

УНІВЕРСАЛЬНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З КОНДЕНСАТОРНИМ САМОЗБУДЖЕННЯМ

О.П. Гоголюк*, докт. техн. наук, П.Ф. Гоголюк**, канд. техн. наук
Національний університет Львівська політехніка,
вул. Ст. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна,
e-mail: oksana.p.hoholyuk@lpnu.ua; petro.f.hoholiuk@lpnu.ua.

Запропоновано універсальну математичну модель автономного асинхронного генератора з конденсаторним самозбудженням у загальмованих фазних координатах з урахуванням електромагнітних зв'язків між обвитками фаз статора і ротора, насичення головного магнітного кола, втрат активної потужності в елементах магнітопроводу. Модель надає можливість аналізу усталених періодичних режимів і перехідних електромагнітних та електромеханічних процесів у автономних електропостачальних системах з довільними схемами вмикання її елементів і асинхронних генераторів. Модель забезпечує можливість урахування залишкового намагнічення магнітопроводу асинхронного генератора та зміни швидкості ротора на перебіг процесу самозбудження асинхронного генератора з уземленою нейтраллю статорної обвитки та несиметричним навантаженням. Бібл. 10, рис. 2.

Ключові слова: автономний асинхронний генератор, конденсаторне самозбудження, математична модель.

Вступ. Сучасні технології дають можливість споживачам електроенергії використовувати автономні генератори, які можуть конкурувати з централізованим виробництвом електроенергії. Такі джерела електроенергії, об'єднані в інтелектуальні мікромережі, є основою технологій розподіленого виробництва, що активно впроваджуються в даний час. За допомогою засобів розподіленого виробництва електроенергії можуть ефективно вирішуватися питання надійності електропостачання та екологічні проблеми шляхом використання нетрадиційних поновлюваних джерел енергії [1, 2].

З погляду специфічних особливостей функціонування автономних мікромереж порівняно з традиційними електропостачальними системами такі мікромережі мають низку особливостей, що впливають на їхні статичні характеристики та динамічні перехідні процеси, які необхідно враховувати під час їхнього проектування й експлуатації. Це зумовлено швидкими змінами напруги та частоти під час вмикання та перемикання електроприймачів, вмикання на паралельну роботу генераторів та коротких замиканнях. Співмірна потужність приводних двигунів генераторних агрегатів та динамічного навантаження асинхронних електродвигунів і швидкодія їхніх автоматичних систем керування суттєво ускладнюють динаміку електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів у таких системах [3]. У малопотужних автономних електропостачальних системах (ЕПС) застосовують асинхронні генератори (АГ) з конденсаторним самозбудженням без зв'язків з іншими джерелами стабільної напруги [1–5].

Математичні моделі асинхронного генератора найчастіше формуються для асинхронної машини зі сполученням обмоток статора зіркою з ізольованою нейтраллю в ортогональних нерухомих α, β чи обертових d, q ортогональних координатах [1–4] або в фазних координатах [5, 7–9] з наближеним урахуванням нелінійності веберамперної характеристики головного магнітного кола. Недоліком цих моделей є складність адекватного врахування впливу насичення головного магнітного кола, його залишкового намагнічення та втрат активної потужності в магнітопроводі АГ на параметри координат його усталених режимів, електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів у автономній ЕПС.

Мета роботи полягає у створенні універсальної математичної моделі асинхронного генератора з конденсаторним самозбудженням, що забезпечується урахуванням схемних режимних і параметричних особливостей генератора й елементів ЕПС, і спрямована на застосування в системах

© Гоголюк О.П., Гоголюк П.Ф., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-2146-4667>; ** <https://orcid.org/0000-0003-0002-4638>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

комп'ютерної математики та програмних комплексів аналізу перехідних електромагнітних і електромеханічних процесів електротехнічних систем.

Математична модель асинхронного генератора. Математичну модель асинхронного генератора формуємо в нерухомих фазних координатах статора та загальмованих координатах ротора як проекції просторових векторів фазних напруг, струмів, потокозчеплень і намагнічувальних сил на фазні вісі та втрат активної потужності в магнітопроводі на підставі підходу до створення математичної моделі асинхронного двигуна, які вказано в працях [6–9].

