

За результатами досліджень, проведених за допомогою комп'ютерного симулювання, можна зробити висновок, що вентильний реактивний двигун з буферами енергії створює електромагнітний момент із значним рівнем пульсації, які найбільше залежать від кількості секцій обмотки якоря і менше від кута вмикання та інтервалу комутації. За допомогою вибору параметрів комутації можна зменшити пульсації електромагнітного моменту і підвищити стабільність обертання ВРД.

1. А. с. 1561162 ССРСР. Вентильный т-фазный электродвигатель / О.В. Осідач, В.И. Ткачук. – № 4394816/24-07; Заявл. 21-03.884; Опубл. 30.04.90, Бюл. № 16. 2. Ткачук В.І., Осідач Ю.В. Транзисторні комутатори з ємнісними накопичувачами енергії // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. – 1996. – № 301. – С. 115–122 3. Ткачук В.І. Ємнісний накопичувач енергії у вентильному реактивному двигуні // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. – 1997. – № 334. – С. 125 – 131.

УДК 62-83:621.313.3

В.І. Ткачук, Б.Л. Копчак

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕМА

## АСИНХРОННИЙ ГЕНЕРАТОР З САМОЗБУДЖЕННЯМ ЯК ЛАНКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

© Ткачук В.І., Копчак Б.Л., 2002

**Розроблена лінеаризована модель асинхронного генератора з самозбудженням, яка дозволяє аналізувати впливи на нього різних збурювальних впливів і придатна для використання в програмному середовищі MATLAB Simulink.**

**The linear model of an induction generator with self-excitation is designed. Model allows to analyse influencings of the different disturbing factors on it and is usable in the program MATLAB.**

Асинхронні генератори (АГ) з самозбудженням, як автономні джерела, стали конкурентоспроможними по відношенню до синхронних генераторів з появою сучасних напівпровідникових перетворювачів (тиристорних, транзисторних) і побудовою на їх базі систем регулювання напруги. Для синтезу системи автоматичного керування необхідна модель АГ з самозбудженням з врахуванням особливостей АГ як нелінійного об'єкта керування, яка дала би можливість аналізувати вплив різних збурювальних факторів.

В літературних джерелах відомі підходи до визначення передавальної функції (ПФ) АГ з самозбудженням [1]. Їх недоліки: складність запропонованих методик, неврахування нелінійності характеристики АГ, низька точність (передбачається використання паспортних даних АГ та номінальних значень ємностей батарей конденсаторів), непридатність до використання в програмному середовищі MATLAB Simulink.

Пропонуємо ще один підхід до визначення ПФ АГ з самозбудженням в каналі збудження за струмом збудження, який базується на результатах експериментальних досліджень. Причому можна використати результати експерименту як на фізичній, так і на математичній моделях. Використання математичної моделі можливе за умови, що вона забезпечує високий ступінь адекватності реальній установці і має суттєві переваги перед дослідженнями на фізичній моделі,

особливо для АГ великої потужності. Така модель АГ з самозбудженням розроблена в [2] з використанням теорії моделювання електромеханічних систем [3]. Вона дозволяє враховувати насиченість магнітопроводів, несиметрію фазних напруг.

На рис. 1 показано результати експериментальних досліджень АГ з самозбудженням вітроенергетичної установки (ВЕУ) з такими параметрами:  $P_H = 55$  кВт,  $U_{\phi, H} = 220$  В,  $I_{\phi, H} = 106$  А в режимі самозбудження – зміну вихідної напруги однієї з фаз АГ ( $u$ ) при вмиканні конденсаторних батарей ємністю  $C_K = 660$  мкФ, коли ротор АГ обертається з синхронною швидкістю. Причому на рис. 1, а зображені результати комп'ютерних досліджень на математичній моделі, а на рис. 1, б показані результати експериментальних досліджень на фізичній моделі. Середньоквадратична похибка незбігу обвідних ліній миттєвих значень напруги в режимі самозбудження АГ становить  $\approx 6\%$ . Якщо врахувати, що точність вимірювання параметрів АГ і конденсаторних батарей не перевищувала 5–10 %, то дані дослідження підтверджують високий ступінь адекватності математичної моделі реальній установці.

