “феноменологічні” коефіцієнти (згідно зі співвідношеннями взаємності Онзагера $L_{jk} = L_{kj}$).

Поглинання енергії на вході та її утворення на виході є можливим за додатних значень величин J_1, X_1, X_2 та $J_2 < 0$ ($L_{11} > 0, L_{22} > 0, L_{12} < 0$) [4]. При цьому вхідна потужність визначається як $P_1 = J_1X_1$, вихідна потужність – $P_2 = -J_2X_2$, а загальні втрати потужності в ТД ПЕ – $\Delta P_\Sigma = P_1 - P_2$.

Враховуючи вищесказане, можна записати (далі знаки модулів опускаємо, а кожен величину вважаємо додатною за визначенням):

$$\begin{cases} |J_1| = |L_{11}| \cdot |X_1| - |L_{12}| \cdot |X_2| \\ -|J_2| = -|L_{21}| \cdot |X_1| + |L_{22}| \cdot |X_2| \end{cases}. \quad (2)$$

Абсолютно спряжений ТД ПЕ

Спряженість вхідного та вихідного процесу характеризує ступінь спряження [2, 4]:

$$q = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11}L_{22}}}, \quad (3)$$

абсолютно спряжений ТД ПЕ характеризується значенням $q = -1$.

Розглядаючи перше рівняння системи (1), зрозуміло, що перший доданок у правій частині характеризує споживану потужність, другий – корисну, а вхідний потік – втрати потужності. Зробивши кілька елементарних перетворень у цьому рівнянні, можна записати

$$\frac{J_1^2}{L_{11}} = X_1J_1 - \frac{L_{12}}{L_{11}}X_2J_1. \quad (4)$$

Отже, вихідна потужність:

$$P_2 = X_2J_2 = \frac{L_{12}}{L_{11}}X_2J_1.$$

Звідси, вихідний потік:

$$J_2 = \frac{L_{12}}{L_{11}}J_1. \quad (5)$$

Вихідний потік прямо пропорційний до вхідного потоку, тобто, описуючи абсолютно спряжений ТД ПЕ за допомогою системи (1), ми завжди маємо справу з однорідною системою рівнянь.

Визначаючи втрати потужності в системі як $\Delta P = \frac{J_1^2}{L_{11}}$, бачимо, що ΔP фактично є функцією одного параметра – вхідного потоку J_1 ; зрозумілим також є зміст кінетичного коефіцієнта L_{11} – це вхідна провідність ТД ПЕ стосовно зовнішніх впливів.

Зробивши певні перетворення в другому рівнянні системи (1), матимемо

$$-\frac{J_2^2}{L_{22}} = \frac{L_{21}}{L_{22}}X_1J_2 - X_2J_2.$$

За аналогією (див. вище) вхідна (споживана) потужність

$$P_1 = X_1 J_1 = \frac{L_{21}}{L_{22}} X_1 J_2,$$

звідки

$$J_1 = \frac{L_{21}}{L_{22}} J_2. \quad (6)$$

Підставивши (5) в (6) або проаналізувавши вираз для ступеня спряження, зрозуміло, що

$$L_{11}L_{22} = L_{12}L_{21}. \quad (7)$$

Якщо записати систему рівнянь (1) у матрично-векторній формі $\vec{J} = L \cdot \vec{X}$ (тут $\vec{J} = \|J_1, J_2\|^T$ – вектор потоків, $\vec{X} = \|X_1, X_2\|^T$ – вектор сил, $L = \|L_{ij}\|$ – матриця коефіцієнтів) та врахувати (7), то можна зробити висновок, що детермінант матриці коефіцієнтів абсолютно спряженого ТД ПЕ завжди дорівнює нулю:

$$\Delta = L_{11}L_{22} - L_{12}L_{21} = 0. \quad (8)$$

ТД ПЕ зі ступенем спряження, відмінним від -1

Розглядаючи такий ТД ПЕ, ми, очевидно, маємо справу із загальним випадком, а абсолютно спряжений ПЕ є лише частковим випадком. Отже, в такому разі детермінант матриці коефіцієнтів визначатиметься як

$$\Delta = L_{12}^2 \left(\frac{1}{q^2} - 1 \right)$$

(це легко показати, якщо зробити певні перетворення, використовуючи вирази (3) та (8)).