Диференційні рівняння електромагнітного стану АГ запишемо шляхом розділення магнітних потоків на потік головного магнітного кола і потоки розсіювання обвиток, що в свою чергу розділені на власний і взаємий міжфазний. Такий підхід забезпечує формування математичної моделі АГ у фазних фізичних координатах для обвитки статора, спрощує урахування залишкового намагнічення магнітопроводу, що необхідно для дослідження процесу самозбудження, й адекватно враховує вплив струмів нульової послідовності на параметри координат режимів і процесів автономної ЕПС за необхідності уземлення нейтралі асинхронного генератора.

Диференційні рівняння електричних кіл АГ зі сполучення обвитки статора зіркою з уземленням нейтралі пропонуються формувати в такому вигляді

$$u_{sa} = R_{sa} i_{sa} + L_{\sigma sa} di_{sa} / dt + M_{\sigma ba} di_{sb} / dt + M_{\sigma ca} di_{sc} / dt + d\phi_{\delta a} / dt, \quad (1)$$

$$u_{sb} = R_{sb} i_{sb} + L_{\sigma sb} di_{sb} / dt + M_{\sigma ab} di_{sa} / dt + M_{\sigma cb} di_{sc} / dt + d\phi_{\delta b} / dt, \quad (2)$$

$$u_{sc} = R_{sc} i_{sc} + L_{\sigma sc} di_{sc} / dt + M_{\sigma ca} di_{sa} / dt + M_{\sigma bc} di_{sb} / dt + d\phi_{\delta c} / dt, \quad (3)$$

де u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} – фазні напруги обвиток статора; i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} – фазні струми обвиток статора; $\phi_{\delta a}, \phi_{\delta b}, \phi_{\delta c}$ – фазні робочі потокозчеплення обвиток статора від основного магнітного потоку повітряного проміжку; $R_{sa}, R_{sb}, R_{sc}, L_{\sigma sa}, L_{\sigma sb}, L_{\sigma sc}$ – резистанси й індуктивності розсіювання обвиток фаз статора.

Диференційні рівняння ротора з короткозамкненою обвиткою формуються в такому вигляді

$$0 = R_r i_{ra} + L_{\sigma r} di_{ra} / dt + d\phi_{\delta a} / dt + (L_{\sigma r} (i_{rb} - i_{rc}) + \phi_{\delta b} - \phi_{\delta c}) \omega_r / \sqrt{3}, \quad (4)$$

$$0 = R_r i_{rb} + L_{\sigma r} di_{rb} / dt + d\phi_{\delta b} / dt + (L_{\sigma r} (i_{rc} - i_{ra}) + \phi_{\delta c} - \phi_{\delta a}) \omega_r / \sqrt{3}, \quad (5)$$

$$0 = R_r i_{rc} + L_{\sigma r} di_{rc} / dt + d\phi_{\delta c} / dt + (L_{\sigma r} (i_{ra} - i_{rb}) + \phi_{\delta a} - \phi_{\delta b}) \omega_r / \sqrt{3}, \quad (6)$$

де i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} – зведені до обвитки статора фазні струми ротора; ω_r – зведена до полюсної ділянки статора кутова швидкість обертання ротора; $R_r, L_{\sigma r}$ – зведені до обвитки статора еквівалентні резистанси й індуктивності розсіювання фаз обвитки ротора.

Втрати активної потужності в магнітопроводі враховуються введенням у заступну схему електричних кіл АГ додаткового контуру з резистором, кількісне значення якого відобразить ці втрати за аналогією з урахуванням втрат в стрижнях магнітопроводу трансформатора [10].

Записані на підставі другого закону Кірхгофа для електричного контуру з резистивним опором і закону Ампера (повного струму) для магнітних кіл АГ диференційні рівняння для визначення робочого потокозчеплення мають вигляд

$$\frac{d\phi_{\delta a}}{dt} = R_{st}(\phi_{\delta}) \left(i_{sa} + i_{ra} - \frac{2 i_m(\phi_{\delta})}{3 \phi_{\delta}} \phi_{\delta a} \right), \quad (7)$$

$$\frac{d\phi_{\delta b}}{dt} = R_{st}(\phi_{\delta}) \left(i_{sb} + i_{rb} - \frac{2 i_m(\phi_{\delta})}{3 \phi_{\delta}} \phi_{\delta b} \right), \quad (8)$$

$$\frac{d\phi_{\delta c}}{dt} = R_{st}(\phi_{\delta}) \left(i_{sc} + i_{rc} - \frac{2 i_m(\phi_{\delta})}{3 \phi_{\delta}} \phi_{\delta c} \right), \quad (9)$$

