

УТОЧНЕННЯ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ БІБЛІОТЕКИ SimPowerSystems СЕРЕДОВИЩА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ SIMULINK

© Мороз В., Боровець Т., 2015

Запропоновано уточнену модель генератора постійного струму з бібліотеки SimPowerSystems середовища імітаційного моделювання MATLAB + Simulink з урахуванням наявності кривої намагнічування та вихрових струмів у станині.

Ключові слова: *електрична машина постійного струму, імітаційна модель, комп'ютерне моделювання, Simulink, SimPowerSystems.*

The paper proposes an experienced model of the DC-generator of SimPowerSystems-package of simulation environment MATLAB + Simulink considering the presence of the magnetization curve and the frame's eddy currents.

Key words: *computer simulation, DC electric machine, virtual model, Simulink, SimPowerSystems.*

Постановка проблеми

Аналіз динаміки електроприводів з використанням середовища імітаційного моделювання Simulink дає змогу автоматизувати процес дослідження керованих електромеханічних систем – відпадає необхідність у складанні системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку об'єкта, немає потреби в реалізації числового методу їх розв'язування – це все пропонують у готовому вигляді. Додатковий вигравш дає бібліотека SimPowerSystems для інженерів-електриків, яка спрощує їхню роботу під час досліджень динаміки електромеханічних і електроенергетичних систем. Можна стверджувати, що здебільшого набір елементів Simulink і SimPowerSystems дає змогу навіть не дуже досвідченому користувачеві значно спростити комп'ютерний аналіз перехідних характеристик.

Таке спрощення процесу досліджень має і побічну дію – користувач починає сліпо довіряти наявним у MATLAB+Simulink+SimPowerSystems комп'ютерним моделям, вважаючи їх еталоном простоти, легкості користування, достовірності та точності. Проте один з авторів неодноразово мав проблеми реалізації доволі простих моделей у середовищі Simulink, неправильні результати моделювання внаслідок некоректної роботи числових методів (наприклад, [1]), і помилки реалізацій окремих елементів стандартних бібліотек, зокрема, SimPowerSystems. До першого типу проблем належать спроби аспірантів кафедри електроприводу моделей створити релейні чи гістерезисні регулятори або врахувати в моделях наявність сухого тертя в механічній частині приводу. До помилок реалізацій належить, зокрема, неправильна модель режиму генератора в моделі електричної машини постійного струму бібліотеки SimPowerSystems версії 4.5 (версія MATLAB R2007b), що вже було виправлено в подальших релізах програми.

Додаткова критика стосовно стандартних бібліотек програми MATLAB надходить і від досвідчених користувачів, які не задоволені обмеженим набором уніфікованих блоків та можливостями Simulink і точністю існуючих моделей бібліотеки SimPowerSystems. Тому в середовищі дослідників постійно з'являються критичні зауваження щодо Simulink і SimPowerSystems та намагання вдосконалити наявні бібліотеки.

До елементів, які потребують вдосконалення, належить стандартна модель електричної машини постійного струму бібліотеки SimPowerSystems, що не дає змоги в обмотці збудження врахувати криву намагнічування та вихрові струми в станині.

Аналіз останніх досліджень

У зв'язку з переходом сучасного електроприводу на двигуни змінного струму та відповідну реалізацію силових схем зі сучасною елементною базою в наявних публікаціях практично відсутній прогрес у моделюванні електроприводів постійного струму. Традиційним є використання найпростіших моделей електричних машин постійного струму, зокрема, генераторів [2–4], які ґрунтуються на простих традиційних моделях, описаних, зокрема, в [5].

Потрібно відзначити, що необхідність врахування вихрових струмів у випадку змінного збудження машини постійного струму була обґрунтована ще в роботі [6] і ґрунтувалася на відомій заступній схемі фіктивного контуру вихрових струмів [5], яка, проте, не враховує наявність поверхневого ефекту в станині [5, 7–9]. Модель, яка описана в роботі [8], забезпечує додаткову точність внаслідок врахування кривої намагнічування електричної машини [10]. На жаль, уточнені моделі машин постійного струму зі змінним збудженням поширення не набули, про що свідчать згадані вище публікації та стандартна модель машини постійного струму з бібліотеки SimPowerSystems математичного застосунку MATLAB [11].

