

шенствованной схемы включения и новых алгоритмов управления статического тиристорного компенсатора с целью повышения эффективности работы дуговой сталеплавильной печи ДСП-250 ЗАО «ММК Metalurji» / А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, В. В. Анохин [и др.]. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 170–174. 4. Xiao-Ping, Z, Rehtanz, C, Bikash, P (2006): *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*. 395 pp. Chap. 2, Springer Berlin Heidelberg New York. 5. Hirofumi Akagi. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning* / A. Hirofumi, E. Hirokazu Watanabe, A. Mauricio. – New York (USA): IEEE Press book, 2007. – 389 p. 6. Vladimiro Miranda, “An improved Fuzzy Inference System for Voltage / VAR control” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, No. 4, November 2007. 7. *Modelling and Simulation of Static VAR Compensator (SVC) in Power System Studies by MATLAB* / Houari BOUDJELLA, Fatima Zohra GHERBI and Fatima LAKDJA *ACTA ELECTROTEHNICA*, Volume 49, Number 4, 2008, pp. 450-457. 8. Ghadir Radman, Reshma S. Raje, “Dynamic model for power systems with multiple FACTS controllers” *Electric Power Systems Research*, 78, 361–371, 2008. 9. Mark Ndubuka NWOHU Department of Electrical/Computer Engineering, Federal University of Technology, Minna, Niger State, Nigeria. *Voltage Stability Improvement using Static Var Compensator in Power Systems / Leonardo Journal of Sciences ISSN 1583–0233 Issue 14, January-June 2009 p. 167–172* : <http://ljs.academicdirect.org>. 10. N. Karpagam, D. Devaraj *Fuzzy Logic Control of Static Var Compensator for Power System Damping / International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 3:10 2009, pp. 625–631.

УДК 621.311:681.5

Я. Грицюк, В. Коновал, В. Мороз

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,
кафедра електроенергетики та систем управління

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТИПУ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ЙОГО ПЕРЕХІДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ В АВТОНОМНОМУ РЕЖИМІ

© Грицюк Я., Коновал В., Мороз В., 2017

Проаналізовано типові за класифікацією IEEE системи збудження синхронних генераторів. Для аналізу стійкості електроенергетичних систем з розглянутими системами збудження запропоновано використання методів теорії автоматичного керування. Для розв’язування цієї задачі запропоновано спрощення з використанням структурних моделей.

Ключові слова – стійкість електроенергетичних систем, система збудження синхронної машини, регулятор збудження, структурне моделювання.

This article surveys the analysis of the typical IEEE excitation systems of synchronous generators. For analyze the power system stability with these excitations suggest use the theory of automatic control. For solving this problem proposed simplification using structural models.

Keywords – power systems stability, synchronous machine excitation system, excitation regulator, structure modeling.

Постановка проблеми

Впровадження нових систем збудження синхронних турбогенераторів потребує аналізу відмінностей існуючих промислових розробок перед їх введенням в експлуатацію, а також аналізу їх впливу на стійкість ЕЕС для всіх режимів роботи. У цьому випадку перспективним, на думку авторів, є використання комп’ютерного аналізу, що передбачає, однак, розв’язання низки задач,

пов'язаних зі створенням математичних і комп'ютерних моделей, які є адекватними у широкому діапазоні режимів роботи і здатні працювати в реальному часі у взаємодії з фізичним обладнанням.

Аналіз попередніх досліджень та публікацій

Для детальних досліджень стійкості електроенергетичних систем (ЕЕС) необхідно точно змоделювати поведінку синхронних машин (СМ). Це потребує докладного опису також поведінки їхніх систем збудження [1] під час як великих, важких порушень, так і малих збурень. Однак на практиці важко використовувати детальні математичні моделі як синхронних машин, так і їхніх систем збудження через відсутність повної інформації про параметри машин і додаткові функції управління. Як правило, складність і, відповідно, порядок математичної моделі нижчі за складність фізичної моделі у зв'язку з неможливістю врахування всіх контурів регулювання, неврахуванням залежності функціонування регуляторів від частоти енергосистеми (що характерно для старих систем збудження). Такі спрощені моделі дійсні для режимів відхилення частоти в межах 5% від номінального значення. Їх не можна використовувати для дослідження режимів підсинхронних резонансів чи крутих коливань валів синхронних машин [2].