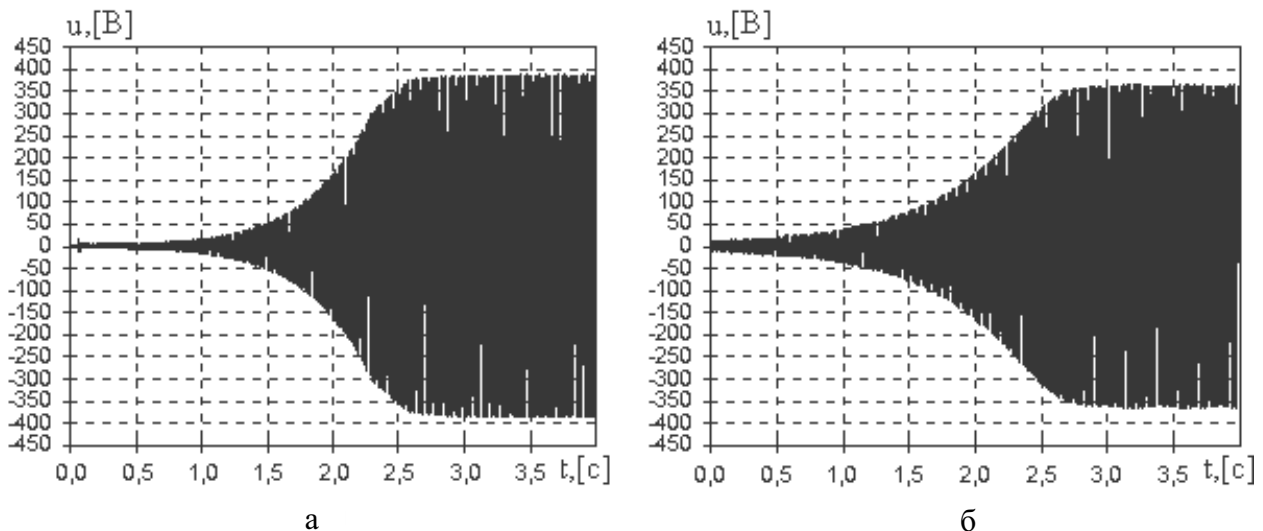


Рис. 1. Діаграми миттєвого значення напруги на затискачах АГ при комп'ютерних дослідженнях (а) та експериментальних дослідженнях (б) процесу самозбудження (швидкість обертання вала привідного двигуна 1500 об/хв,  $C_K = 660$  мкФ)

Враховуючи той факт, що параметри АГ з самозбудженням, як об'єкта регулювання, та зовнішні збурення змінюються в досить значних межах, а інформація про властивості АГ та зовнішні збурення є неповною, перспективною є розробка адаптивної системи регулювання напруги АГ, а розроблену модель можна використати при її побудові.

На стадії синтезу САК АГ з самозбудженням пропонуємо використовувати спрощену, лінеаризовану модель АГ в вигляді структурної схеми, яка дозволяє працювати в програмному середовищі MATLAB Simulink і аналізувати вплив на електромеханічні процеси в АГ таких збурень:

- швидкості обертання ротора АГ ( $\omega_{\text{дв}}$ ), яка пов'язана з випадковістю вітрового потоку;
- реактивної складової струму статора, тобто струму збудження АГ;
- струму навантаження ( $I_H$ ).