Задача досліджень

Задачею досліджень є уточнення моделі машини постійного струму стандартної бібліотеки SimPowerSystems математичної програми MATLAB.

Виклад основного матеріалу

Пропонована модель машини постійного струму [11] відображає принцип зворотності, тобто може імітувати режим роботи двигуна і генератора, і описана відповідною системою рівнянь [11]. Будова такої моделі генератора показана на рис. 1, де видно, що модель кола збудження є найпростішою і реалізована звичайною лінійною RL-ланкою, що свідчить про низку основних спрощень:

- не враховують таку нелінійність, як крива намагнічування;
- відсутні вихрові струми у станині з врахуванням поверхневого ефекту.

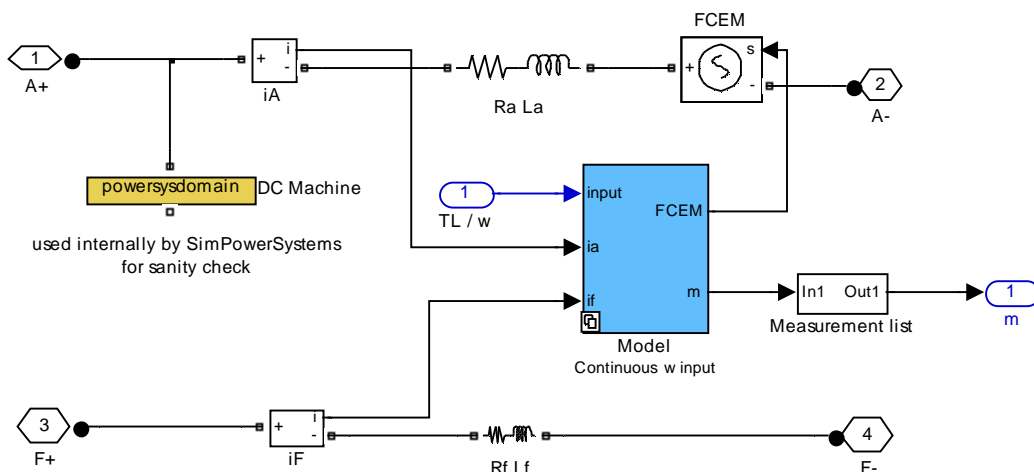


Рис. 1. Будова стандартної моделі генератора постійного струму SimPowerSystems

У випадку електричних машин зі шихтованою станиною в режимі генератора дана модель у зоні напруг, нижчих від номінальної, є допустимою, чим і користають більшість користувачів такої моделі. Адекватною вона буде і для режиму двигуна з постійним номінальним збудженням. За

потреби точнішого врахування дії магнітної системи, яка пов'язана зі зміною струму в обмотці збудження, необхідно в модель ввести два згадані вище елементи: врахування кривої намагнічування і наявності вихрових струмів у масиві станини.

Розв'язування задачі уточнення моделі електричної машини в SimPowerSystems можна розбити на два етапи, з яких першим буде реалізація нелінійної залежності ЕРС якоря від струму збудження. Таку нелінійність можна апроксимувати і сплайнами, і з використанням функції арктангенса, що й було використано у цій роботі. Як показано ще в статті [12], апроксимація функцією арктангенса $E_G = A \cdot \text{arctg}(B \cdot I_d)$ (де E_G – ЕРС генератора; A, B – коефіцієнти апроксимації; I_d – струм обмотки збудження) забезпечує відносну точність на рівні 2–3 %, що значно перевищує точність виготовлення електричної машини і розкид параметрів промислової серії машин, а також забезпечує найгладкішу похідну кривої намагнічування.