Тут варто зупинитись на фізичному змісті q . Так, у [4] його визначають як ступінь спряження вхідного та вихідного потоків. Фактично $q \neq -1$ можна трактувати як те, що вхідний потік J_1 витрачається на створення двох потоків: вихідного (корисного) J_2 та певного узагальненого залишкового потоку $J_{\text{зал}}$ (він переважно опосередковано є причиною залишкових втрат):

$$J_1 \equiv J_2 + J_{\text{зал}}.$$

З нашого погляду, наявність залишкового потоку, можна пов'язувати з додатковими втратами у тому випадку, якщо $J_{\text{зал}}$ не має відповідної йому сили, і саме тому такий ПЕ залишається ПЕ з одним входом та одним виходом.

Показовим прикладом такого ПЕ може бути склопакет. Світловий потік сонячного випромінювання потрапляє на поверхню скла, частина його проникає в приміщення (корисний потік), а частина відбивається, тим самим знижуючи інтенсивність освітлення всередині; енергетичний баланс у цьому випадку виглядає так, що вхідна енергія сонячного випромінювання перетворюється у вихідну енергію всередині, витрачається на нагрівання склопакета, а решта її “відбивається”, що теж вважається втратами. Стосовно електромеханіки, то одним з прикладів неабсолютно спряжених ПЕ є ЕП постійного струму з шунтуванням якоря (детально цей приклад розглянуто в [2]).

Розглядаючи неабсолютно спряжений ТД ПЕ в загальному випадку, варто повернутися до рівняння (4). Різниця полягатиме лише в тому, що доданок $-\frac{L_{12}}{L_{11}} X_2 J_1$, очевидно, не можна асоціювати лише з вихідною (корисною) потужністю $P_2 = -J_2 X_2$.

Знайдемо з першого рівняння системи (1) вхідну силу та підставимо її у друге рівняння цієї системи:

$$J_2 = \frac{L_{21}}{L_{11}} J_1 + L_{22} X_2 - \frac{L_{12} L_{21}}{L_{11}} X_2.$$

Перетворивши останні два доданки, матимемо

$$J_2 = \frac{L_{21}}{L_{11}} J_1 + L_{22} X_2 (1 - q^2).$$

Домножимо цей вираз на $-X_2$:

$$-J_2 X_2 = P_2 = -\frac{L_{21}}{L_{11}} J_1 X_2 + L_{22} X_2^2 (1 - q^2). \quad (9)$$

З рівняння (4) зрозуміло, що

$$-\frac{L_{12}}{L_{11}} X_2 J_1 = X_1 J_1 - \frac{J_1^2}{L_{11}} = P_1 - \Delta P. \quad (10)$$

Враховуючи рівність Онзагера, підставимо рівняння (10) у вираз (9)

$$P_2 = P_1 - \Delta P - L_{22} X_2^2 (1 - q^2).$$

Останній доданок характеризує втрати потужності, зумовлені неабсолютною спряженістю вхідного та вихідного потоків:

$$\Delta P_q = L_{22} X_2^2 (1 - q^2).$$

Оскільки за визначенням $L_{22} > 0$, то $\Delta P_q > 0$.

Отже, якщо потоки ТД ПЕ неабсолютно спряжені, то з'являється додаткова складова у загальних втратах потужності (очевидно, що за умови $q = -1$, $\Delta P_q = 0$):

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P + \Delta P_q,$$

тобто ми маємо справу з двома видами втрат.

Втрати потужності ΔP зумовлені дією вхідного потоку, тобто – це втрати від перетворення вхідного енергопотуку в цілому ТД ПЕ. Своєю чергою, втрати потужності ΔP_q , зумовлені дією вихідної сили (за неабсолютного спряження), – це втрати від перетворення вихідної енергії лише в тій частині ПЕ, яка, власне, і визначає неповну спряженість потоків.