За останні роки в Україні доволі активно модернізують обладнання електричних станцій [3], що особливо проявляється в заміні старих систем збудження на нові, сучасні закордонні системи збудження провідних фірм-виробників АВВ (Швейцарія), АЕГ (Німеччина) та інші. Це потребує кількісного та якісного оцінювання впливу процесу модернізації на роботу інших електростанцій та електроенергетичної системи України загалом [4, 5].

Постановка задачі

Задачею дослідження є аналіз засобами теорії автоматичного керування впливу типу системи збудження (за класифікацією ІЕЕЕ) на стійкість і поведінку автономного синхронного генератора.

Виклад основного матеріалу

В основу моделі синхронної машини покладено рівняння Парка [7], які спеціально перетворені для раціонального розрахунку з матричним рівнянням електричної мережі. Використання повної математичної моделі Парка для практичних розрахунків спричиняє, як було вже сказано вище, труднощі у визначенні певних достовірних параметрів у рівняннях. Такі параметри можна отримати лише після проведення спеціальних експериментальних досліджень синхронних машин. Тому, як правило, під час моделювання синхронних машин для задач стійкості ЕЕС приймають такі спрощення:

- 1) не враховують електромагнітних процесів у статорі;
- 2) не враховують насичення головного магнітного кола та зубцевого шару;
- 3) опори взаємоіндукції між кожною парою контурів у поздовжній осі машини однакові;
- 4) не враховують надперехідної явноплюсності;
- 5) не враховують залежність індуктивних опорів синхронної машини від частоти;
- 6) трансформаторний ефект обмотки збудження на демпферну обмотку враховують коефіцієнтом $g^{(1)} = 1.0$.

Тоді спрощена математична модель синхронної машини для розрахунку електромеханічних перехідних процесів [8–10] матиме вигляд:

$$T'_{d0} dE'_q/dt + E'_q = E_{qe} - (x_d - x''_d)i_d; \quad (1)$$

$$T''_{d0} d(E''_q - E'_q)/dt + (E''_q - E'_q) = -(x'_d - x''_d)i_d; \quad (2)$$

$$T'_{q0} dE'_d/dt + E'_d = E_{de} - (x_q - x'_q)i_q; \quad (3)$$

$$T''_{q0} d(E''_d - E'_d)/dt + (E''_d - E'_d) = (x'_q - x''_q)i_q, \quad (4)$$

де T'_{d0} , T'_{q0} та T''_{d0} , T''_{q0} – перехідні та надперехідні сталі часу для поздовжньої та поперечної осей; E'_q , E'_d й E''_q , E''_d – проекції ЕРС СМ за перехідним та надперехідним реактансом на осі q та d ; E_{qe} ,

E_{de} – ЕРС збудження за обома осями; x_d , x_q та x'_d , x'_q – синхронні та перехідні реактанси за поздовжньою та поперечною осями; x''_d , x''_q – надперехідні миттєві реактанси за поздовжньою та поперечною осями; i_d , i_q – проєкції струмів СМ на поздовжню та поперечну осі.

Модель синхронної машини на основі електричної заступної схеми та вищеподаних диференціальних рівнянь показано на рис. 1 [11]. Використання цієї заступної схеми дає змогу зрозуміти причину зміни сталих часу синхронних турбогенераторів у випадку зміни навантаження їхньої статорної обмотки, про що йдеться у роботі [7], – відсутність чи наявність навантаження у статорній обмотці змінює структуру електричної заступної схеми, що, відповідно, змінює параметри відповідних RL-контурів та їхніх сталих часу. Особливо це відчутно стосовно сталих часу, які пов'язані з обмоткою збудження, – згідно з літературними джерелами (наприклад, [5, 7]) перехід від режиму неробочого ходу до режиму повного навантаження може зменшити сталі часу T'_{d0} , T'_{q0} у 5–7 разів. Така зміна параметрів кола збудження, як вже згадано вище, потребує додаткових досліджень впливу типу системи збудження на поведінку електроенергетичної системи.