Рекомендації щодо розрахунку і вибору параметрів генератора і коефіцієнтів апроксимації наводяться в роботі [5]. За відсутності даних про криву намагнічування електричної машини користуються універсальною кривою намагнічування [10], для якої коефіцієнти апроксимації становлять $A = 0.858E_{Gnom}$ і $B = 2.351$, де E_{Gnom} – номінальна напруга генератора [5]. Тоді напруга генератора буде апроксимована залежністю $E_G = 0.858E_{Gnom} \cdot \text{arctg}\left(2.351 \frac{i_d}{I_{dnom}}\right)$, яку доволі просто реалізувати в стандартній моделі машини постійного струму бібліотеки SimPowerSystems (рис. 2).

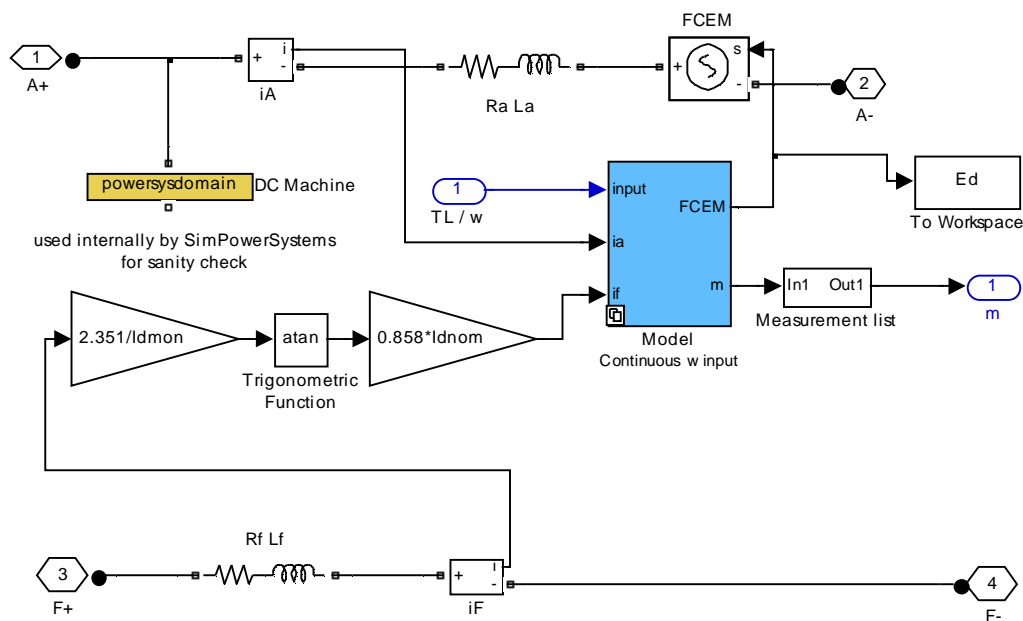


Рис. 2. Реалізація в моделі електричної машини постійного струму нелінійності кривої намагнічування за допомогою апроксимації функцією арктангенса

Апроксимацію ЕРС генератора в реалізованій у SimPowerSystems моделі електричної машини постійного струму здійснюють з використанням кутової швидкості якоря і взаємної індуктивності між обмотками збудження та якоря (рис. 2):

$$E_G = 0,858 \cdot I_{dnom} \cdot \text{arctg}\left(2,351 \frac{i_d}{I_{dnom}}\right) \cdot \omega \cdot L_{af},$$

де ω – кутова швидкість обертання вала машини; I_{dnom} – номінальний струм обмотки збудження електричної машини; L_{af} – взаємна індуктивність між обмоткою якоря і обмоткою збудження.

Отримана так характеристика "вхід-вихід" ($E_G(I_d)$) для генератора типу 4ГПЭМ-220 показана на рис. 3 разом з характеристикою намагнічування з паспорту генератора.