Модель генератора розробляється за допущення, що в діапазоні напруги АГ ( $U_{AG}$ ), близькому до номінального значення ( $U_{AG.N}$ ),  $0,9U_{AG.N} < U_{AG} < 1,05U_{AG.N}$  АГ є лінійним об'єктом. Даний діапазон вибраний згідно з стандартом на допустимі відхилення напруги джерела електричної енергії. Модель розроблена, враховуючи рівняння АГ

$$\left. \begin{aligned} U_{AG} &= E_{AG} - I_H Z_H \\ E_{AG} &= c \frac{p_n \omega_{ДВ}}{1-s} I_P \\ I_P &= I_C - I_2'' \sin \varphi_2 \pm I \sin \varphi_H - I_K \sin \varphi_K \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де  $E_{AG}$  – діюче значення ЕРС АГ,  $I_H$  – струм навантаження,  $Z_H$  – повний опір навантаження,  $p_n$  – кількість пар полюсів,  $s$  – ковзання,  $c$  – конструктивна стала АГ,  $I_P$  – сумарна реактивна складова струму статора, тобто струм збудження АГ;  $I_C = U_{AG} \omega_0 C_K$  – струм через конденсатори;  $I_2'' \sin \varphi_2$  – реактивна складова струму, який споживає генератор для його Г-подібної схеми заміщення;  $I \sin \varphi_H$  – реактивна складова струму навантаження; знак (+) для випадку ємнісного навантаження;  $I_K \sin \varphi_K$  – реактивна складова струму статичного напівпровідникового компенсатора, який служить для регулювання напруги АГ.

На рис. 2. показана модель АГ з самозбудженням, яка розроблена для ВЕУ.

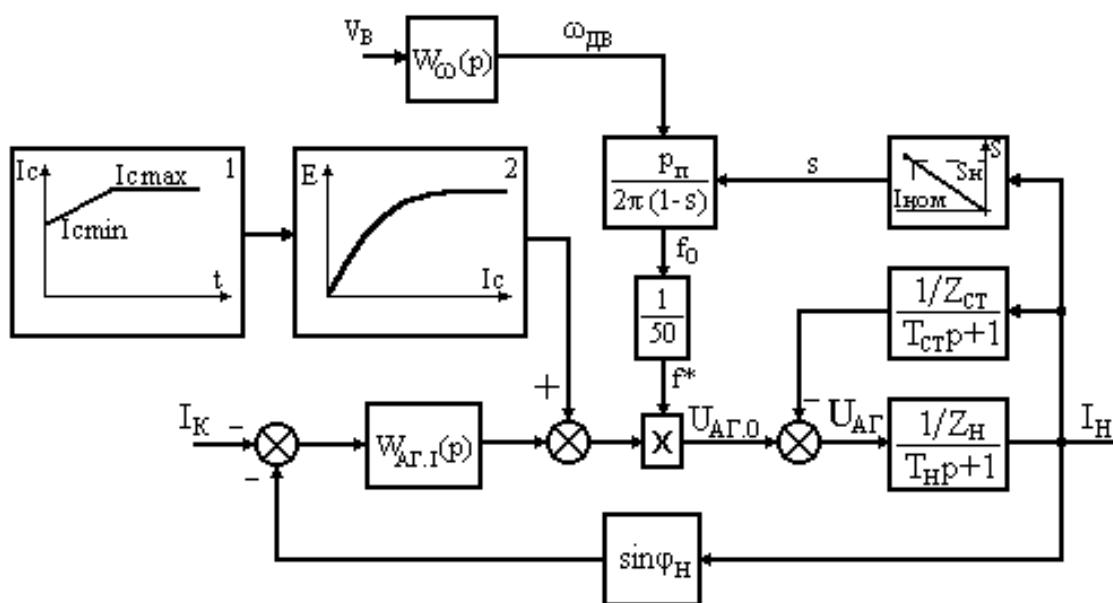


Рис. 2. Модель асинхронного генератора з самозбудженням

Модель розроблена у вигляді структурної схеми, яка складається з окремих ланок з відповідними передавальними функціями (ПФ) в різних каналах збудження.