де $R_{st}(\phi_{\delta})$ – резистивний опір, який враховує втрати активної потужності в магнітопроводі статора АГ від гістерезису й обертового магнітного поля; $i_m(\lambda_{\delta})$ – модуль зображального вектора струму

намагнічення, який визначається з веберамперної характеристики головного магнітного кола АГ;
 $\lambda_{\delta} = \sqrt{2(\lambda_{\delta a}^2 + \lambda_{\delta b}^2 + \lambda_{\delta c}^2)}/3$ – модуль зображального вектора робочого потокозчеплення.

Рівняння механічного руху ротора АГ має вигляд

$$Jp_0^{-1}d\omega_r / dt = M_g(\omega_r) - M_{em}, \quad (10)$$

де p_0 , J – відповідно кількість пар полюсів і момент інерції ротора АГ з приводним механізмом;
 $M_{em} = -p_0(\phi_{\delta a}(i_{sb} - i_{sc}) + \phi_{\delta b}(i_{sc} - i_{sa}) + \phi_{\delta c}(i_{sa} - i_{sb}))/\sqrt{3}$ – електромагнітний момент АГ; $M_g(\omega_r)$ – механічний момент приводного механізму.

Для формування цифрових моделей, орієнтованих на застосування систем комп'ютерної математики, рівняння електромагнітного й електромеханічного стану АГ запишемо в матрично-векторній формі в такому вигляді

$$\begin{pmatrix} \mathbf{L}_{\sigma s} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}_{\sigma r} & \mathbf{1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} d\mathbf{i}_s/dt \\ d\mathbf{i}_r/dt \\ d\boldsymbol{\Psi}_{\delta}/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_r & \mathbf{0} \\ \mathbf{R}_{st}(\phi_{\delta}) & \mathbf{R}_{st}(\phi_{\delta}) & -R_m^c(\phi_{\delta})\mathbf{R}_{st}(\phi_{\delta}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \\ \boldsymbol{\Psi}_{\delta} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{E}_r \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$M_{em} = \frac{1}{\sqrt{3}} p_0 \boldsymbol{\Psi}_{\delta} \mathbf{A} \mathbf{i}_s, \quad (12)$$

де $\boldsymbol{\Psi}_{\delta} = (\phi_{\delta a}, \phi_{\delta b}, \phi_{\delta c})_t$ – вектор робочих потокозчеплень фаз; $\mathbf{E}_r = \omega_r/\sqrt{3} \cdot \mathbf{A}(L_{\sigma r}\mathbf{i}_r + \boldsymbol{\Psi}_{\delta})$ – вектор електрорушійних сил обертання ротора; $\mathbf{L}_{\sigma r}$ – діагональна матриця індуктивностей розсіювання обвиток фаз ротора; $\mathbf{L}_{\sigma s}$ – квадратна матриця власних фазних і взаємних міжфазних індуктивностей розсіювання обвиток статора, яка має вигляд

$$\mathbf{L}_{\sigma s} = \begin{pmatrix} L_{\sigma sa} & M_{\sigma ba} & M_{\sigma ca} \\ M_{\sigma ab} & L_{\sigma sb} & M_{\sigma cb} \\ M_{\sigma ac} & M_{\sigma bc} & L_{\sigma sc} \end{pmatrix},$$

де $\mathbf{L}_{\sigma r} = \text{diag}(L_{\sigma r}, L_{\sigma r}, L_{\sigma r})$ – діагональна матриця індуктивностей розсіювання обвиток фаз ротора;
 $R_m^c(\phi_{\delta}) = 2/3 i_m(\phi_{\delta})/\phi_{\delta}$ – статичний магнітний опір головного магнітного кола;
 $\mathbf{R}_{st}(\phi_{\delta}) = \text{diag}(R_{sta}(\phi_{\delta}), R_{stb}(\phi_{\delta}), R_{stc}(\phi_{\delta}))$ – діагональна матриця резисторів, що враховують втрати активної потужності в магнітопроводі АГ; \mathbf{A} – допоміжна матриця коефіцієнтів, яка має вигляд

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Сформована система диференційних рівнянь електромагнітного стану забезпечує безпроблемне врахування залишкового магнітного потоку, струмів у обвитках і напруг на ємностях.

