

Н. В. ЗАЧЕПА, асп. КрНУ;
Ю. В. ЗАЧЕПА, канд. техн. наук, доц. КрНУ;
С. А. СЕРГІЄНКО, канд. техн. наук, доц. КрНУ

ПРОГРАМНО-ЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК З АСИНХРОННИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Вступ. Останнім часом все більшу популярність знаходять автономні дизель-генераторні установки, у яких застосовуються безконтактні генератори трифазного змінного струму [1]. На сьогодні найчастіше застосовуються синхронні генератори. Асинхронні генератори у порівнянні із синхронними мають більше просту й надійну конструкцію, менші масу й вартість у діапазоні потужностей до 100 кВт [2]. Однак для широкого використання дизель-генераторні установки з асинхронними генераторами залишаються маловивченими питання визначення переважувальної здатності останнього, а також якісні показники енергії, що генерується. Реальний лабораторний стенд в порівнянні з програмно-логічним комплексом найчастіше має високу вартість складну внутрішню структуру, об'ємну технічну документацію. Установки складно модернізувати, змінювати склад і призначення. Вказані недоліки зумовили необхідність розробки програмно-логічного комплексу для дослідження енергопроцесів в автономних джерел живлення на базі дизель-генераторної установки з асинхронним генератором. Цей комплекс дає можливість моделювати (штучно створювати) і оцінювати різні аварійні ситуації, можливість випробовувати установку в екстремальних режимах, змінювати умови випробовування і характеристики обладнання; аналізувати фактори виникнення аварійних ситуацій, кількість студентів що працюють зі стендом обмежується лише наявністю персонального компютера, на які встановлено віртуальний стенд.

Мета роботи. Розробка математичної моделі дизель-генераторної установки з асинхронним генератором у вигляді програмно-логічного комплексу-тренажера.

Матеріали та результати досліджень. Програмно-логічний комплекс (ПЛК) можна умовно поділити на чотири основні блоки – це дизельний двигун (ДД), асинхронний генератором (АГ), ємнісна система збудження та блок споживачів постійного та змінного струму.

Математична модель дизельного двигуна. Сучасний дизельний двигун являє собою сукупність взаємодіючих елементів, до числа яких відноситься споживач, безпосередньо сам двигун, що містить блок з камерами згорання, циліндропоршневіми групами й колінчатим валом [3]. Робота ДД у сталому режимі можлива тільки при виконанні умов статичної рівноваги:

$$M_{kr} - M_c = 0, \quad (1)$$

де M_{kr} – крутний момент ДД; M_c – момент опору, створюваний АГ.

Рівняння двигуна в операторній формі запису має вигляд:

$$(T_D p + k_D) \varphi = \theta_h \chi - \theta_N \alpha_D, \quad (2)$$

де T_D – стала часу двигуна; $p = d/dt$ – оператор диференціювання; k_D – безрозмірний коефіцієнт самовирівнювання; χ – переміщення паливної рейки насоса; θ_h , θ_N – безрозмірні коефіцієнти приведення.

Математична модель АГ.

Математична модель АГ розроблена на основі відомих рівнянь асинхронної машини з рядом допущень [4] у трифазній системі координат у матричній формі:

$$d[\Psi_s]/dt = [u_s] - R_s [i_s]; \quad d[\Psi_r]/dt = [u_r] - R_r [i_r] + j\omega[\Psi_r], \quad (3)$$

де $[u_s] = [u_A \ u_B \ u_C]^T$, $[u_r] = [u_a \ u_b \ u_c]^T$ – транспоновані матриці миттєвих значень фазних напруг статора й ротора відповідно; $[i_s] = [i_A \ i_B \ i_C]^T$, $[i_r] = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ – транспоновані матриці миттєвих значень струмів у фазах статора й ротора відповідно; $[\Psi_s] = [\Psi_A \ \Psi_B \ \Psi_C]^T$, $[\Psi_r] = [\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T$ – транспоновані матриці повних потокозчеплень фазних обмоток статора й ротора відповідно; ω – електрична частота обертання;

$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$, $[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$ – активні опори обмоток статора й ротора відповідно.

Облік насичення магнітопровода АГ представлений залежністю взаємної індуктивності L_{μ} від струму i_{μ} намагнічування [4]:

$$L_{\mu} = 1/(a + bi_{\mu}^2), \quad (4)$$

де a, b – коефіцієнти апроксимації кривої намагнічування.

