

5. Для розрахованих 4 варіантів машин оптимальною, з погляду мінімізації РМ, шириною полюсів індуктора є

2p=10, рівномірний розподіл зубців – 5,7; 9,3; 12,9; 16,5 мм;

2p=10, нерівномірний розподіл зубців – 7,2; 14,3 мм;

2p=14, рівномірний розподіл зубців – 4,1; 6,6; 9,2; 11,7; 14,2 мм;

2p=14, нерівномірний розподіл зубців – 7,3; 12,4 мм.

Ширина "елементарного" зубця якоря в усіх випадках становила 8,5 мм.

1. Осідач Ю.В., Ткачук В.І. *Основи проектування вентильних реактивних двигунів // Електромеханіка. Теорія і практика.* – 1996. – С. 143–145. 2. Ткачук В. *Електромеханотроніка: Навч. посібник.* – Львів, 2001. – 404 с. 3. Никитенко А.Г. и др. *Программирование и применение ЭВМ в расчетах электрических аппаратов: Учеб. пособие для вузов по спец. "Электрические аппараты".* – М., 1990. – 231 с.

УДК 62-83:62-50

Я.Ю. Марущак, Л.С. Копчак

Національний університет "Львівська політехніка"

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА "КЕМЕК", СИНТЕЗОВАНОГО МЕТОДОМ УЗАГАЛЬНЕНОГО ХАРАКТЕРИСТИЧНОГО ПОЛІНОМА

© Марущак Я.Ю., Копчак Л.С., 2003

Наведені результати експериментальних досліджень типового електропривода "КЕМЕК", регулятори якого налаштовані відповідно до результатів синтезу системи, методом узагальненого характеристичного полінома. При цьому і для статичної, і для астатичної системи отримано перехідні процеси заданої швидкодії, що є вищою, ніж при штатному налаштуванні електропривода. У такому електроприводі існує монотонний аперіодичний закон зміни швидкості двигуна.

Results of experimental researches of the sample electric drive "KEMEK", regulators which one tuned according to results of synthesizing system by method of a generalized characteristic polynomial is reduced. Thus both for static, and for astatic the systems are obtained transient processes of given response rate, which one is higher, than at usual electric drive. In such electric drive the monotonic aperiodic law of speed of the motor engine takes place.

Суть проблеми та її актуальність. При синтезі системи автоматичного керування важливим є забезпечення стандартних форм перехідної функції вихідної координати регулювання. Ці форми опосередковано можна зобразити за допомогою нулів та полюсів передавальної функції системи. У свою чергу положення на комплексній площині, як нулів, так і полюсів передавальної функції електромеханічної системи визначаються певними параметрами системи, а саме: значеннями коефіцієнтів підсилення, в тому числі і зворотних зв'язків, параметрами різноманітних регуляторів, також параметрами об'єкта регулювання.

Метою роботи є забезпечення стандартних форм розподілу коренів характеристичного рівняння електроприводу КЕМЕК при заданій швидкодії відпрацювання керуючого впливу.

Основний матеріал. Синтезуємо відповідні регулятори типового електроприводу КЕМЕК. Використаємо для цього метод узагальненого характеристичного полінома [1–3]. У комплект електропривода входить: шестипульсний реверсивний тиристорний перетворювач типу 2РЕВ16; високомоментний двигун серії 1ПІ; силовий трансформатор типу Т1ЕВ; комутатор перемикання координат.

Параметри двигуна 1ПІ12, який використовується в даному електроприводі, є такими: $U_n = 60 \text{ V}$; $n_n = 500 \text{ об/хв}$; $M_n = 4,7 \text{ Нм}$; $I_{\max} = 54 \text{ А}$. Тахогенератор змонтовано в корпусі двигуна і характеризується $U_{\text{тгн}} = 20\text{V}$; $n_{\text{тгн}} = 500 \text{ об/хв}$.