На основі експериментальних досліджень, проведених на ВЕУ Східницької ВЕС, а також використовуючи аналіз вітрових потоків, наведений в [4], можна зробити висновок, що вплив вітрового потоку має випадковий характер. Зміну вітрового потоку в моделях АГ ВЕУ враховуємо, вводячи ПФ АГ в каналі швидкості обертання вітроподвигуна  $W_\omega(p)$ , прийнявши її ланкою другого порядку;

$$W_\omega(p) = \frac{\omega_{ДВ}(p)}{v(p)} = \frac{K_{ВК}}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1}, \quad (2)$$

де  $v(p)$  – швидкість вітру, яка задається в вигляді випадкової функції,  $\omega_{\text{ДВ}}$  – швидкість вітрового двигуна,  $K_{\text{ВК}}$  – коефіцієнт передачі вітрового колеса і редуктора,  $\xi$  – коефіцієнт демпфування,  $T_1$  – еквівалентна стала часу, яка визначається залежно від еквівалентної інерційності вітрового колеса і редуктора, а також максимально можливих параметрів пориву вітру (рис. 3).

На рис. 3 показано фрагмент реєстрограми вітру. Середнє миттєве значення швидкості вітру 6,6 м/с. Амплітуда пориву вітру 1 протягом часу формування пориву  $2 t_{\text{п}} = 0,5$  с досягнула максимального значення, яке в 1,6 раза перевищує середнє миттєве значення за 6 с. Час спадання пориву 3 виявився приблизно в два рази більшим від часу формування пориву, а максимальна величина зміни швидкості 4 в 1,5 рази перевищила амплітуду.

Представлення ПФ в каналі швидкості обертання ланкою другого порядку зумовлено тим, що нею можна з високою точністю описати даний об'єкт, вважаючи його одномасовою системою [5]. Враховуючи той факт, що швидкість обертання ротора АГ підтримується на постійному рівні системою регулювання за рахунок зміни кута атаки лопатей вітрового колеса, то зміна швидкості обертання ротора в перехідних режимах (порив вітру тощо) практично не перевищує 2–3 %. При цьому в моделі враховано, що частота напруги статора АГ ( $f_0$ ) залежить від частоти обертання ротора і від величини ковзання  $s \leq s_{\text{н}}$  згідно з виразом  $f_0 = \omega_{\text{ДВ}}p / (2\pi(1-s))$ . Ковзання  $s$  в свою чергу визначається величиною навантаження АГ, а номінальне ковзання  $s_{\text{н}}$  відповідає номінальному струму навантаження АГ. Величина  $f^* = f_0/50$  Гц характеризує відносне відхилення частоти напруги статора від номінальної і через блок множення коректує амплітуду  $u$ .

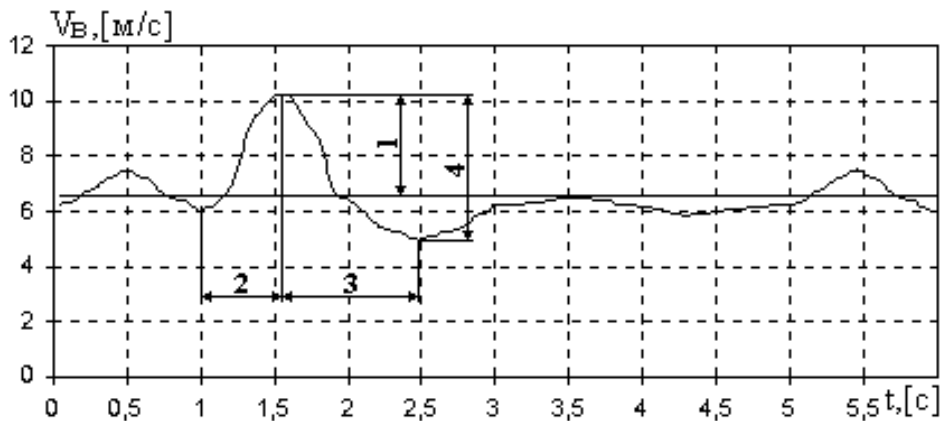


Рис. 3. Фрагмент реєстрограми швидкості вітрового потоку

ПФ в каналі збудження за струмом збудження  $W_{\text{АГ.І}}(p)$  знаходимо за результатами експериментальних досліджень на фізичній або цифровій моделі.