© Н.В. Зачепа, Ю.В. Зачепа, С.А. Сергієнко, 2015

Рівняння руху АГ має вигляд:

$$d\omega_m / dt = (M_{kr} - M_c) / J, \quad (5)$$

де ω_m – механічна частота обертання АГ (визначає електричну частоту обертання ротора $\omega = z\omega_m$, z – число пара полюсів); J – момент інерції АГ.

Математична модель ємнісної системи збудження (ЄСЗ).

Для режиму збудження АГ у статорний ланцюг включаються конденсатори, тому в (3) маємо

$$[u_s] = (-1/C) \int_0^t [i] dt + [u_0], \quad (6)$$

де $[i] = [i_{cA} \ i_{cB} \ i_{cC}]^T$ – транспонована матриця миттєвих значень струмів, які протікають у ємностях; $[u_0] = [u_{0A} \ u_{0B} \ u_{0C}]^T$ – транспонована матриця миттєвих значень фазних напруг у початковий момент часу $t = t_0$; C – ємність конденсаторів збудження.

Активне (R), активно-індуктивне (RL) навантаження.

На основі другого закону Кірхгофа рівняння для миттєвих значень фазних напруг на навантаженні будуть мати вигляд:

$$L_n di_n / dt = u_c - i_n R_n, \quad (7)$$

де L_n – індуктивність навантаження (для 100 % активного навантаження в рівняннях необхідно прийняти $L_n = 0$); R_n – активний опір навантаження; $i_n = [i_{nA} \ i_{nB} \ i_{nC}]^T$ – транспонована матриця миттєвих значень струму у відповідній фазі навантаження.

Рухове навантаження (АД).

В сучасний час у переважній більшості випадків споживачем енергії являється асинхронний двигун. Для проведення досліджень роботи АД від асинхронного генератора була складена математична модель у трьохфазній системі координат відповідно [5].

$$u_c = i_{sm} R_{sm} + d\Psi_{sm} / dt; \quad 0 = i_{rm} R_{rm} + d\Psi_{rm} / dt, \quad (8)$$

де $i_{sm} = [i_A \ i_B \ i_C]^T$, $i_{rm} = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ – транспоновані матриці миттєвих значень струмів у фазах статора і ротора відповідно; $\Psi_{sm} = [\Psi_A \ \Psi_B \ \Psi_C]^T$, $\Psi_{rm} = [\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T$ – матриці повних потокозчеплень фазних обмоток статора і ротора відповідно; R_{sm}, R_{rm} – активні опори обмоток статора і ротора.

Потокозчеплення будь-якої фази АД визначаються відповідно (8).

Рівняння руху АД має вигляд:

$$d\omega_m / dt = (M_m - M_c) / J_m, \quad (9)$$

де ω_m – кутова частота обертання АД; J_m – момент інерції АД; M_m – електромагнітний момент АД; M_c – момент навантаження на валу АД.

Імітація різних видів споживачів виконувалась шляхом створення відповідного моменту навантаження на валу АД. Загальна формула, що описує характер моменту:

$$M_c = M_0 + (M_{nm} - M_0) \cdot (\omega / \omega_{0n})^n, \quad (10)$$

де M_{nm} – номінальний момент навантаження; n – коефіцієнт, який визначається характером споживача; $M_0 \approx (0,05 - 0,1) \cdot M_{nm}$ – момент неробочого ходу АД:

Загальний вигляд лицьової панелі розробленого комплексу-тренажера ДГУ з АГ наведено на рис. 1.