Проаналізуємо графічно залежність втрат від приведенного відношення сил [4] $Z\chi$ (воно фактично визначає вихідну силу за незмінної вхідної сили будь-якого ТД ПЕ). Для цього необхідно пронормувати величини, які нас цікавлять на втрати потужності в ПЕ за відсутності вихідної сили $L_{11} X_1^2$ (це легко показати, проаналізувавши перше рівняння системи (1)). Отже:

– нормована споживана потужність

$$P_{1*} = \frac{P_1}{L_{11} X_1^2} = qZ\chi + 1;$$

– нормована корисна потужність

$$P_{2*} = \frac{P_2}{L_{11} X_1^2} = -Z\chi(Z\chi + q);$$

– нормовані втрати потужності від перетворення енергії в цілому ТД ПЕ

$$\Delta P_* = \frac{\Delta P}{L_{11} X_1^2} = (1 + qZ\chi)^2;$$

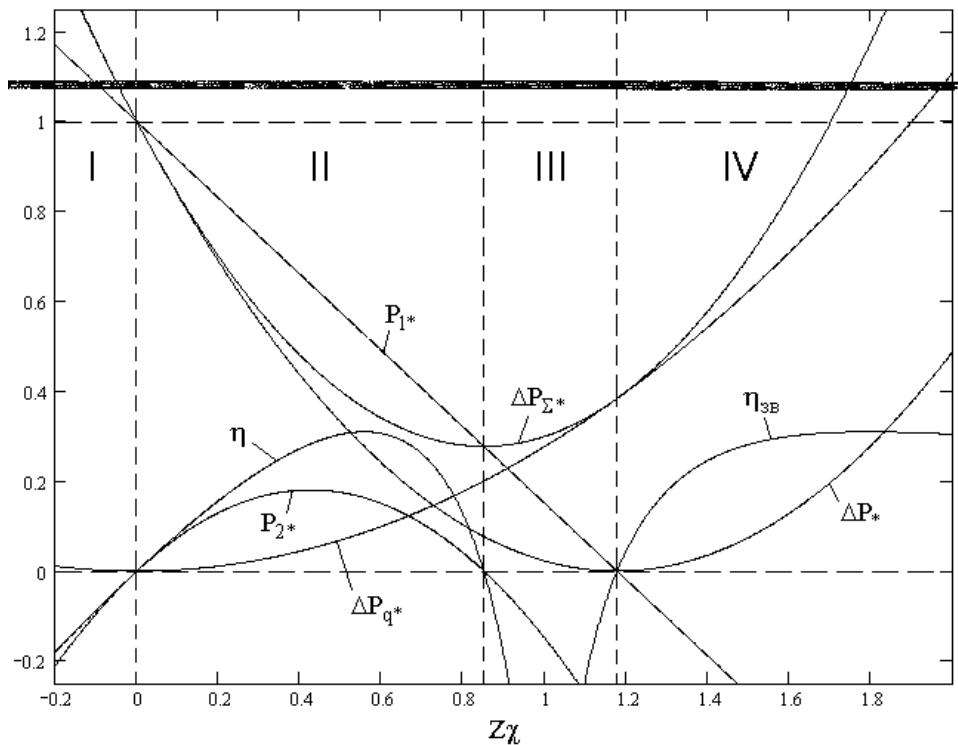
– нормовані втрати потужності від неабсолютного спряження ТД ПЕ

$$\Delta P_{q*} = \frac{\Delta P_q}{L_{11} X_1^2} = (Z\chi)^2 (1 - q^2);$$

– нормовані загальні втрати потужності

$$\Delta P_{\Sigma*} = \Delta P_* + \Delta P_{q*} = 1 + Z\chi(2q + Z\chi).$$

Побудуємо графіки функцій $P_{1*}(Z\chi)$, $P_{2*}(Z\chi)$, $\Delta P_*(Z\chi)$, $\Delta P_{q*}(Z\chi)$, $\Delta P_{\Sigma*}(Z\chi)$ та $\eta(Z\chi)$ (тут $\eta = P_{2*}/P_{1*}$ – термодинамічна ефективність перетворення вільної енергії [4]) за ступеня спряження $q = -0,85$.



Залежності нормованої вхідної, вихідної втрат потужності та термодинамічної ефективності перетворення енергії від приведенного відношення сил при $q = -0,85$

Коротко проаналізуємо отримані залежності. Для цього розіб'ємо вісь абсцис на чотири зони (I – IV) у напрямку зростання $Z\chi$ (рисунок).