Іншим варіантом реалізації вказаної нелінійності є використання блока 1-D Lookup Table з основної стандартної бібліотеки Simulink, який виконує сплайн-інтерполяцію за заданими точками. Як аргумент для цього блока можна використати дані кривої намагнічування з клієнтського формуляра електричної машини або задати універсальну криву намагнічування, вказавши у діалоговому вікні блока 1-D Lookup Table вектор даних аргументу у вигляді $[-2:0.1:2]$, а вектор апроксимованої залежності кривої намагнічування задати виразом $0.858 * \text{atan}([-2:0.1:2] * 2.351)$ за правилами MATLAB, з відповідним масштабуванням до номінального струму збудження I_{dnom} . Варіант реалізації кола збудження електричної машини у цьому випадку показано на рис. 4.

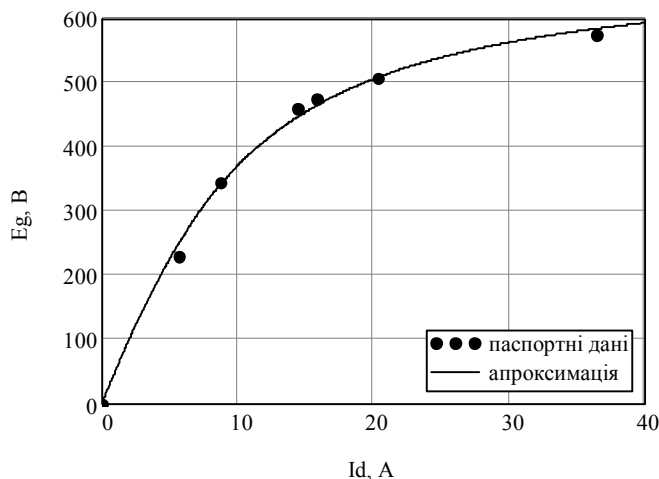


Рис. 3. Характеристика кривої намагнічування, апроксимованої функцією арктангенса та отриманої з паспортних даних для генератора 4ГПЭМ-220

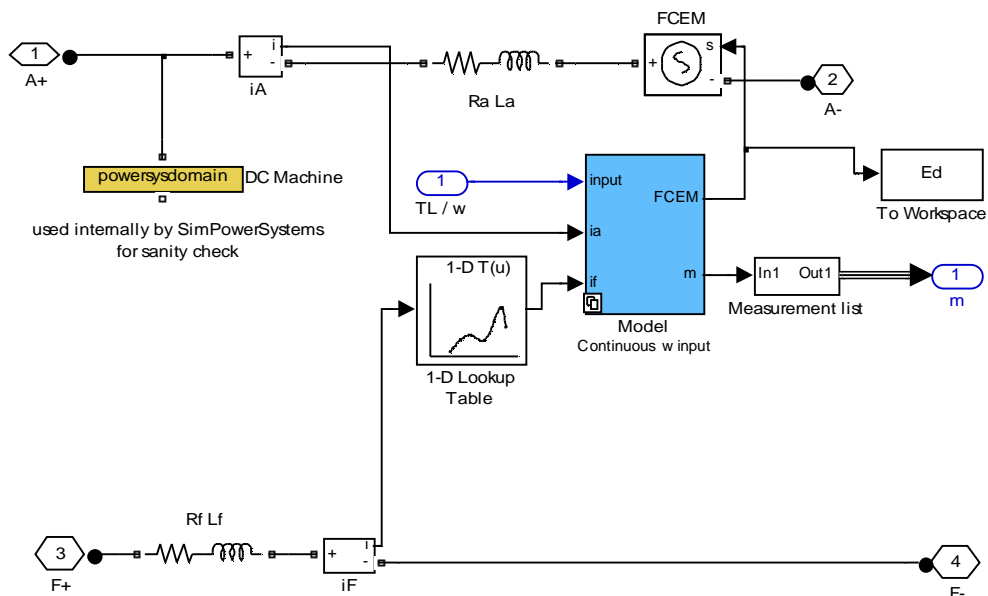


Рис. 4. Реалізація в моделі електричної машини постійного струму SimPowerSystems нелінійності кривої намагнічування за допомогою апроксимації сплайнами