Для цього проводимо експеримент – стрибкоподібну зміну ємності батарей конденсаторів самозбудження АГ. Причому величини початкового і кінцевого значення ємності самозбудження вибираються з умови зміни вихідної напруги АГ в діапазоні  $0,9U_{\text{АГ.н}} < U_{\text{АГ}} < 1,05U_{\text{АГ.н}}$ . На рис. 4. показані фрагменти графіків перехідних процесів миттєвих значень струму збудження ( $i_{\text{ЗБ}}$ ) та фазної напруги ( $u$ ) АГ.

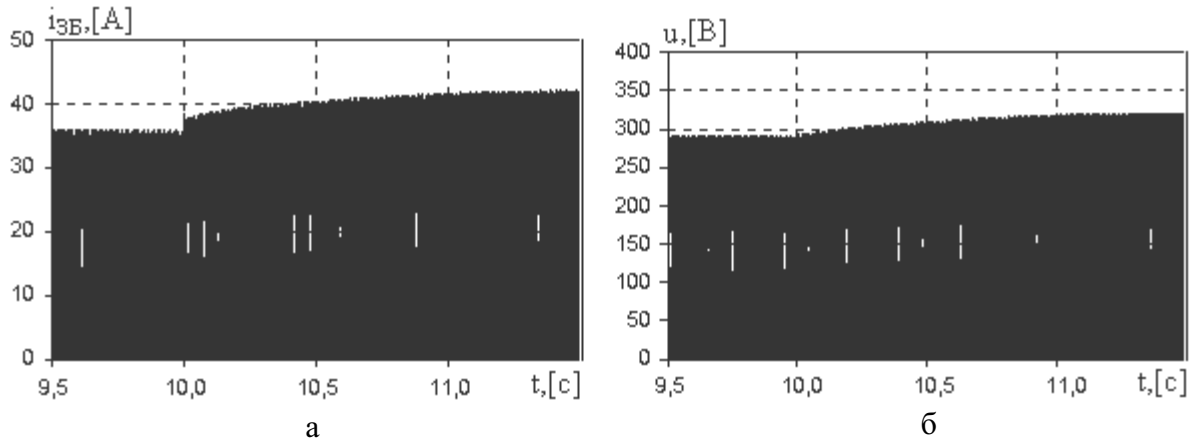


Рис. 4. Діаграма миттєвого значення струму збудження (а) і напруги (б) АГ в режимі самозбудження та стрибкоподібної зміни ємності з  $C_K = 390 \text{ мкФ}$  до  $C_K = 415 \text{ мкФ}$

Далі використовуємо методику експоненціальної апроксимації перехідних функцій за рахунок застосування z-перетворення [6]. При цьому з графіків перехідних процесів  $u = f(t)$ ,  $i_{3B} = f(t)$  виділяємо обвідні лінії приростів їх миттєвих значень (рис. 5, а, б, криві 1) і представляємо значеннями ординат, наприклад для  $u = f(t)$ ,  $u_0, u_1, \dots$ , які відповідають дискретним значенням аргументу  $t$  з кроком дискретності  $T_0$ . Тоді z-перетворення для цієї функції представимо у вигляді [6]:

$$U(z) = \sum_{i=0}^{\infty} u_i z^{-i}, \quad (3)$$

де  $z = e^{T_0 p}$ ,  $p$  – оператор перетворення Лапласа.

Ряду (3) можна поставити в відповідність деяку дробово-раціональну функцію

$$U^*(z) = z \frac{M(z)}{N(z)} = \sum_{i=1}^{\infty} u_i^* z^{-i}, \quad (4)$$

де

$$z \frac{M(z)}{N(z)} = \frac{b_n z^n + b_{n-1} z^{n-1} + \dots + b_1 z}{z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_0 z + a_1}. \quad (5)$$

Розклавши функцію (5) на елементарні дроби, запишемо

$$U^*(z) = \sum_{i=1}^n A_i \frac{z}{z - z_i}, \quad (6)$$

де  $z_i$  – корені рівняння  $z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0 = 0$ , які можуть бути як дійсними, так і комплексними.