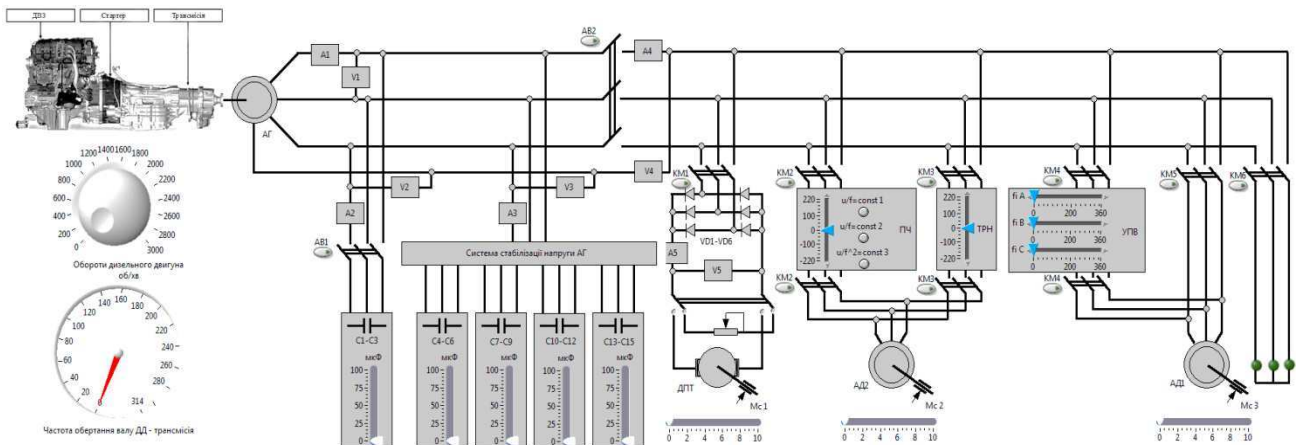


Рис. 1 Лицьова панель комплексу-тренажера з дослідження ДГУ з АГ.

До затискачів генератора є можливість підключення як споживачів змінного, так і постійного струмів. Останні приєднуються через випрямляч. Структурні схеми основних елементів ДГУ – ДД і АГ – з реалізацією в спеціалізованому пакеті прикладних програм LabView представлені на рис. 2 та на рис. 3 відповідно.

Для візуалізації виведені поточні значення частоти обертання ДД, напруги та струмів безпосередньо АГ, ЄСЗ та характеристики споживачів електричної енергії. Реалізована можливість регулювання частоти обертання ротора АГ, зміни параметрів ЄСЗ та блоку споживачів постійного та змінного струмів, здійснювати регульований пуск електричних машин з живленням від АГ за рахунок тиристорного регулятора напруги (рис. 4) та перетворювача частоти (ПЧ). Крім того, для перетворювача частоти є можливість вибору одного з трьох основних законів частотного керування. Також є можливість зміни завдання різного роду моментів опору на валах рухового навантаження, як було зазначено раніше. Пристрій пофазного включення (ППВ) реалізує принцип сприятливого пуску АД шляхом регулювання кута затримки на включення кожної фази. Крім того розроблений ПЛК дозволяє проводити дослідження групового (рис. 5) та каскадного (рис. 6) пусків електричних двигунів.

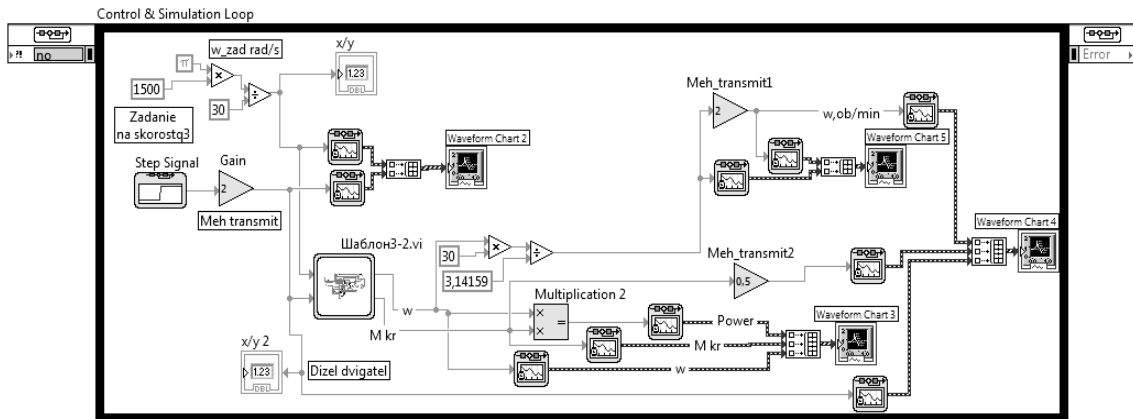


Рис. 2 Структурна схема ДД із регулятором частоти обертання, реалізована в LabView.