Регулятор струму і схема струмообмеження налаштовуються на заводі для кожного конкретного двигуна та типового моменту інерції і в умовах експлуатації, як правило, не змінюються. Для розрахунку параметрів регуляторів струму та швидкості попередньо були проведені експерименти з визначення відповідних сталих часу та коефіцієнтів підсилення. Вони виявилися такими: $T_y = 0,023 \text{ с}$; $T_{\text{тп}} = 0,005 \text{ с}$; $K_{\text{тп}} = 20$; $R_{\text{як}} = 2,3 \text{ Ом}$; $J = 0,11 \text{ кгм}^2$; $T_m = 0,52 \text{ с}$; $C = 0,69 \text{ Вс}$; $K_{\text{дс}} = 0,147 \text{ В/А}$; $K_{\text{дш}} = 0,033 \text{ Вс}$. При диференціальному варіанті синтезу методом узагальненого характеристичного полінома [4] отрималися такі вирази передавальних функцій регуляторів струму $W_{\text{рс}}(p)$ і швидкості $W_{\text{рш}}(p)$:

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{\omega_{\text{OI}} R_y (1 + p T_{\text{тп}})(1 + p T_y)}{K_c K_{\text{тп}} p},$$

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{рш}}(p) &= \frac{\omega_{\text{ош}}^2 K_c T_m C}{K_{\text{ш}} R_y \omega_{\text{OI}}} \\ \omega_{\text{OI}} &= \alpha_1 \omega_{\text{ош}} \end{aligned} \right\},$$

де ω_{OI} , $\omega_{\text{ош}}$ – бажане значення середньгеометричного кореня контуру струму і швидкості; α_1 – коефіцієнт, який визначає вигляд стандартної форми; $K_{\text{тп}}$, $T_{\text{тп}}$, R_y , T_y , C – параметри тиристорного перетворювача та двигуна; K_c , $K_{\text{ш}}$ – коефіцієнти зворотних зв'язків за струмом та швидкістю відповідно.

Параметри регулятора струму, які отримали для різних бажаних значень ω_{OI} наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення виразів регулятора струму

$\omega_{\text{OI}}, \text{с}^{-1}$	Вирази регулятора струму
50	$0,0063p + 1,176 + (0,0255p)^{-1}$
100	$0,0126p + 2,352 + (0,0127p)^{-1}$
150	$0,0189p + 3,528 + (0,085p)^{-1}$
200	$0,0256p + 4,7 + (0,0064p)^{-1}$

У межах зображення тиристорного перетворювача аперіодичною ланкою першого порядку вираз ідеалізованого регулятора струму відповідає ПІД-ланці. З урахуванням передавальної функції реального диференціатора, передавальна функція регулятора струму $W_{\text{рс}}(p)$ матиме вигляд

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{\omega_{\text{OI}} R_y}{K_c K_{\text{тп}} (\tau_d p + 1)} \left\{ [T_y T_{\text{тп}} + (T_y + T_{\text{тп}}) \tau_d] p + (T_y + T_{\text{тп}} + \tau_d) + \frac{1}{p} \right\}.$$

Якщо $\tau_d \rightarrow 0$, то прийдемо до $W_{pc}(p)$ ідеалізованого ПІД-регулятора.

Тому в реальному електроприводі компенсація сталої часу $T_{тп}$ не відбувається, хоча в ідеалізованому варіанті виглядає, ніби ця компенсація існує. Слід відзначити, що це зауваження стосується всіх результатів, отриманих в роботі як при моделюванні, так і при експериментальних дослідженнях електромеханічних систем.