Коефіцієнти розкладання  $A_i$  визначаються за формулою

$$A_i = \lim_{z \rightarrow z_i} M(z) \left/ \frac{d}{dz} N(z) \right. . \quad (7)$$

Вираз  $A_i \frac{z}{z - z_i}$  в (6) є z-перетворення для функції  $A_i e^{\gamma_i t}$ , де  $\gamma_i = \frac{\ln z_i}{T_0}$ .

Отже, з (6) випливає, що  $U^*(z)$  є z-перетворення деякої функції

$$u^*(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{\gamma_i t}, \quad (8)$$

яку можна прийняти як функцію, що апроксимує криву  $u = f(t)$ .

Враховуючи негасальні складові (початкові умови) перехідних функцій, відповідно, для  $u = f(t) \rightarrow u_0$  і для  $i_{зб} = f(t) \rightarrow i_0$ , аналітичні вирази перехідних функцій запишемо у вигляді

$$\left. \begin{aligned} u_e^*(t) &= u_0 + \sum_{i=1}^n A_i e^{\gamma_i t} \\ i_e^*(t) &= i_0 + \sum_{k=1}^n A_k e^{\gamma_k t} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Застосувавши до (9) перетворення Лапласа і враховуючи, що зображення зовнішньої дії  $F(p) = 1/p$ , отримаємо вирази передавальних функцій у вигляді

$$\left. \begin{aligned} W_u^*(p) &= u_0 + \sum_{i=1}^n A_i \frac{p}{p - \gamma_i} \\ W_i^*(p) &= i_0 + \sum_{k=1}^n A_k \frac{p}{p - \gamma_k} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Маючи (10) і задавшись нульовими початковими умовами, легко перейти до ПФ АГ

$$W_{АГ.1}(p) = \frac{U_{\Gamma}(p)}{I_{зб}(p)} = \frac{W_u^*(p)}{W_i^*(p)}. \quad (11)$$

Для знаходження ПФ АГ розроблена комп'ютерна програма з використанням програмних середовищ MathCAD і MATLAB Simulink. При цьому, якщо використовуються результати цифрового моделювання, то комп'ютер визначає обвідні лінії кривих миттєвих значень струму збудження і напруги неробочого ходу АГ  $U_{АГ.0}$  з графіків рис. 5, а, б в момент стрибкоподібної зміни ємності конденсатора самозбудження, відповідно: крива 1 – рис. 5, а і крива 1 – рис. 5, б. Якщо ж використовуються результати фізичного експерименту, то ці дані слід ввести в комп'ютер.