Іншим етапом уточнення кола збудження є врахування вихрових струмів у масиві станини статора електричної машини. Потреба такого уточнення доведена ще в роботі [6], де й запропоновано найпростіший варіант реалізації фіктивного контуру вихрових струмів. Уточнений варіант врахування вихрових струмів за наявності ефекту витіснення (поверхневого ефекту)

запропоновано, як вже згадано вище, в роботах [5, 7–9]. У цьому випадку заступна електрична схема кола збудження (рис. 5) описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} L_s \frac{di_d}{dt} + i_d R_d + L_\mu \frac{di_\mu}{dt} = U_d ; \\ L_\mu \frac{di_\mu}{dt} = L_k \frac{di_k}{dt} + i_k R_k ; \\ i_\mu + i_k - i_d = 0. \end{cases} \quad (1)$$

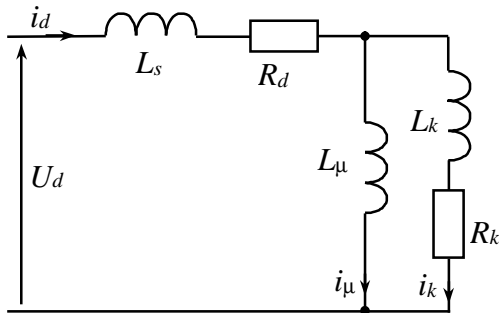


Рис. 5. Заступна електрична схема кола збудження генератора постійного струму

де i_d – струм обмотки збудження; i_μ – струм намагнічування; i_k – струм у фіктивному контурі вихрових струмів; U_d – напруга на обмотці збудження; R_d – опір обмотки збудження; $L_d = L_\mu + L_s$ – індуктивність обмотки збудження, яка має дві складові: L_μ – індуктивність намагнічування; L_s – індуктивність розсіювання.

Відтворити такий варіант кола збудження можливо шляхом заміни RL-ланки, яка імітує коло збудження в стандартній моделі (див. рис. 1), складнішим колом, що складене на основі заступної схеми рис. 5. Варіант реалізації такої моделі з врахуванням вихрових струмів та ефекту їх витіснення у масиві станини показано на рис. 6. Значення величин елементів заступної схеми рис. 5 можна знайти за рекомендаціями [5].

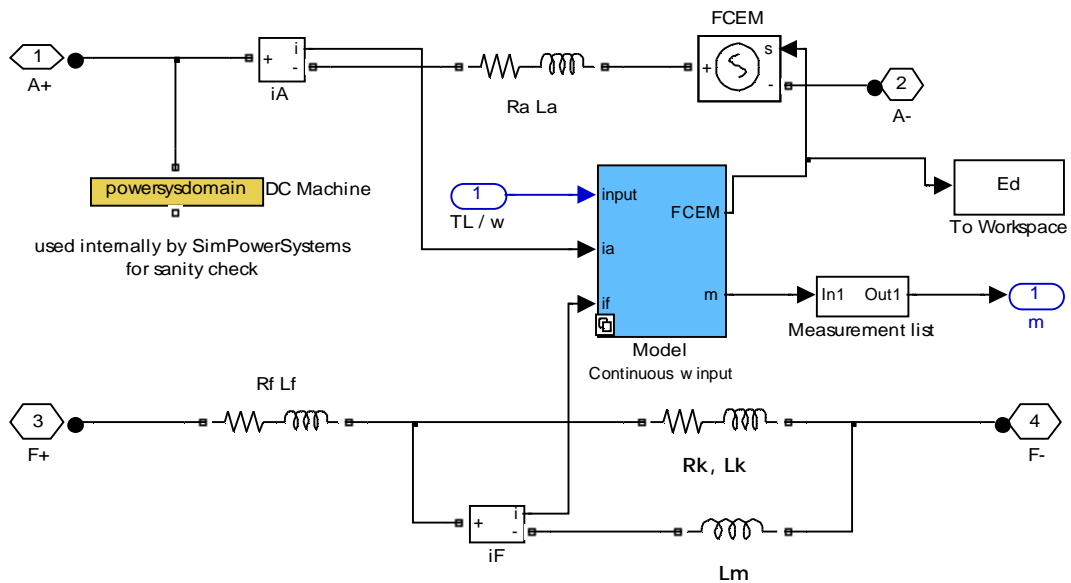


Рис. 6. Приклад реалізації врахування вихрових струмів у станині в стандартній моделі машини постійного струму SimPowerSystems