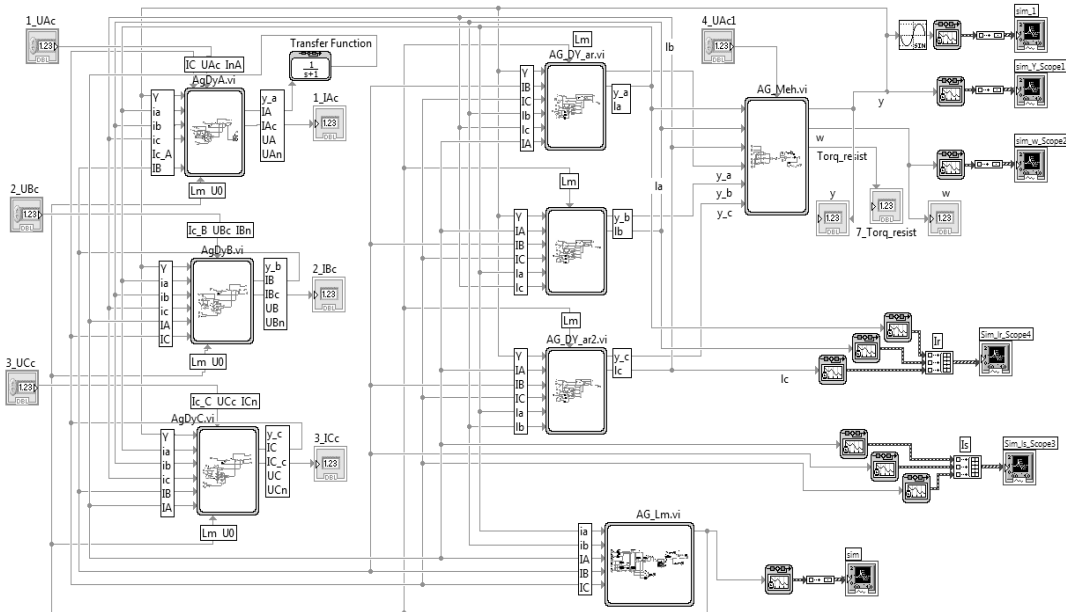
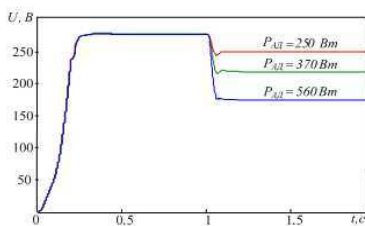
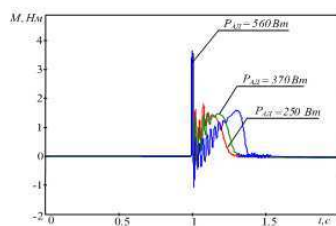


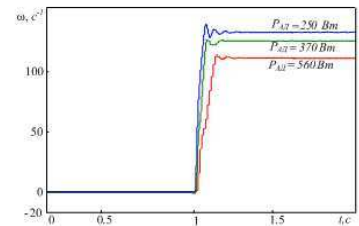
Рис. 3 Структурна схема АГ, реалізована в LabView.



а) напруги АГ



б) моменти АД1, АД2, АД3



в) частоти обертання АД1, АД2, АД3

Рис. 4 Характеристики ДГУ при пуску АД різної потужності на неробочому ході з використанням ТРН.

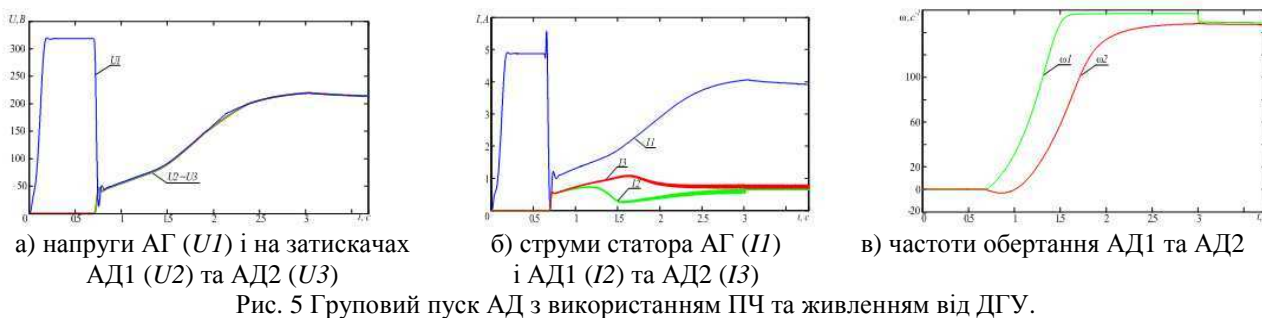


Рис. 5 Груповий пуск АД з використанням ПЧ та живленням від ДГУ.