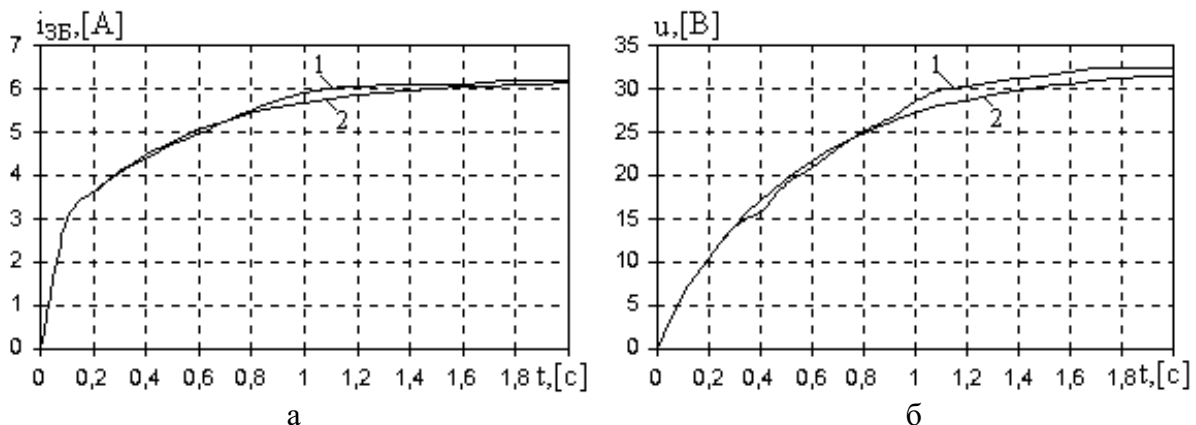


Рис. 5. Обвідні лінії приростів миттєвих значень струму збудження (а) і напруги на затискачах АГ (б) в режимі стрибкоподібної зміни ємності з  $C_K = 390$  мкФ до  $C_K = 415$  мкФ

Використовуючи наведену методику, отримуємо відповідні ПФ в числовому вигляді

$$W_i^*(p) = \frac{104.94p + 520.24}{p^2 + 43.69p + 83.91}; \quad W_u^*(p) = \frac{83.3p + 1211.67}{p^2 + 23p + 37.28}. \quad (12)$$

На рис. 5 зображено криві перехідних процесів (криві 2), які побудовані з використанням отриманих ПФ. Середньоквадратичні похибки незбігу перехідних процесів, отриманих на цифровій моделі і з використанням ПФ становлять, відповідно,  $\epsilon_i \approx 2,1\%$ ,  $\epsilon_u \approx 4,1\%$ .

ПФ АГ  $W_{AG.I}(p)$  в каналі струму збудження знаходимо, зважаючи на (11), як частку від ділення цих двох ПФ

$$W_{AG.I}(p) = \frac{U_{AG.O}(p)}{I_p(p)} = \frac{83.3p^3 + 4851.08p^2 + 59928.9p + 101673.7}{104.94p^3 + 2933.9p^2 + 15877.7p + 19394.5}. \quad (13)$$

Для зручності в використанні спрощуємо дану ПФ, відкидаючи складові чисельника і знаменника, які суттєво не впливають на перехідну характеристику АГ.

$$W_{AG.I}(p) = \frac{U_{AG.O}(p)}{I_p(p)} = \frac{59928.9p + 101673.7}{2933.9p^2 + 15877.7p + 19394.5}. \quad (14)$$

На рис. 6 зображено обвідні лінії миттєвих значень напруги на затискачах АГ в режимі стрибкоподібної зміни ємності з  $C_K = 390$  мкФ до  $C_K = 415$  мкФ отримані за допомогою знайдених ПФ, крива 1 відповідає повній ПФ (13), а крива 2 – спрощеній (14). Середньоквадратична похибка незбігу представлених обвідних ліній становить  $\epsilon_u \approx 6,0\%$ .

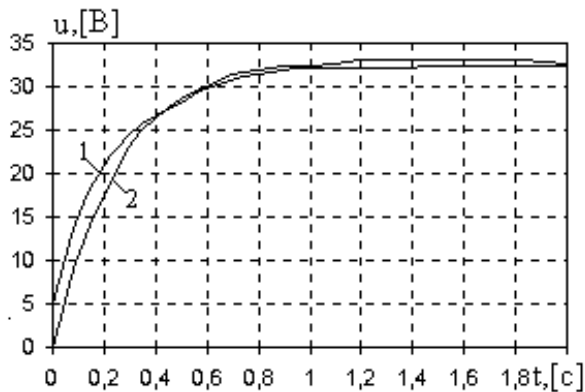


Рис. 6. Обвідні лінії миттєвих значень напруги на затискачах АГ в режимі стрибкоподібної зміни ємності з  $C_K = 390$  мкФ до  $C_K = 415$  мкФ, які отримані за допомогою знайдених ПФ

Передавальна функція за навантаженням

$$W_H(p) = \frac{I_H(p)}{U_{AG}(p)} = \frac{1/Z_H}{T_H p + 1}, \quad (15)$$

де  $T_H$  – стала часу кола навантаження.