Порівняно поведінку обох моделей (стандартної та уточненої обома способами) на прикладі генератора типу 4ГПЭМ-220 з масивною станиною в замкненій за напругою якоря системі автоматичного регулювання з тиристорним збудником генератора. Досліджувалися перехідні процеси струму збудження I_d в режимах подавання та реверсу напруги збудження, що показано на графіках рис. 7. Для порівняння на рис. 8 показано зняті для аналогічної реальної системи експериментальні осцилограми на серійному генераторі 4ГПЭМ-220 на стенді Карпінського електромеханічного заводу (Росія, Свердловська обл.).

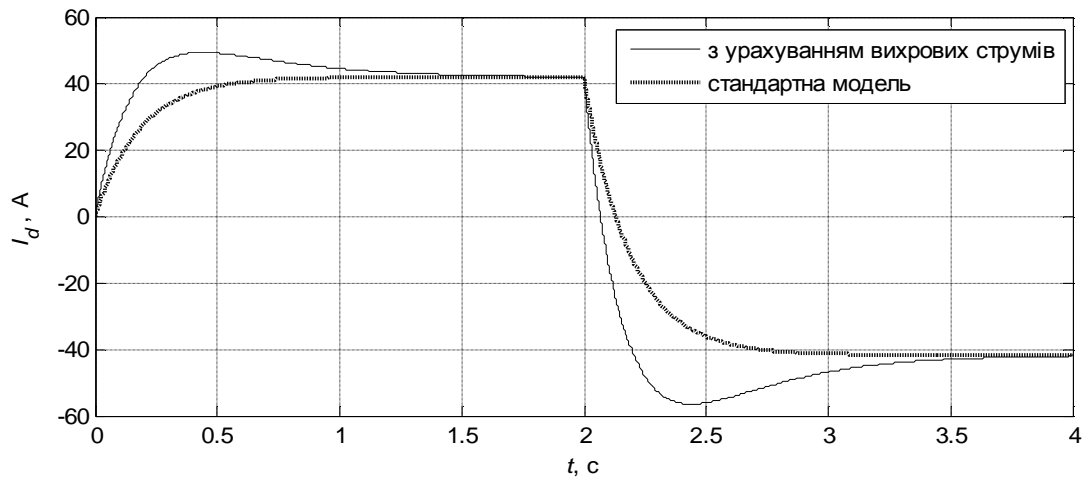


Рис. 7. Струм збудження генератора 4ГПЭМ-220 в режимах вмикання/реверс для обох моделей

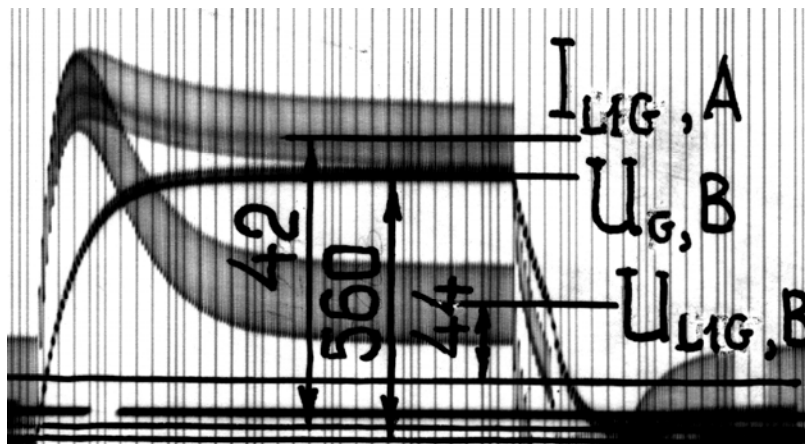


Рис. 8. Експериментальні осцилограми режиму вмикання напруги збудження в замкненій за напругою системі