Матриця Якобі диференційних рівнянь стану ЕПС АГ (11), (12) є несиметричною. Це зумовлює складнощі створення алгоритму автоматичного формування цифрових моделей ЕПС з асинхронним генератором.

На підставі діакоптики диференційних рівнянь стану АГ, яка ґрунтується на припущенні сталості колової швидкості обертання ротора на кроці інтегрування, електрорушійні сили обертання ротора в цифровій моделі ЕПС доцільно формувати у вигляді керованих напруг, що залежать від струмів ротора та робочих потокозчеплень головного магнітного кола згідно з рівняннями (4) – (6). Керовані напруги реалізуються у вигляді спеціальних функцій з використанням взаємних зв'язків між вітками заступних схем електричних і магнітних кіл статора та ротора електричної машини [7–9].

Для автоматичного формування цифрових моделей ЕПС з АГ топологічними методами [7, 8] необхідно створити заступну схему АГ, придатну для формування цифрової моделі у контурних координатах. Створену на підставі рівнянь (1) – (12) електромагнітного й електромеханічного стану АГ його заступну схему наведено на рис. 1.

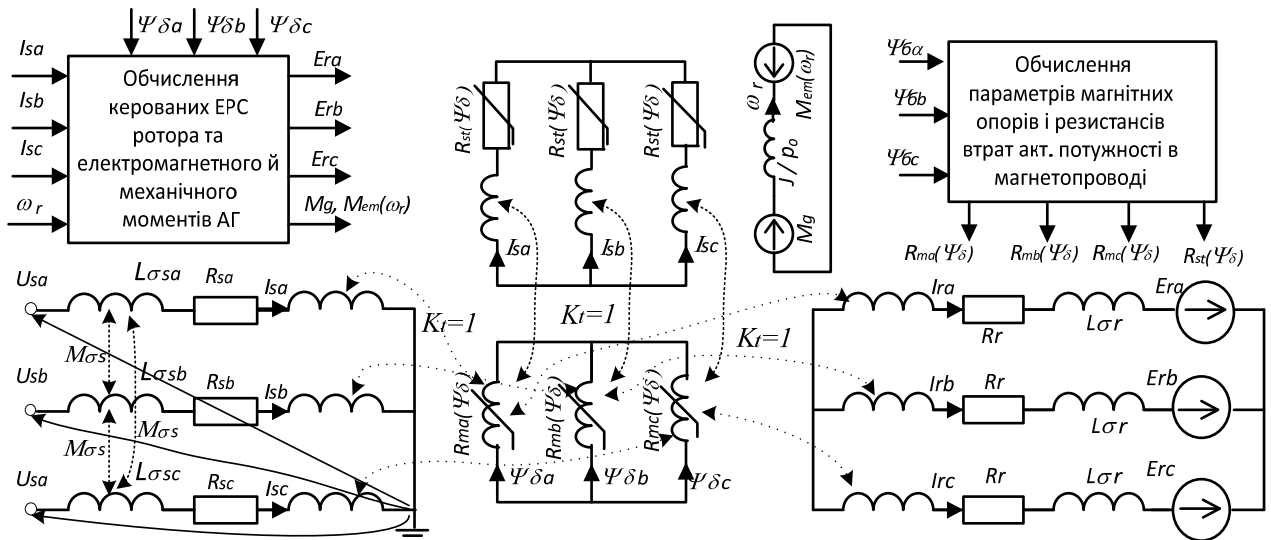


Рис. 1

На рис. 1 величина $K_t=1$ відповідає взаємному індуктивному зв'язку між електричними і магнітними колами АГ (за фізичним змістом він є аналогією коефіцієнту трансформації трансформатора з однакою кількістю витків обмоток). Керовані ЕРС обертання ротора є членами рівнянь його стану (4) – (6) та мають такий вигляд: $E_{ra} = (L_{\sigma r}(i_{rb} - i_{rc}) + \phi_{\delta b} - \phi_{\delta c})\omega_r / \sqrt{3}$, $E_{rb} = (L_{\sigma r}(i_{rc} - i_{ra}) + \phi_{\delta c} - \phi_{\delta a})\omega_r / \sqrt{3}$, $E_{rc} = (L_{\sigma r}(i_{ra} - i_{rb}) + \phi_{\delta a} - \phi_{\delta b})\omega_r / \sqrt{3}$.