Значення $W_{рш}(p)$ регулятора швидкості для двох найпоширеніших стандартних форм (біноміальної ($\alpha_1 = 2$) та Баттерворта ($\alpha_1 = \sqrt{2}$)) наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Значення виразів регулятора швидкості

ω_{OI}, c^{-1}	$\omega_{ош}, c^{-1}$	$W_{рш}(p)$	Стандартна форма
50	25	5,90	біноміальна
	35,35	8,34	Баттерворта
100	50	11,80	біноміальна
	70,71	16,68	Баттерворта
150	75	17,70	біноміальна
	106	25,02	Баттерворта
200	100	23,60	біноміальна
	141,42	33,36	Баттерворта

Відповідно до даних табл. 1 і 2 здійснювали налаштування електропривода КЕМЕК. Так на рис. 1 показані перехідні процеси запуску системи для струму та швидкості при двох крайніх значеннях ω_{OI} . На рис. 1, *а* перехідні процеси відповідають $\omega_{OI} = 50 c^{-1}$, а на рис. 1, *б* – $\omega_{OI} = 200 c^{-1}$ при забезпеченні стандартної біноміальної форми. Цим двом процесам відповідає час досягнення усталеного значення $t_{y1} = 0,08 c$ ($\omega_{OI} = 50 c^{-1}$) і $t_{y2} = 0,04 c$ ($\omega_{OI} = 200 c^{-1}$). Для порівняння динамічних характеристик електропривода, зі штатним налаштуванням і з налаштуванням відповідно до результатів синтезу методом узагальненого характеристичного полінома, проводилися експерименти для цих двох випадків, причому приймалося $\omega_{OI} = 200 c^{-1}$ при забезпеченні стандартної біноміальної форми. Перехідні процеси, які при цьому отримали, показані на рис. 2, причому рис. 2, *а* відповідають динамічні процеси при запуску та накиді навантаження, якщо використовується штатне налаштування, а на рис. 2, *б* показано перехідні процеси в системі, налаштованій відповідно з табл. 1, 2 при $\omega_{OI} = 200 c^{-1}$. Накид навантаження здійснювався електромеханічним гальмом на валу двигуна.

Тут $t_{y1} = 0,05 c$ (рис. 2, *а*), а $t_{y2} = 0,04 c$ (рис. 2, *б*), що на 20 % менше для синтезованої системи. Статична похибка для цих двох випадків становить $\Delta\omega_{c1} = 42,1$ об/хв (рис. 2, *а*) і $\Delta\omega_{c2} = 36,4$ об/хв (рис. 2, *б*), що становить 6,53 % і 5,65 % відповідно. Тобто і за цим показником запропонована система ефективніша.