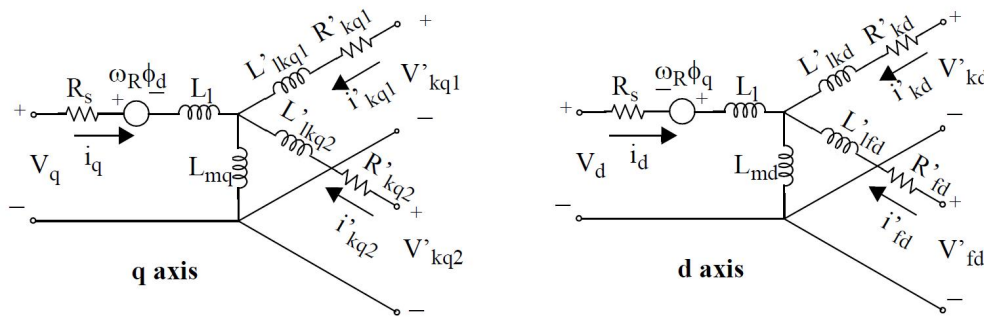


Рис. 1. Модель синхронного генератора в d-q координатах на основі електричної заступної схеми [11]

Наведений вище математичний опис диференціальними рівняннями можна звести до структурної моделі синхронного генератора, яку доволі просто проаналізувати засобами імітаційного моделювання та відомими математичними застосунками. Модель побудована у відносних одиницях і передбачає два випадки: режим неробочого ходу (навантаження відсутнє) і максимальне навантаження. У разі відсутності навантаження модель синхронного генератора є доволі простою та може бути зведена до структурної схеми, яку зображено на рис. 2.

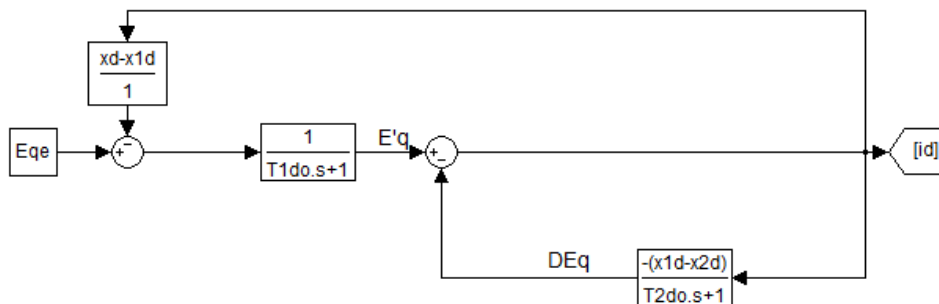


Рис. 2. Структурна схема моделі синхронного генератора без навантаження

Для імітації максимального навантаження з нормованим мінімальним значенням $\cos \varphi = 0.8$ до наведеного вище математичного опису диференціальними рівняннями додано спрощену імітацію навантаження генератора в автономному режимі за допомогою відповідної RL-ланки. У цьому випадку модель у відносних одиницях синхронного генератора з приєднаним навантаженням

для досліджень можна звести до структурної схеми, яку зображено на рис. 3. Потрібно зазначити, що через комплексний характер навантаження сумарний струм збудження знаходять через геометричну суму його складових (у відносних одиницях) d і q , що й показано на структурній схемі рис. 3. Лінеаризація моделі в околі точки максимального навантаження дає змогу використати апарат передатних функцій класичної теорії автоматичного керування [12].

