

УДК 621.311:62-53

**ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НАПРУГИ АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З РЕГУЛЯТОРАМИ ДРОБОВОГО ПОРЯДКУ****Я. Ю. Марушак, Б. Л. Копчак, Л. С. Копчак, В. Б. Цяпа**

Національний університет "Львівська політехніка"

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна. E-mail: kopchak@mail.ru

Проведено дослідження регуляторів дробового порядку в контурах регулювання системи автоматичного керування напруги асинхронного генератора. Доказано доцільність застосування дробового ПІ-регулятора в контурі регулювання напруги генератора.

**Ключові слова:** асинхронний генератор, ПІД-регулятор дробового порядку.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С РЕГУЛЯТОРАМИ ДРОБНОГО ПОРЯДКА****Я. Ю. Марушак, Б. Л. Копчак, Л. С. Копчак, В. Б. Цяпа**

Национальный университет "Львовская политехника"

ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, 79013, Украина. E-mail: kopchak@mail.ru

Проведены исследования регуляторов дробного порядка в контурах регулирования системы автоматического управления напряжения асинхронного генератора. Доказана целесообразность применения дробного ПИ-регулятора в контуре регулирования напряжения генератора.

**Ключевые слова:** асинхронный генератор, ПИД-регулятор дробного порядка.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** У наукових дослідженнях останніх років в області автоматичного керування різними об'єктами значну увагу приділяють можливості технічного застосування нелінійних диференціальних рівнянь дробового порядку. Приклади можливого застосування такого підходу, зокрема для систем автоматичного керування (САК), розглядаються в [1]. У цій і низці інших робіт авторами запропоновано використовувати для побудови САК регулятори дробового порядку. Розроблення систем з такими регуляторами дозволяє доповнити класичні підходи до синтезу регуляторів з інтегральною складовою й реалізувати їх на базі сучасної мікропроцесорної техніки. Це забезпечує можливість отримання бажаних статичних і динамічних характеристик системи. Проблеми керування напруги автономних вітроенергетичних установок (ВЕУ) з асинхронними генераторами (АГ) і тиристорними компенсаторами реактивної потужності (ТКРП) пов'язані з багатомасовістю системи, нелінійністю характеристики намагнічування АГ тощо. Таку систему можна віднести до класу систем, що описуються диференціальними рівняннями дробового порядку. Тому створення систем керування автономною ВЕУ з АГ за використання регуляторів з дробовим порядком, які забезпечують бажані статичні та динамічні характеристики, є актуальною проблемою.

Проведені симуляційні дослідження автономних ВЕУ з АГ і ТКРП у середовищі MATLAB Simulink а також дослідження на фізичних моделях показали перспективність таких систем для установок середньої потужності, які допускають відхилення частоти вихідної напруги на рівні 5 %. Для керування такими системами застосовують традиційні САК, які у багатьох випадках не забезпечують бажаних статичних і динамічних характеристик. З аналізу сучасних літературних джерел випливає, що з метою усунення цих недоліків перспективним є застосування у таких системах регуляторів дробового порядку, які розширюють можливості системного керування.

Метою дослідження є розроблення структурної схеми системи керування автономних ВЕУ з АГ і

ТКРП та методики синтезу САК напруги з високим ступенем нечутливості до навантаження при використанні регуляторів дробового порядку. Така САК повинна забезпечити високу точність регулювання напруги АГ, його хороші статичні й динамічні характеристики, можливість вмикання в роботу без застосування додаткових джерел живлення; а також надійність в експлуатації.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Нами запропоновано [2] САК напруги АГ із самозбудженням при використанні ТКРП будувати як двоконтурні системи підпорядкованого регулювання, увівши внутрішній контур регулювання струму  $R_K, L_K$  – навантаження ТКРП. Структурна схема такої САК зображена на рис. 1.