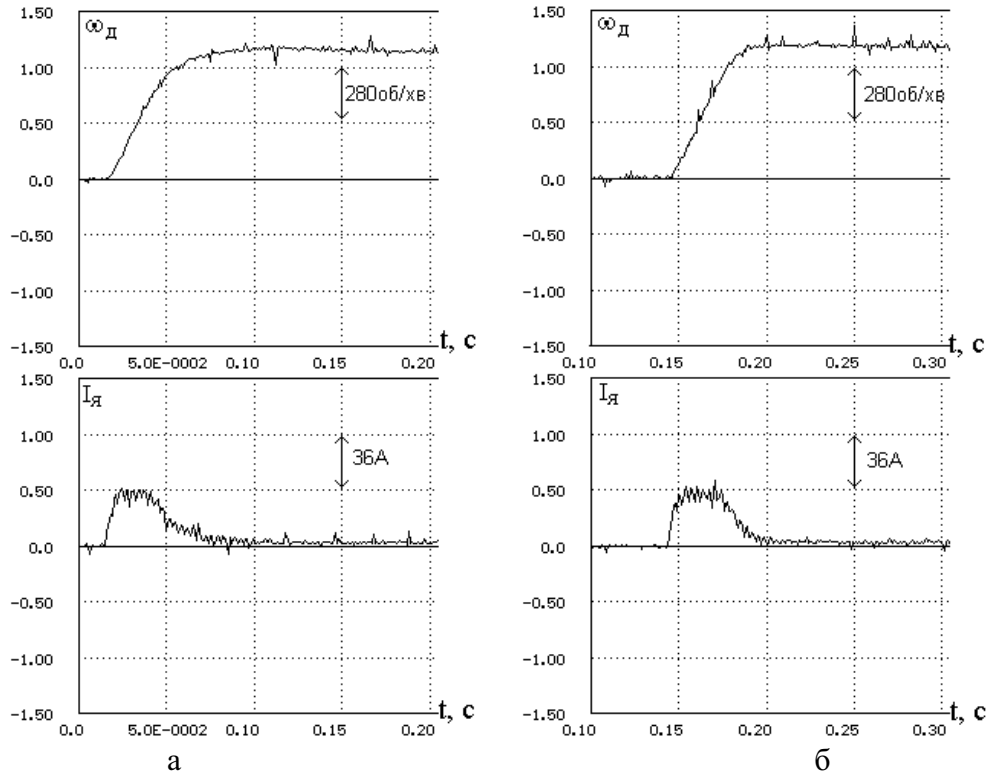


Рис. 1. Перехідні процеси відповідно до біноміальної форми при різних значеннях ω_{OI} ($t = 0$ – запуск цифрового осцилографа)

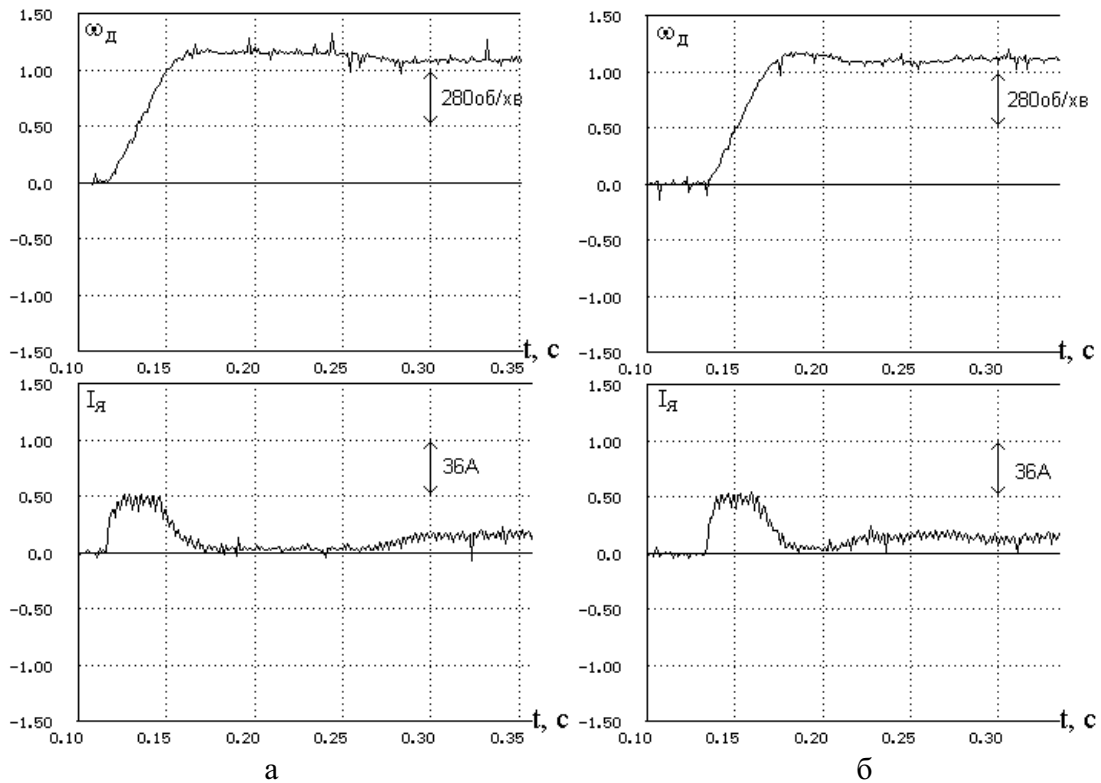


Рис. 2. Перехідні процеси в електроприводі КЕМЕК при штатному налаштуванні і при налаштуванні за результатом синтезу методом узагальненого характеристичного полінома при $\omega_{OI} = 200 \text{ c}^{-1}$

На рис. 3 показано запуск електроприводу під навантаженням.