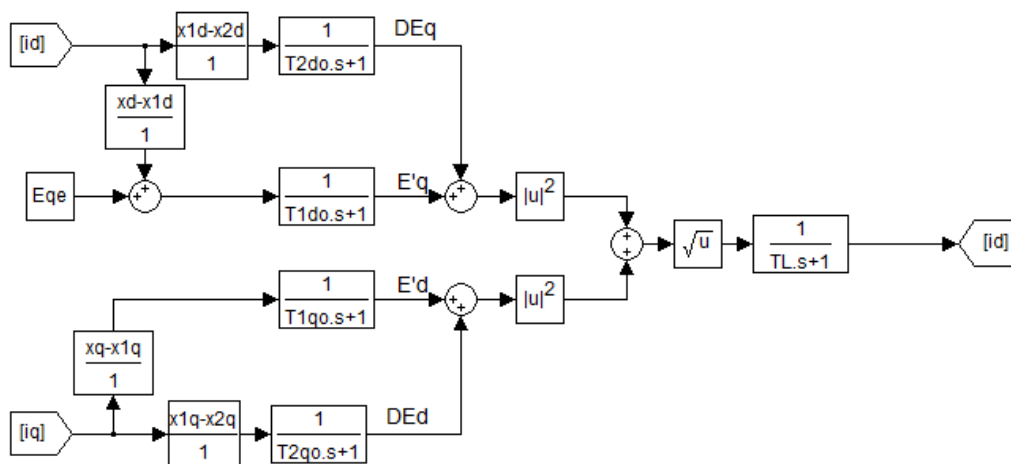


Рис. 3. Структурна схема моделі синхронного генератора з імітацією приєднаного навантаження

Таку структурну модель послідовними спрощеннями відомими методами теорії автоматичного керування [12] із врахуванням активної та реактивної складових електричного навантаження відповідними коефіцієнтами \sin і \cos , які є константами для точки максимального навантаження, можна звести до показаної на рис. 4.

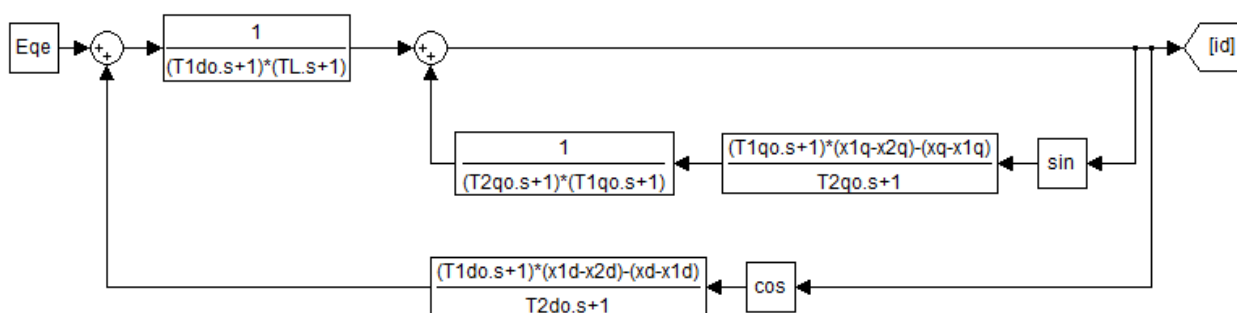


Рис. 4. Структурна модель на останньому етапі спрощення (пояснення до моделі – в тексті)

Одержані структурні моделі (рис. 2 і 4) доповнено передатними функціями відповідних систем збудження та регуляторів збудження згідно з рекомендаціями IEEE [5], які поділяють на три типи:

- 1) DC – системи збудження постійним струмом, в яких як джерело збудження використано колекторний генератор постійного струму;
- 2) AC – системи збудження змінним струмом, в яких використано генератор змінного струму і нерухомі чи обертові випростувачі для вироблення постійного струму, який потрібний для створення поля синхронних машин;
- 3) ST – тип статичних систем збудження, в яких потужність збудження забезпечено трансформаторами або обмотками додаткового генератора і випростувачами.

Як приклад, на рис. 5 показано функціональну схему сучасної системи збудження АС8В з ПД-регулятором, яка увійшла до переліку досліджуваних систем збудження синхронних турбогенераторів. Пропоновану повну систему можна проаналізувати в середовищі імітаційного моделювання MATLAB + Simulink або з використанням засобів MATLAB Control System Toolbox [13].