Як бачимо, перша зона характеризується нормованою вихідною потужністю $P_{2*} < 0$. Тобто вхід і вихід ПЕ працюють один проти одного. Ця протидія є тим більшою, чим більш від'ємним є $Z\chi$. У цьому випадку і вхідна, і вихідна потужності є споживаними, тому фактично ПЕ працює на втрати, причому $\Delta P_{q*} < \Delta P_*$. Отже, неабсолютна спряженість ТД ПЕ в зоні I проявляється слабо. Щодо ЕП постійного струму з шунтуванням якоря цій зоні відповідає режим противмикання, який забезпечується активним моментом на валу, більшим від моменту короткого замикання.

Перехід з I до II зони характеризується так званою „точкою короткого замикання”, коли $Z\chi = 0$. Очевидно це викликано нульовою вихідною силою: $X_2 = 0$ (саме тому такою є назва), а значить $P_{2*} = 0$. При цьому нормована вхідна потужність є потужністю загальних втрат: $P_{1*} = \Delta P_* = \Delta P_{\Sigma*} = 1$. Тобто $P_1 = \Delta P = \Delta P_{\Sigma} = L_{11}X_1^2$ – у цій точці ПЕ все ще працює виключно на втрати, які називаються втратами короткого замикання і визначаються єдиною складовою ΔP_* (за рахунок рівності $X_2 = 0$, втрати від неабсолютної спряженості $\Delta P_{q*} = 0$).

Друга зона, зазвичай, є робочою зоною, у випадку ЕП – режимом двигуна. Вона характеризується корисною нормованою вихідною потужністю $P_{2*} > 0$ і споживаною нормованою вхідною потужністю $P_{1*} > 0$. Тут парабола $P_{2*}(Z\chi)$ досягає свого максимуму. Для різних ступенів

спряження він є різним, тому часто функціонування систем з ТД ПЕ намагаються оптимізувати з точки зору максимуму вихідної потужності, хоча, як бачимо, ця точка є далеко не оптимальною з точки зору термодинамічної ефективності перетворення енергії η . Детальніше це описано в [1, 3, 4]. Ця зона характеризується монотонним зростанням $\Delta P_{q^*}(Z\chi)$ та більш інтенсивним спаданням $\Delta P_*(Z\chi)$. Тому нормовані загальні втрати потужності $\Delta P_{\Sigma^*}(Z\chi)$ спадають, досягаючи свого мінімуму в точці переходу з II до III зони.

Тим не менше, мінімум $\Delta P_{\Sigma^*}(Z\chi)$ означає відсутність корисної роботи на виході: $P_{2^*} = 0$, тобто процес перетворення енергії є безрезультатним (неефективним). Зрештою, це підтверджує крива $\eta(Z\chi)$ – у цій точці $\eta = 0$. Як бачимо вдруге (і востаннє): $P_{1^*} = \Delta P_{\Sigma^*}$ – уся споживана потужність є втраченою (ці втрати будуть зменшуватись до нуля з наближенням ступеня спряження ТД ПЕ до абсолютного $q = -1$). Проте у цьому випадку мова йде про так звану „точку неробочого ходу” (рівність $P_{2^*} = 0$ пояснюється саме тим, що $J_2 = 0$).

Результат перетворення енергії в III зоні є аналогічним до того, що був описаний у випадку I зони. Відмінність полягає лише у тому, що в III зоні від’ємність P_{2^*} зумовлена $J_2 < 0$, тоді як у I зоні – $X_2 < 0$. Для ЕП постійного струму з шунтуванням якоря цій зоні відповідає режим квазірекуперативного гальмування, коли струм якоря двигуна змінює свій знак, проте потужність гальмування разом із незначною потужністю, споживаною з мережі, втрачається в опорах. Основною складовою втрат є втрати від неідеальності спряження ΔP_{q^*} . ΔP_* зменшується і досягає нуля в точці переходу з III до IV зони: $Z\chi = -\frac{1}{q}$. Відсутність втрат від перетворення енергії вхідного потоку в цій точці зумовлена відсутністю цього потоку. Зрозуміло, що при цьому нульовою є нормована вхідна потужність P_{1^*} . Загальні втрати визначаються дією вихідної сили X_2 , тобто уся вихідна потужність, а вона є споживаною потужністю, витрачається. Саме тут стає зрозумілим зміст втрат потужності від неабсолютної спряженості ΔP_{q^*} , як втрат від перетворення енергії в тих колах ПЕ, які визначають його неабсолютну спряженість. Адже виконання умови $q \neq -1$ означає можливість споживання потужності на виході $P_{2^*} < 0$ за умови відсутності корисної потужності на вході (тобто $J_2 \neq 0$ при $J_1 = 0$). Накінець варто зауважити, що у випадку абсолютно спряженого ПЕ III зони (як зони з описаними вище характеристиками) взагалі не існує.