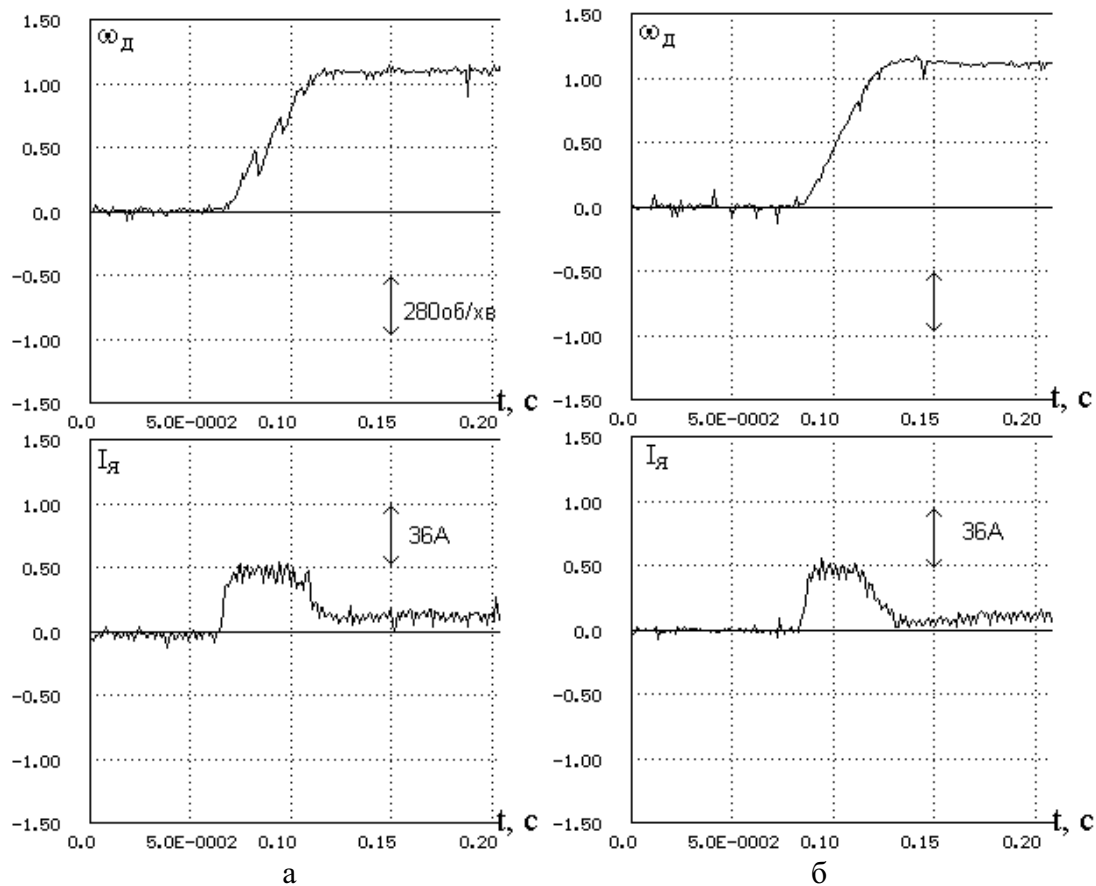


Рис. 3. Перехідні процеси в електроприводі КЕМЕК при запуску під навантаженням для двох випадків налаштування регуляторів ($t = 0$ – запуск цифрового осцилографа)

Співвідношення між t_{y1} та t_{y2} тут залишається таким самим, але при знятті цього експерименту проявилися пружні деформації муфти, що з'єднує вал двигуна з електро-механічним гальмом та генератором (див. рис. 3, а). У той самий час коливань $\omega_d(t)$, обумовлених пружними деформаціями в синтезованій СПР, практично немає (див. рис. 3, б). Звідси можна зробити висновок, що наявність ПД-регулятора струму сприятливо діє на демпфування пружних коливань швидкості другої маси.