Передавальна функція, яка враховує внутрішній зворотній зв'язок за  $I_H$  АГ, тобто вплив струму навантаження на напругу на його затискачах має вигляд

$$W_{CT}(p) = \frac{\Delta U_{CT}(p)}{I_H(p)} = \frac{1/Z_{CT}}{T_{CT} p + 1}, \quad (16)$$

де  $\Delta U_{CT}(p)$  – спад напруги в статорній обмотці АГ під дією навантаження;  $Z_{CT}$  – еквівалентний опір статорної обмотки;  $T_{CT}$  – еквівалентна стала часу статорної обмотки.

Передбачена можливість розробки моделі джерела автономного живлення на базі АГ з самозбудженням без застосування сторонніх джерел для живлення його системи керування. Для цього в схему моделі введений блок 1 (див. рис. 2), за допомогою якого моделюється момент вмикання статичного напівпровідникового компенсатора автономного джерела під час самозбудження АГ, для регулювання його напруги. Моделювання зростання струму через конденсатори в режимі самозбудження здійснюється за рахунок подачі сигналу, який наростає з заданим темпом і імітує струм збудження ( $I_C$ ), величина якого визначає ЕРС АГ згідно з характеристикою неробочого ходу АГ. Дана характеристика реалізована за допомогою блока 2. Величиною початкового струму збудження  $I_{C\text{MIN}}$  визначається ЕРС АГ, при якій відбувається

вмикання тиристорного компенсатора. Величина максимального струму збудження  $I_{\text{СМАХ}}$  вибирається з умови забезпечення необхідного запасу АГ за напругою.

### Висновки

1. Запропонований підхід до визначення ПФ АГ в каналі збудження за струмом збудження дозволяє здійснювати аналіз і синтез САК напруги АГ в середовищі MATLAB Simulink. Відхилення результатів аналізу, отриманих при використанні ПФ, від реальних значень не перевищує 8%.

2. Модель АГ з самозбудженням можна застосовувати під час розробки САК напруги АГ для оцінки ступеня її інваріантності до збурень.

1. Вишневецький Л.В. Передаточные функции асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением // Техн. электродинамика. – 1988. – № 2. – С. 75–80. 2. Плахтина О.Г., Куцик А.С., Копчак Б.Л. Математичне моделювання автономного джерела на базі асинхронного генератора з самозбудженням і тиристорного регулятора напруги // Вісн. НУ “Львівська політехніка”. – 2001. – Вип. 418. – С. 140–146. 3. Плахтина Е. Г. Математическое моделирование электромашино – вентиляционных систем. – Львов, 1986. – 164 с. 4. Шехтер Я.П. Использование энергии ветра. – М., 1983. – С. 36–41. 5. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. Учеб. для вузов. – М., 1990. – 304 с. 6. Кардашов А.А. Применение z-преобразования для экспоненциальной аппроксимации корреляционных и переходных функций // Автоматика и телемеханика. – М., 1968. – № 3. – С. 61–70.

УДК 621.313

Р. Фільц

Технічно-рільнична академія в Бидгощі  
Інститут електротехніки, кафедра основ електротехніки (Польща)

## МОДЕЛЬ УЗАГАЛЬНЕНОЇ НЕЯВНОПОЛЮСНОЇ МАШИНИ ЯК ЕЛЕМЕНТ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

© Фільц Р.В., 2002

Запропонована модель узагальненої неявнополюсної електричної машини як елемент моделі електромеханічної системи. Модель ґрунтується на описі машини за допомогою інтегральних рівнянь і диференційних параметрів. Застосування моделі проілюстровано на прикладі електромеханічної системи, що складається з неявнополюсних машин.

Mathematical model of generalized non-salientpol saturated electrical machine as an electromechanical multipole has been elaborated. The model is based on mathematical description with integral equations. It is applicable for stiff equation systems and ensures high numerical stability. The application of the model has been illustrated on modelling of an electromechanical system.

### Вступ

Під електромеханічною системою (ЕМС) розумітимемо систему, елементами якої є електромеханічні, електромагнітні й напівпровідникові перетворювачі (електричні машини,