Тестування математичної моделі здійснено для асинхронної машини 4A180M1 з такими параметрами: $U_n=380$ В, $P_n=30$ кВт, $\cos\varphi=0,91$, $f=50$ Гц, $p_o=1$, $s_n=0,02$, $J=0,34$ кГм², $L_{\sigma s}=0,002$ Гн, $M_{\sigma s}=0,0009$ Гн, $R_s=0,16$ Ом, $L_{\sigma r}=0,0016$ Гн, $R_r=0,078$ Ом.

Веберамперна характеристика головного магнітного кола АГ апроксимована поліномом $i_m(\phi_\delta) = 17,42\phi_\delta + 1,8\phi_\delta^5 + 0,74\phi_\delta^9$, на підставі якої отримано характеристику статичного магнітного опору у вигляді $R_m^c(\phi_\delta) = 17,42 + 9\phi_\delta^4 + 6,7\phi_\delta^8$. Залишкове потокозчеплення головного магнітного кола: $\phi_{\delta a}(0) = 0,2$ Вб, $\phi_{\delta b}(0) = \phi_{\delta c}(0) = -0,1$ Вб.

Характеристика $R_{st}(\phi_\delta)$ опору, який враховує втрати активної потужності в магнітопроводі, прийнято квадратичною, отже цей опір можна прийняти сталим. Для досліджуваного АГ значення цих опорів $R_{sta}(\phi_{\delta a}) = R_{stb}(\phi_{\delta b}) = R_{stc}(\phi_{\delta c}) = 300$ Ом.

Резистивні опори навантаження, сполучені зіркою з уземленою нейтраллю, прийнято такими: $R_{na} = R_{nb} = R_{nc} = 4,4$ Ом. Для компенсації реактивної потужності задля створення магнітного поля АГ вибрано конденсаторну батарею зі сполученням конденсаторів фаз трикутником з ємністю $C=3*80$ мкФ.

На рис. 2 наведено осцилограми координат процесу запуску АГ з конденсаторним самозбудженням, що здійснювалося в два етапи: плавний розгін ротора генератора без навантаження до колової швидкості обертання ротора $\omega_r = 314,16$ рад/с, що відповідає частоті 50 Гц. У момент досягнення фазною напругою статора номінального значення 220 В здійснюється вмикання навантаження. На рис. 2 у вікнах а і б наведено криві зміни фазної напруги u_{sa} і робочого потокозчеплення $\phi_{\delta a}$, а у вікнах в і г – струму статора i_{sa} та зведеного до обмотки статора струму ротора i_{ra} .

Під час вмикання навантаження має місце провал напруги АГ з наступним її збільшенням до номінального значення (рис. 2, а). Дослідження на створеній математичній моделі АГ показали, що задля забезпечення стандартних показників якості напруги в автономній ЕПС тільки з АГ необхідна швидкодійна динамічна компенсація реактивної потужності.