На структурній схемі прийнято наступні позначення:  $W_{PH}(p)$ ,  $W_{PC}(p)$  – передавальні функції (ПФ) регулятора напруги і струму відповідно;  $K_1$  – коефіцієнт пропорційності між випрямленим і фазним струмами для трифазної мостової схеми;  $W_H(p) = [Z_H(T_{HP} + 1)]^{-1}$  – ПФ навантаження АГ;  $K_{ЗЗН}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою;  $K_{ТП}$  – коефіцієнт підсилення ТП;  $T_{ТП}$  – стала часу ТП;  $R_K$  – активний опір навантаження ТП;  $T_K$  – стала часу навантаження ТП;  $K_{ЗЗС}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом;  $Z_H$  – опір навантаження АГ;  $T_H$  – стала часу навантаження АГ;  $Z_{СТ}$  – опір статора АГ;  $T_{СТ}$  – стала часу статора АГ; ФП – функціональний перетворювач, який є частиною моделі АГ і встановлює взаємозв'язок між збуренням у каналі швидкості обертання  $f^* = f_0/50$  та швидкістю вітру  $V_B$  і струмом навантаження  $I_H$ . За відсутності збурень  $\Delta I_H$  і  $\Delta V_B$  частота напруги статора  $f_0 = 50$  Гц і на виході функціонального перетворювача діє сигнал, що дорівнює одиниці.

Особливість такої САК [2, 3] полягає в тому, що завдяки уведенню в запропоновану автономну асинхронну генераторну установку окремого контура регулювання струму навантаження ТКРП є можливість компенсувати сталу часу  $T_K = L_K/R_K$  дроселя, який служить його навантаженням, і забезпечити бажану динаміку регулювання цього контура. Крім

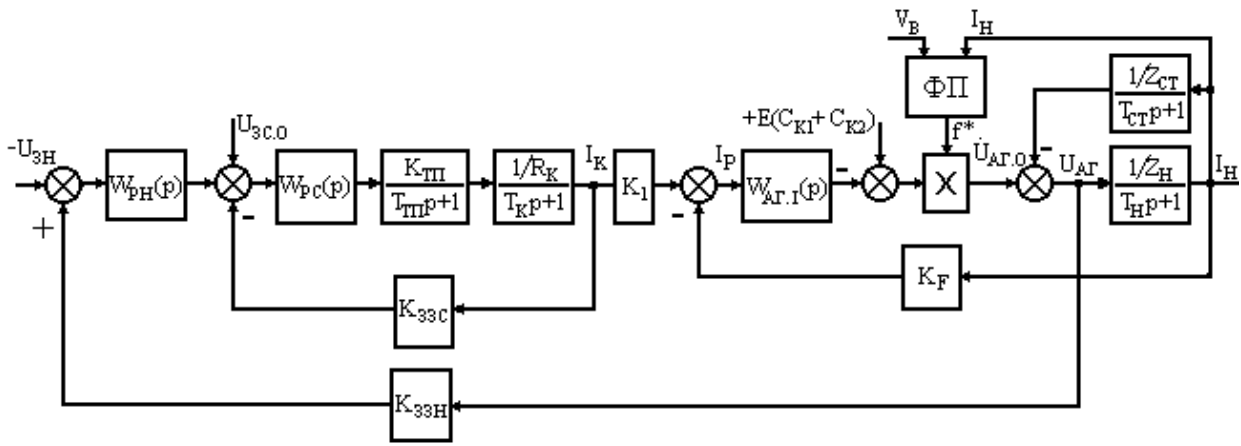


Рисунок 1 – Структурна схема автономного джерела на базі АГ з тиристорним компенсатором реактивної потужності і двоконтурною САК напруги

цього, таким чином реалізується оперативне обмеження значення струму рівнем, що задається максимально допустимим значенням струму навантаження ТКРП, і тим самим виключаються режими аварійного його відмикання.

Дослідимо роботу такої системи за умови використання регуляторів дробового порядку в контурах регулювання струму навантаження ТКРП (РСк) і напруги генератора (РН). Передавальні функції (ПФ) дробового ПІ<sup>α</sup>Д<sup>β</sup>-регулятора струму навантаження ТКРП та дробового ПІ<sup>α</sup>-регулятора напруги ТКРП надано наступними виразами:

$$W_{PC}(p) = K_{П.РС} + \frac{1}{T_{I,PC}p^\alpha} + T_{Д,РС}p^\beta; \quad (1)$$

$$W_{PH}(p) = K_{П.РН} + \frac{1}{T_{I,РН}p^\lambda}. \quad (2)$$

Дослідження проводилися шляхом математичного моделювання в середовищі MATLAB Simulink. При цьому була використана лінеаризована модель АГ [4] з  $P_H = 55$  кВт,  $U_{Ф,Н} = 220$  В,  $I_{Ф,Н} = 106$  А. ПФ АГ, як об'єкта регулювання, має вигляд:

$$W_{AG.I}(p) = \frac{U_{AG.0}(p)}{I_{ЗБ}(p)} = \frac{42376,1p + 71894,16}{2933,9p^2 + 15877,7p + 19394,5}$$