Перехід у IV зоні вхідним потоком рівня нуля і постійне його (потоку) зменшення одночасно з від’ємним J_2 визначає новий режим роботи ПЕ, коли від’ємна нормована вихідна потужність P_{2^*} є споживаною потужністю, а від’ємна нормована вхідна потужність P_{1^*} – корисною; перетворення енергії здійснюється в зворотному напрямку. Для ЕП це є класичний режим рекуперативного гальмування. На жаль, зі зростанням X_2 параболічне спадання P_{2^*} і лінійне спадання P_{1^*} означає постійне збільшення нормованих сумарних втрат потужності ΔP_{Σ^*} (зростають обидві складові цих втрат). Зважаючи на зворотний напрямок перетворення вільної енергії, логічно ввести нову величину для характеристики ефективності її перетворення – термодинамічну ефективність зворотного перетворення вільної енергії – $\eta_{зв}(Z\chi) = \frac{1}{\eta(Z\chi)}$. Як бачимо, ця величина, досягнувши свого максимуму (приведене відношення сил, яке відповідає цій точці, залежить лише від q), надалі постійно зменшується.

Продемонструємо застосування отриманих результатів до електромеханічного ПЕ. Знайдемо втрати в ТД ПЕ, яким є електропривід постійного струму з шунтуванням якоря двигуна 2ПН225М ($P_n = 22$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 122$ А, $n_n = 1000$ об/хв, $R_\alpha = 0,1289$ Ом). ЕП з послідовним опором $R_n = 0,67$ Ом та шунтуючим опором $R_{ш} = 1,4$ Ом працює з частотою обертання $n = 0,6n_n$. Знайдемо втрати потужності в такому ЕП двома способами: традиційним [5] та запропонованим нами.

Кутова частота обертання вала двигуна:

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = 62,83 \text{ рад/с.}$$

Електромагнітний момент на валу:

$$M = \frac{\alpha k \Phi_H}{R} U - \frac{k \Phi_H^2}{R} \omega = 87,9 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Струм споживання електроприводу:

$$I_{\Pi} = \frac{1}{R \xi^2} U - \frac{\alpha k \Phi_H}{R} \omega = 136,76 \text{ А.}$$

Тут мають місце такі позначення [1, 2]:

$$\alpha = \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_{\Pi}} = 0,676; \quad \xi = \frac{1}{\sqrt{\alpha \left(1 + \frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{ш}}}\right)}} = 0,676; \quad R = R_{\text{я}} + \alpha R_{\Pi} = 0,582 \text{ Ом.}$$

Отже, корисна, спожита та втрати потужності:

$$P_2 = M\omega = 5523 \text{ Вт}; \quad P_1 = I_{\Pi} U = 30086 \text{ Вт}; \quad \Delta P_{\Sigma} = 24563 \text{ Вт.}$$

Вибравши вхідною силою напругу живлення U , вхідним потоком – струм ЕП I_{Π} , а вихідними відповідно – кутову швидкість ω та електромагнітний момент M , усі коефіцієнти системи рівні [1, 2]:

$$L_{11} = \frac{1}{R \xi^2} = 1,269; \quad L_{12} = \frac{\alpha k \Phi_H}{R} = -2,267; \quad L_{21} = -\frac{\alpha k \Phi_H}{R} = -2,267; \quad L_{22} = \frac{k \Phi_H^2}{R} = 6,538.$$

Ступінь спряження системи:

$$q = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11} L_{22}}} = -0,787.$$

Основні втрати та втрати від неабсолютного спряження:

$$\Delta P = \frac{J_1^2}{L_{11}} = 14738 \text{ Вт}; \quad \Delta P_q = L_{22} X_2^2 (1 - q^2) = 9825 \text{ Вт.}$$

Отже, сумарні втрати:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P + \Delta P_q = 24563 \text{ Вт.}$$

Обидва підходи дають ідентичний результат, а це означає, що запропонований підхід до оцінки втрат потужності в ТД ПЕ є правильним, загальнішим та інформативнішим, оскільки характеризує не лише загальні втрати, а і їх складові.