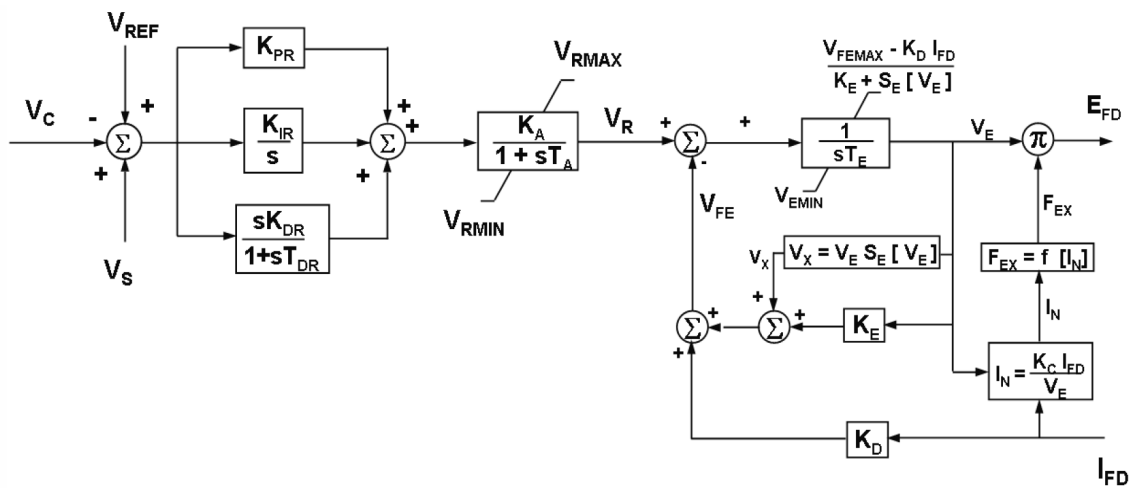


Рис. 5. Приклад функціональної схеми системи збудження типу AC8B за класифікацією IEEE [5]

Отримані перехідні характеристики як приклад для кількох різних систем збудження у випадку малих збурень за вхідним сигналом наведено в табл. 1. Графіки перехідних характеристик наведено у відносних одиницях, вхідним сигналом є завдання регулятора збудження, вихідним сигналом – відносний струм збудження.

Таблиця 1

**Приклади перехідних характеристик деяких систем збудження
у випадку малих збурень за вхідним сигналом**

Тип системи	Перехідна характеристика без навантаження	Перехідна характеристика з максимальним навантаженням
DC1A		
	Примітка: на перехідній характеристиці видно вплив компаундування струму збудження	
DC4B		