Така модель АГ у вигляді структурної схеми з ПФ у каналі керування збудженням була знайдена на основі експериментальних даних і дозволяє здійснювати аналіз і синтез САК напруги АГ у середовищі MATLAB Simulink, оцінюючи ступінь її нечутливості до збурень у каналі швидкості обертання й навантаження. Розбіжність результатів, отриманих за використанням ПФ, та результатів, отриманих на експериментальній установці, не перевищує 8 %.

Базовий варіант досліджуваної системи синтезовано методом узагальненого характеристичного полінома [3]. Тут використовуються відповідні недробові регулятори й отримано бажані перехідні функції, згідно із стандартною біноміальною, Батерворта чи іншими формами. Параметри базових регуляторів, а також дробових, що побудовані на їх основі й використані при дослідженні, наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри регуляторів

	ПФ РН	ПФ РСк
1	2,44+8,01p <sup>-1</sup> (базовий)	9,498+259,3p <sup>-1</sup> +0,0282p <sup>1</sup> (базовий)
2	2,44+8,01p <sup>-1</sup>	9,498+259,3p <sup>-0.5</sup> +0,0282p <sup>1</sup>
3	2,44+8,01p <sup>-1</sup>	9,498+259,3p <sup>-0.5</sup> +20p <sup>0.5</sup>
4	2,44+8,01p <sup>-1</sup>	9,498+259,3p <sup>-0.5</sup> +20p <sup>0.05</sup>
5	2,44+8,01p <sup>-0.5</sup>	9,498+259,3p <sup>-1</sup> +0,0282p <sup>1</sup>
6	2,44+8,01p <sup>-0.01</sup>	9,498+259,3p <sup>-1</sup> +0,0282p <sup>1</sup>
7	2,44+8,01p <sup>-0.3</sup>	9,498+259,3p <sup>-1</sup> +0,0282p <sup>1</sup>

На рис. 2. показано структурні схеми регуляторів струму а) і напруги б), які були використані при моделюванні САК напруги АГ

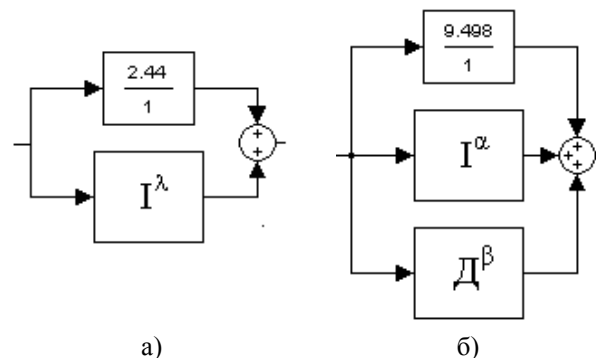


Рисунок 2 – Структурні схеми регуляторів напруги а) і струму б)

Дослідження проведено в середовищі MATLAB Simulink за використанням додаткового пакету NINTEGER V.2.3, спеціально призначеного для дослідження систем керування дробового порядку.

На основі отриманих ПФ у пакеті MATLAB Simulink реалізовано ПІ<sup>α</sup>Д<sup>β</sup>-регулятор струму (1) ТКРП і ПІ<sup>λ</sup>-регулятор напруги (2). Імітаційну модель САК напруги побудовано з урахуванням таких регуляторів. На рис. 3, 4 показано розраховані графіки зміни напруги на виході АГ при стрибкоподібній зміні навантаження для різних параметрів регуляторів згідно з відповідними позиціями таблиці.