Висновки. Отже, проведені експериментальні дослідження на типовому електроприводі КЕМЕК показали, що використання ПД-регулятора струму та П-регулятора швидкості, які синтезовані методом узагальненого характеристичного полінома, покращує динамічні характеристики системи. Так швидкодію електроприводу вдалося підняти на 15 %, а статичну похибку від накиду навантаження знизити з 6,53 до 5,65 %. Подальше збільшення $\omega_{\text{ош}}$ обмежується частотою пропускання тиристорного перетворювача.

1. Марущак Я.Ю. Метод синтезу регулятора струму // Вісн. Харків. держ. політехн. ун-ту. Спец. вып. Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Харків, 1998. – С. 193–195. 2. Марущак Я.Ю. Метод синтезу систем підпорядкованого регулювання, який забезпечує стандартні форми розподілу коренів характеристичного рівняння // Вісн. Харків. держ. політехн. ун-ту. Спец. вып.: Проблеми автоматизиро-

ванного электропривода. Теория и практика. – Харьков, 1998. – С. 190–192. 3. Лозинский О.Ю., Марущак Я.Ю., Лозинский А.О. Некоторые аспекты формирования управляющих воздействий в электромеханических системах // Электротехника. – 1999. – № 5. – С. 52–56. 4. Марущак Я.Ю. Синтез регуляторов электромеханических систем постоянного тока методом узагальненого характеристичного полінома // Технічна електродинаміка. – 2000. – № 2. – С. 72–77.

УДК 621.313

В.И. Милых, О.Н. Дубинина

Национальный технический университет
“Харьковский политехнический институт”

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ И ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЗУБЦАХ КРАЙНЕГО ПАКЕТА СТАТОРА В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ

© Милых В.И., Дубинина О.Н., 2003

Задача розрахунку вихрових струмів і додаткових втрат потужності в зубцях крайнього пакета осердя статора розв’язується чисельним методом з урахуванням реальної конструкції турбогенератора в цілому і його елементів. Порівнюються вказані втрати при різних варіантах зубців крайнього пакета.

A problem of calculations of eddy currents and added power losses in stator end core-lamination stack teeth is solved via a numerical method taking into account existing design of both a turbogenerator in large and its elements. The mentioned losses are compared for various end stack tooth shapes.

Отличительной особенностью электромагнитных процессов в торцевой зоне электрических машин является возникновение в крайних пакетах сердечников вихревых токов (ВТ) и соответственно дополнительных магнитных потерь мощности (ДМПМ) [1]. Это явление оказывается критическим в машинах переменного тока предельной мощности – турбогенераторах [2]. Анализ этой проблемы посвящен значительный ряд исследований, к основополагающим из которых относятся, например, работы [1, 3, 4]. В них анализ проводится посредством аналитических методов расчета, которые хотя и дают физически и качественно правильное представление рассматриваемых процессов, но сопряжены с целым рядом серьезных упрощений, приводящих к неадекватным количественным результатам. Более реалистичные, хотя возможно еще и не всеобъемлющие, результаты дают численные методы расчета электромагнитных процессов в торцевой зоне электрических машин, что отмечено в [5, 6].

Целью данной работы является проведение анализа ДМПМ в зубцах крайнего пакета сердечника статора турбогенератора именно на основе численных расчетов ВТ. Этот анализ является сравнительным и направлен на выявление количественного влияния на ДМПМ принципиальных конструктивных решений в зубцовой зоне концевой части сердечника статора.