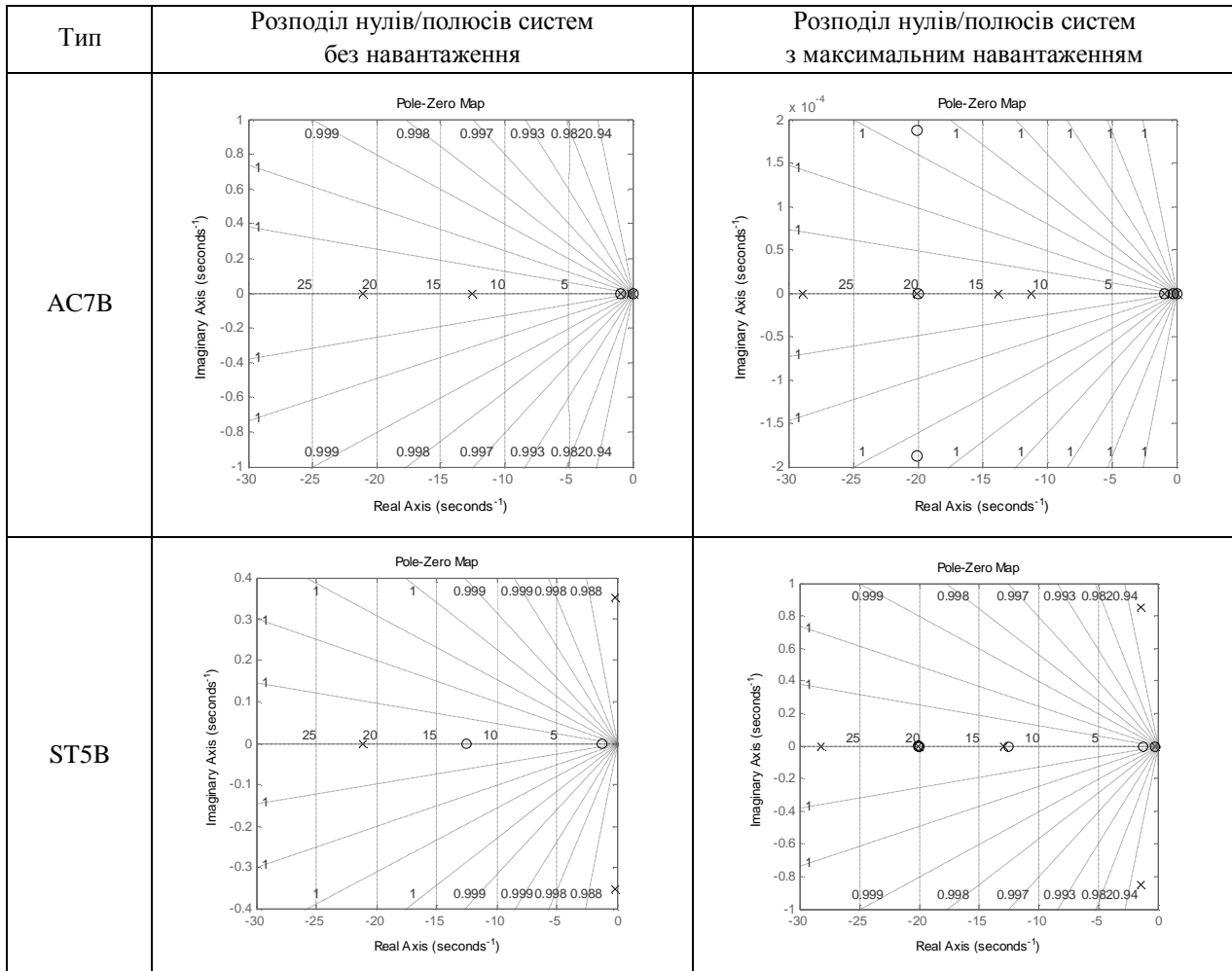
Тип системи	Перехідна характеристика без навантаження	Перехідна характеристика з максимальним навантаженням
AC7B		
ST4B		

Аналіз одержаних комп'ютерним моделюванням результатів показав, що найкращу поведінку і найменший час перерегулювання мають системи DC4A, AC1A, AC7B, ST1A та ST5B. Отримати додаткову інформацію про вплив розглянутих систем збудження на стійкість та оцінити її запас можна за методами теорії автоматичного керування, зокрема аналізуючи розміщення нулів/полосів для кожної системи збудження на комплексній площині [11, 12]. Отримані приклади карт розподілу нулів/полосів для кількох досліджуваних систем наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Приклади розподілу нулів/полосів для досліджуваних систем збудження

Тип	Розподіл нулів/полосів систем без навантаження	Розподіл нулів/полосів систем з максимальним навантаженням
DC4A		



Аналіз одержаних результатів досліджень показав, що серед існуючих систем регулювання струму збудження синхронних генераторів найкращі можливості щодо реалізації законів керування та запасу стійкості забезпечують сучасні системи з ПІ- та ПІД-регуляторами типу DC4B, AC7B, AC8B, ST4B і ST5B за класифікацією IEEE. У цьому випадку є незайвим додатковий аналіз використання ПІ/ПІД-регуляторів у системах збудження конкретних синхронних генераторів та перевірка ефективності їх використання на моделі системи збудження.