Висновки: 1. Досліджено структуру втрат енергії у неабсолютно спряженому ТД ПЕ, причому отримано два типи втрат, які визначаються відповідно нерівноважністю (швидкістю) перетворення вхідної енергії та ступенем спряження між входом і виходом системи.

2. Розроблено підхід щодо суперпозиції цих втрат під час аналізу загальних втрат потужності в системі у стаціонарних та нестаціонарних процесах її роботи.

3. На прикладі неповністю спряженого електромеханічного ПЕ – електроприводу постійного струму з шунтуванням якоря – продемонстровано дієвість отриманих результатів для аналізу енергетики цього електроприводу в різних режимах роботи.

1. Щур І.З. Застосування підходів нерівноважної термодинаміки для аналізу енергетичної ефективності електроприводів постійного струму // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2002. – № 452. 2. Щур І.З., Костинюк Л.Д., Козут А.Р. Електропривід за системою “джерело струму – двигун постійного струму” як термодинамічний перетворювач енергії // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2003. – № 479. 3. Козут А.Р., Щур І.З. Опис динамічних процесів у двигуні постійного струму з точки зору термодинаміки нерівноважних процесів // Вісн. Нац. ун-ту

“Львівська політехніка”. – 2004. – № 551. – С. 40–45. 4. Вестерхоф Х., ван Дам К. Термодинамика и регуляция преращений свободной энергии в биосистемах: Пер. с англ. – М., 1992. 5. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981.

УДК 62-83:621.313.3

Б.Л. Копчак

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕМА

СИСТЕМА НЕЧІТКОГО КЕРУВАННЯ НАПРУГИ АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

© Копчак Б.Л., 2005

Запропоновано систему автоматичного керування напруги автономної асинхронної генераторної системи з використанням нечіткого регулятора напруги. Розроблено її модель в середовищі MATLAB Simulink і проведено дослідження у різних режимах роботи.

The system of automatic control of voltage autonomous asynchronous generating system with fuzzy logic voltage regulator is offered. Model is designed and researches is carried out in different modes of operations using MATLAB Simulink.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку автономних джерел енергії широко використовується асинхронний генератор (АГ). Як об'єкт керування АГ з самозбудженням є складним, аналіз і синтез системи автоматичного керування (САК) його напруги ускладнюється в зв'язку з нелінійністю характеристики намагнічення АГ та дискретністю напівпровідникового перетворювача, який використовується для керування збудженням [1]. У разі використання АГ у вітроенергетичних установках (ВЕУ), які працюють в автономному режимі, проблема керування вихідної напруги і частоти ускладнюється у зв'язку з дією випадкових збурень у каналах швидкості обертання ротора і каналі навантаження і потребує свого розв'язання [1, 2]. Тому розробка САК напруги АГ з врахуванням нелінійності його характеристики, забезпечивши при цьому нечутливість вихідної напруги до зовнішніх збурень, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень. У відомих літературних джерелах більшість САК напруги АГ побудовані як одноконтурні, одноразовоінтегровальні системи стабілізації напруги. В [1] показано, що раціональним варіантом САК напруги АГ з самозбудженням є двоконтурна система підпорядкованого регулювання (СПР) напруги з внутрішнім контуром регулювання струму тиристорного компенсатора реактивної потужності (ТКРП) і зовнішнім контуром регулювання напруги. Проведено її дослідження за дії збурень в каналі швидкості. Проте під час її розробки використано лінеаризовану модель АГ, що уможливило оптимізувати параметри САК з певною похибкою, тому що не враховується нелінійність характеристики намагнічення у можливому діапазоні регулювання напруги АГ.

Розробка методів нечіткого керування робить їх перспективними у випадку керування напруги АГ, тому що про нього є багато апріорної інформації [3].

Задачі досліджень. Задачею досліджень є розробка системи нечіткого керування напруги АГ з самозбудженням для ВЕУ, яка забезпечує задані статичні і динамічні характеристики системи і є нечутливою до зовнішніх збурень.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 показано функціональну схему автономного асинхронного генератора з ТКРП (тиристорним перетворювачем з $R_k L_k$ -навантаженням) [1], в якому передбачена можливість регулювання таких координат: струму компенсатора та напруги АГ. Зворотні зв'язки за відповідними координатами реалізовані за допомогою давачів: струму ком пен-