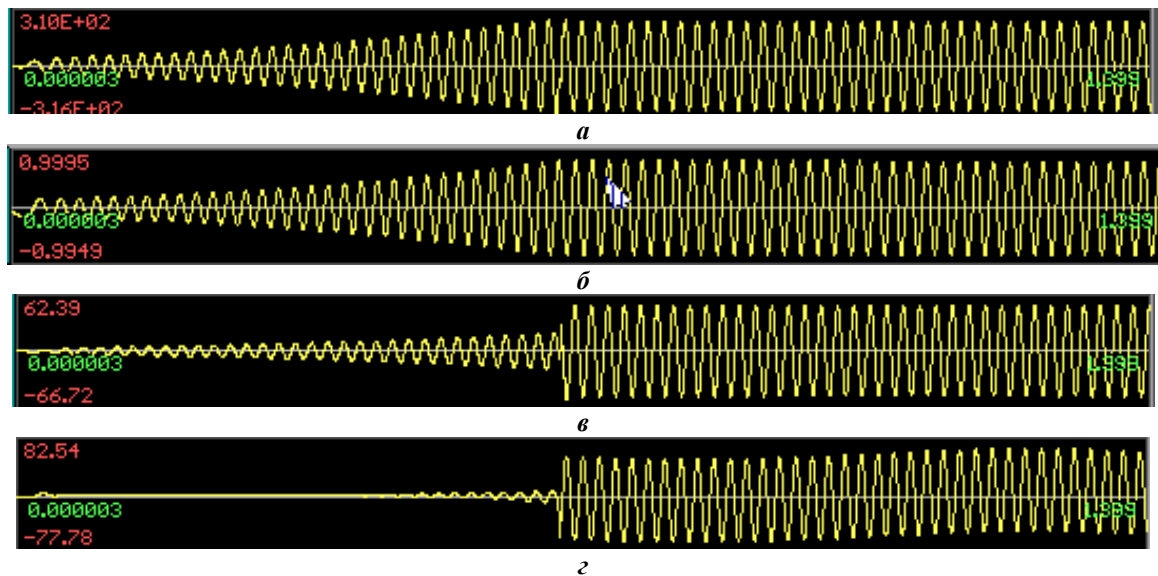


Рис. 2

Висновки. Створено універсальну математичну модель автономного асинхронного генератора з конденсаторним самозбудженням у фазних загальмованих координатах з урахуванням електромагнітних зв'язків між обвитками фаз статора і ротора та насичення головного магнітного кола й втрат активної потужності в елементах магнітопроводу. Модель забезпечує можливість аналізу усталених періодичних режимів, електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів у автономних електропостачальних системах з довільними схемами вмикання елементів ЕПС та асинхронних генераторів з урахуванням схемних, режимних і параметричних особливостей їхніх елементів. Модель забезпечує можливість урахування залишкового намагнічення магнітопроводу асинхронного генератора на перебіг процесу самозбудження асинхронного генератора з уземленою нейтраллю статорної обвитки і несиметричним навантаженням.

1. Макаревич С.С. Математична модель автономного електромеханічного комплексу з компенсованими асинхронними машинами. *Енергетика і електрифікація*. 2009. № 2. С. 17–22.
2. Мазуренко Л.И., Лесник В.А., Джура А.В., Дынник Л.Н. Моделирование и анализ трехфазного асинхронного генератора с вентильно-емкостным возбуждением и амплитудно-фазовым регулированием реактивного тока. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ*. Ч. 1. 2006. Вип.3/2006 (38). С. 116–119.
3. Вишнеvский Л.В., Муха Н.И., Дао Минь Куан. Управление напряжением автономных асинхронных генераторных установок. Одесса: НУ ОМА, 2016. 196 с.
4. Redouane Hachelaf, Djilali Kouchih, Mohamed Tadjine, Mohamed Seghir Boucherit. Analysis of magnetic saturation effects in the squirrel cage induction generators. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2024. Vol. 15. No 2. Pp. 744–752. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i2.pp744-752>.
5. Ibrahim Athamnah, Yaser Anagreh, Aysha Anagreh. Optimization algorithms for steady state analysis of self excited induction generator. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2023. Vol. 13. No 6. Pp. 6047– 6057. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i6.p.6047-6057>.
6. Родькін Д.Й., Ченчевой В.В. Характеристики і режими асинхронного генератора при глибокому насиченні сталі. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2014. № 15 (91). С. 271–276.
7. Gogolyuk P., Grechyn T., Ravlyk A., Grinberg I. Mathematical modeling and simulation of transients in power distribution systems with valve devices and dynamic loading. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Toronto, ON, Canada, 13-17 July 2003. Pp. 1580–1585. DOI: <https://doi.org/10.1109/PES.2003.1267391>.
8. Gogolyuk P., Zhovnir Y., Grinberg I. Mathematical modeling of electric power distribution systems for electrical drives of oil wells displacement pump. *IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Dallas, TX, USA, 21-24 May 2006. Pp. 197–201. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDC.2006.1668482>.
9. Gogolyuk P.F., Hoholyuk O.P., Kutsyk T.A. Universal mathematical model of asynchronous machine as an element microgrid in smart grid. *Mathematical Modeling and Computing*. 2021. Vol. 8. No 3. Pp. 444–453. DOI: <https://doi.org/10.23939/mmc2021.03.444>.
10. Hoholyuk O., Gogolyuk P., Balatska L. Improved mathematical model for analysis of low-frequency

electromagnetic processes in transformers. Proceedings of IEEE International Conference on *Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, (Online Conference), Poland, 16-19 September 2020. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE50798.2020.9238693>.