Висновки

Застосувавши спрощену модель синхронної машини, яку традиційно використовують для аналізу стійкості електроенергетичних систем, зокрема, програмою DAKAR ELEKS [10], вдалося використати апарат теорії автоматичного керування для дослідження цієї проблеми. Підтверджено, що сучасні системи збудження з ПІ- чи ПІД-регуляторами мають кращі динамічні характеристики та простіші з погляду забезпечення бажаної стійкості електроенергетичних систем.

Дослідження показали, що найкращими промисловими системами збудження з огляду на стійкість і простоту налагодження є сучасні системи типу DC4B, AC7B, AC8B, ST4B і ST5B за класифікацією IEEE.

1. Anderson H. C., Simmons H. O., and Woodrow C. A. *Systems Stability Limitations and Generator Loading*. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-72, pp. 406–423, June 1953.
2. ANSI C34.2-1968 (Withdrawn), *American National Standard Practices and Requirements for Semiconductor Power Rectifiers*.
3. Про заходи щодо реконструкції та модернізації

теплоелектростанцій і теплоелектроцентралей у період до 2020 року/ РОЗПОРЯДЖЕННЯ КАБІНЕТУ МІНІСТРІВ УКРАЇНИ від 8 вересня 2004 р. N 648-р. (Із змінами, внесеними згідно з Розпорядженням КМ № 850-р від 18.06.2008). – Офіц. вид. – Київ. – 2008. 4. Bayne J. P., Kundur P., and Watson W. Static Exciter Control to Improve Transient Stability. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-94, pp. 1141–1146, July 1975. 5. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. *IEEE Std 421.5™* – 2005. 6. Performance of Three PSS for Interarea Oscillations [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps_product-power_PSS-performance-of-three-pss-for-interarea-oscillations. 7. Kundur P. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill. – 1994. – 813 p. 8. Kiyong Kim, Richard C. Schaefer. Tuning a PID Controller for a Digital Excitation Control System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, No. 2, March/April 2005. 9. Konoval V. Power system dynamic stability: impact analysis of synchronous generator excitation system replacement / V. Konoval, A. Kozovyy, O. Skrypnyk, A. Kuchynskyi, P. Dembitskyi // *Blackout a krajowy system elektroenergetyczny* (2014). – Poznan. – 2014. – P. 349–359. 10. www.dakar.eleks.com. 11. Synchronous Machine. *Simscape™ Power Systems™*. MathWorks MATLAB® [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/synchronousmachine.html>. 12. Макаров И. М. *Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал)*. – 2-е изд., перераб. и доп. / И. М. Макаров, Б. М. Менский. – М. : Машиностроение, 1982. – 504 с. 13. *Control System Toolbox* [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/control/index.htm>

УДК 621.311

Б. В. Дмитрик, О. М. Равлик, І. О. Сабадаш, Н. О. Равлик
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електричних систем та мереж,
кафедра електричних станцій

ВПЛИВ РПН НА ІДЕНТИФІКАЦІЮ ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ У СИЛОВОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ

© Дмитрик Б. В., Равлик О. М., Сабадаш І. О., Равлик Н. О., 2017

Досліджено вплив пристрою РПН на ідентифікацію виткових замикань у силових багатообмоткових трансформаторах.

Ключові слова: багатообмотковий трансформатор, виткове замикання, алгоритм ідентифікації, РПН, чутливість, селективність.

The investigation of the influence of on-load tap-changing device on the algorithm of identification of winding short circuits in multi-winding power transformers was conducted.

Keywords: multi-winding transformer, winding short circuit, algorithm of the identification, LTC device, sensitivity, selectivity.

Постановка проблеми

Сьогодні в українських електромережах експлуатується значна кількість застарілого силового обладнання, яке вже довгий час працює понад нормальний термін придатності. Особливо гострою є ця проблема стосовно силових трансформаторів, які є одними з основних елементів мережі. У зв'язку із багатьма зовнішніми та внутрішніми факторами це обладнання потребує ефективного захисту. Цю функцію на себе беруть пристрої релейного захисту[1], які повинні