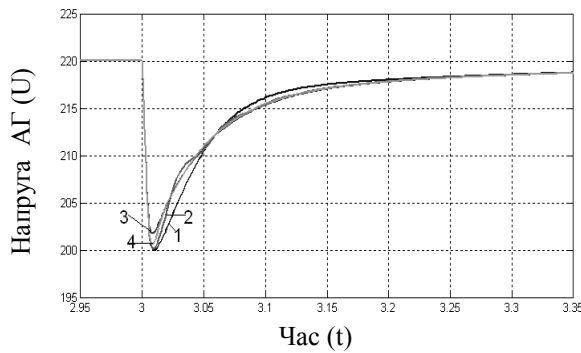


Рисунок 3 – Зміна напруги на виході АГ при стрибкоподібній зміні навантаження для різних параметрів РСк

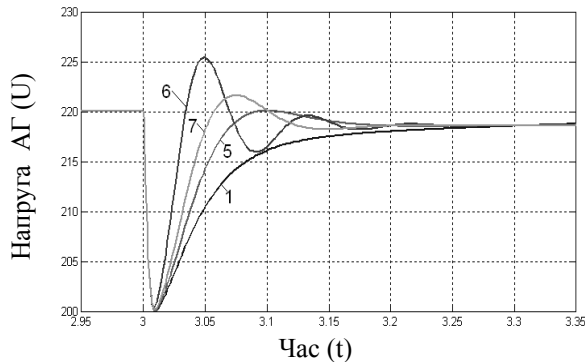


Рисунок 4 – Зміна напруги на виході АГ при стрибкоподібній зміні навантаження для різних параметрів РН

ВИСНОВКИ. У результаті дослідження перехідних процесів ВЕУ з різними параметрами ПІ і ПІ<sup>λ</sup>–

РН, а також ПІД і ПІ<sup>α</sup>Д<sup>β</sup>–РСк навантаження ТКРП можна стверджувати, що застосування дробового регулятора в контурі регулювання струму збудження ТКРП недоцільне. Натомість параметри інтегральної складової дробового ПІ–РН суттєво впливають на динамічні властивості САК напруги. Запропонований регулятор напруги дробового порядку забезпечив перехідний процес із перерегулюванням на рівні модульного оптимуму і, відповідно, вищу швидкодію при відпрацюванні збурення майже в чотири рази, порівняно з класичним ПІ–РН. Результати досліджень показали перспективність застосування запропонованого регулятора напруги дробового порядку в САК напруги автономних асинхронних генераторів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Авсиевич А.В., Авсиевич В.В. Моделирование систем автоматического управления с дробным ПИД-регулятором // Вестник СГТУ. Серия «Технические науки». – 2010. – № 1 (26). – С. 6–12.
2. Патент України 62286 А 7 Н02Р9/44. Генераторне джерело електроенергії / Ткачук В.І., Копчак Б.Л.; заявл. 25.02.2003, опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12.
3. Марущак Я.Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним корегуванням. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2005. – 208 с.
4. Марущак Я.Ю., Копчак Б.Л. Вибір раціонального варіанту системи автоматичного регулювання напруги асинхронного генератора із самозбудженням // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – К., 2002, ч. 5. – С. 22–26.

### THE RESEARCH OF AUTONOMOUS INDUCTION GENERATOR VOLTAGE AUTOMATIC CONTROL FOR THE APPLICATION OF FRACTIONAL ORDER CONTROLLERS

Ya. Marushchak, B. Kopchak, L. Kopchak, V. Tsiapa  
National University “Lvivska Politehnika”

vul. S. Bandery, 12, Lviv, 79013, Ukraine. E-mail: kopchak@mail.ru

The article deals with the research of fractional order controllers in the circuits of induction generator automatic voltage control. The expediency of fractional PI controller in the circuit of generator voltage control is proved.

**Key words:** induction generator, PID fractional order controller.

#### REFERENCES

1. Avsiyevich A.V., Avsiyevich V.V. Simulation of Automatic Control Systems with a Fractional PID Controller // *Bulletin of SSTU. Series «Technical Sciences»*. – 2010. – № 1 (26). – PP. 6–12. [in Russian]
2. Patent of Ukraine. 62286 A 7 H02P9/44. *Generator Source of Electricity* / Tkachuk V.I., Kopchak B.L.; stat. 25.02.2003, publ. 15.12.2003, Bull. № 12. [in Ukrainian]
3. Marushchak Ya.Yu. *Synthesis of electromechanical systems with successive and parallel adjustment*. – Lviv: Publishing House of «Lvivska Politehnika», 2005. – 208 p. [in Ukrainian]
4. Marushchak Ya.Yu., Kopchak B.L. The choice of rational option of automatic voltage control of self-excitation induction generator // *Technical Electrodynamics. Thematic issue «Problems of Modern Electrical Engineering»*. – K., 2002, part 5. – PP. 22–26. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 6.06.2012.  
Рекомендовано до друку  
к.т.н., доц. Сергіємком С.А.