Висновки

Пропоновані варіанти уточнення кола збудження комп'ютерної моделі машини постійного струму стандартної бібліотеки SimPowerSystems середовища імітаційного моделювання MATLAB + Simulink дають змогу:

- 1) врахувати нелінійність кривої намагнічування з точністю до 2–3 % ([5, 12]), що значно перевищує точність виготовлення електричних машин та їх серійного розкиду параметрів;
- 2) врахувати наявність вихрових струмів та ефект їхнього витіснення у випадку масивної станини електричної машини.

Розглянуті способи уточнення моделі кола збудження електричної машини постійного струму є простими в реалізації та зрозумілими навіть недосвідченому користувачеві, проте є недолік – у пропорованих моделях поки що не реалізовано зміну індуктивності намагнічування залежно від величини магнітного потоку, що заплановано усунути в подальших дослідженнях.

1. Мороз В. Особливості застосування числових методів у моделюванні сучасних електроприводів / В. Мороз // Теоретична електротехніка. – 2005. – Вип. 58. – С. 130–137. 2. Fedák V. Dynamic Simulation of Electrical Machines and Drive Systems Using MATLAB GUI [Електронний ресурс] / Viliam Fedák, Tibor Balogh and Pavel Zžskalický // MATLAB – A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications – Volume 1", [book edited by Vasilios N. Katsikis, ISBN 978-953-51-0750-7], Published: September 26, 2012 [under CC BY 3.0 license]. – [Режим доступу до ресурсу]: <http://www.intechopen.com/books/matlab-a-fundamental-tool-for-scientific->

computing-and-engineering-applications-volume-1/dynamic-simulation-of-electrical-machines-and-drive-systems-using-matlab-gui. 3. DC Generators [Електронний ресурс] / Odesie® Course Catalog // [Режим доступу до ресурсу]: <https://www.myodesie.com/wiki/index/returnEntry/id/3033>. 4. Characteristic of Separately Excited DC Generator [Електронний ресурс: *electrical4u.com*] / [Online Electrical Engineering] // – [Режим доступу до ресурсу]: <http://www.electrical4u.com/characteristic-of-separately-excited-dc-generator>. 5. Костинюк Л. Моделювання електроприводів : Навчальний посібник / Л. Костинюк, В. Мороз, Я. Паранчук. – Львів : Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2004. – 404 с. 6. Слежановский О. В. Об учете и компенсации влияния вихревых токов в системах управления потоком возбуждения электрических машин / О. В. Слежановский // *Электричество*. – 1962, № 9. – С. 23–27. 7. Плахтина О. Г. Уточнення моделі генератора постійного струму при моделюванні електроприводів / О. Г. Плахтина, В. І. Мороз // *Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 1995. – № 288: *Електромеханічні та електроенергетичні системи*. – С. 80–83. 8. Мороз В. Уточнення моделі двигуна постійного струму послідовного збудження / В. Мороз, Л. Карлюк // *Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 1998. – № 347: *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. – С. 118–123. 9. Мороз В. Інженерний метод врахування вихрових струмів у електромеханічних системах / В. І. Мороз, І. Ф. Снітков, Б. М. Харчишин // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 2. – С. 50–52. 10. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С. Н. Вешеневский. – 6-е изд., исправл. – М.: Энергия, 1977. – 432 с. 11. DC Machine [Електронний ресурс]. *MathWorks Support: Documentation*. – [Режим доступу до ресурсу]: <http://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/dcmachine.html>. 12. Архангельский Б. И. Аналитическое выражение кривой намагничивания электрических машин / Б. И. Архангельский // *Электричество*. – 1950. – № 3. – С. 30–32.