UNIVERSAL MATHEMATICAL MODEL OF AN AUTONOMOUS ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH CAPACITOR SELF-EXCITATION

O.P. Hoholyuk, P.F. Gogolyuk
Lviv Polytechnic National University,
St. Bandera str., 12, Lviv, 79013, Ukraine,
e-mail: oksana.p.hoholyuk@lpnu.ua ; petro.f.hoholiuk@lpnu.ua.

A universal mathematical model of an autonomous asynchronous generator with capacitor self-excitation in retarded phase coordinates is proposed, taking into account the electromagnetic connections between the windings of the stator and rotor phases, saturation of the main magnetic circuit, and active power losses in the magnetic circuit elements. The model provides an opportunity to analyze stable periodic modes and transient electromagnetic and electromechanical processes in autonomous power supply systems with arbitrary switching schemes of its elements and asynchronous generators. The model provides the possibility of taking into account the residual magnetization of the magnetic circuit of an asynchronous generator and the change in rotor speed during the course of the self-excitation process of an asynchronous generator with a grounded neutral of the stator winding and an asymmetric load. References 10, figures 2.

Keywords: autonomous asynchronous generator, capacitor self-excitation, mathematical model.

1. Makarevych S.S. Mathematical model of an autonomous electromechanical complex with compensated asynchronous machines. *Enerhetyka ta elektryfikatsiia*. 2009. No 2. Pp. 17–22. (Ukr)
2. Mazurenko L.Y., Lesnyk V.A., Jura A.V., Dynnyk L.N. Modeling and analysis of a three-phase asynchronous generator with valve-capacitance excitation and amplitude-phase regulation of the reactive current. *Visnyk Kremenchytskoho derzhavnoho politekhnichnogo universytetu*. Part 1. 2006. Vyp. 3/2006 (38). Pp. 116–119. (Rus).
3. Vishnevsky L.V., Mukha N.I., Dao Minh Kuan. Voltage control of autonomous asynchronous generator sets. Odessa: NU OMA, 2016. 196 p. (Rus)
4. Redouane Hachelaf, Djilali Kouchih, Mohamed Tadjine, Mohamed Seghir Boucherit. Analysis of magnetic saturation effects in the squirrel cage induction generators. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2024. Vol. 15. No 2. Pp. 744–752. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i2.pp744-752>.
5. Ibrahim Athamnah, Yaser Anagreh, Aysha Anagreh. Optimization algorithms for steady state analysis of self excited induction generator. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2023. Vol. 13. No 6. Pp. 6047– 6057. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i6. Pp. 6047-6057>.
6. Rodkin D.Y., Chenchevoi V.V. Characteristics and modes of an asynchronous generator at deep saturation of steel. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy*. 2014. No 15 (91). Pp. 271–276. (Ukr)
7. Gogolyuk P., Grechyn T., Ravlyk A., Grinberg I. Mathematical modeling and simulation of transients in power distribution systems with valve devices and dynamic loading. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Toronto, ON, Canada, 13-17 July 2003. Pp. 1580–1585. DOI: <https://doi.org/10.1109/PES.2003.1267391>.
8. Gogolyuk P., Zhovnir Y., Grinberg I. Mathematical modeling of electric power distribution systems for electrical drives of oil wells displacement pump. *IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Dallas, TX, USA, 21-24 May 2006. Pp. 197–201. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDC.2006.1668482>.
9. Gogolyuk P.F., Hoholyuk O.P., Kutsyk T.A. Universal mathematical model of asynchronous machine as an element microgrid in smart grid. *Mathematical Modeling and Computing*. 2021. Vol. 8. No 3. Pp. 444–453. DOI: <https://doi.org/10.23939/mmc2021.03.444>.
10. Hoholyuk O., Gogolyuk P., Balatska L. Improved mathematical model for analysis of low-frequency electromagnetic processes in transformers. Proceedings of IEEE International Conference on *Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, (Online Conference), Poland, 16-19 September 2020. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE50798.2020.9238693>.

Надійшла 16.05.2024
Остаточний варіант 04.07.2024