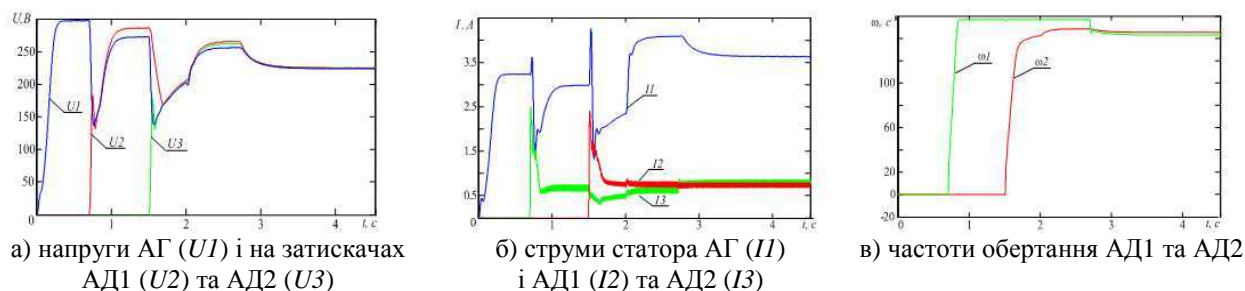


Рис. 6 Каскадний пуск АД з використанням ПЧ та живленням від ДГУ.

Адекватність розробленого ПЛК підтверджена шляхом безпосереднього порівняння результатів розрахункових характеристик з експериментальними (рис. 7).

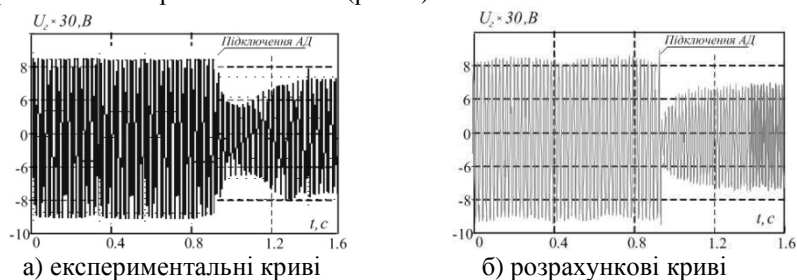


Рис. 7 Часові залежності напруги на затискачах АГ при підключенні АД потужністю $S_m = 0,38S_G$.

Висновки. Розроблений програмно-логічний комплекс дизель-генераторної установки з асинхронним генератором дозволяє проводити дослідження робочих режимів АГ з подальшим опрацювання результатів у спеціалізованих пакетах програм щодо аналізу якості генерованої електроенергії, розробки систем контролю, обліку та керування енергопроцесів. Планується вдосконалення комплексу для розв'язання задач з дослідження аварійних та позаштатних режимів роботи з метою створення інструменту для формування вимог та рекомендацій щодо способів та пристроїв захисту АГ.

Список літератури: 1. Бекаев Л. С. Мировая энергетика и переход к устойчивому развитию / Л. С. Бекаев, О. В. Марченко, С. П. Пинегин. – Новосибирск: Наука, 2000. – 300 с. 2. Крамаренко А. А. Технико-экономическое обоснование автономной системы электропитания / А. А. Крамаренко, С. А. Сергиенко // Электромеханичні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів. – Кременчук: КрНУ, 2015. – С. 184–185. 3. Грехов Л. В. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания / Л. В. Грехов, А. С. Кулешов. – М.: изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 158 с. 4. Торопцев Н. Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. – 87 с. 5. Чорний О. П. Моделирование электромеханических систем: [підручник] / [Чорний О. П. та ін.] – Кременчук: 2001. – 376 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bekayev, L. S., O. V. Marchenko and S. P. Pinegin. *Mirovaya energetika i perekhod k ustoychivomu razvitiyu*. Novosibirsk: Nauka, 2000. Print. 2. Kramarenko, A. A., S. A. Sergiyenko. "Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye avtonomnoy sistemy elektropitaniya." *Ye elektromekhanichni ta yenergetichni sistemi, metodi modelyuvannya ta optimizatsii*. Zbirknik naukovikh prats' XI Mizhnarodnoi naukovo-tekhichnoi konferentsii molodikh uchenikh i spetsialistiv. – Kremenchuk: KrNU (2015): – 184–185. Print. 3. Hrehov, L. V., A. S. Kuleshov. *Matematycheskoe modelyrovanye y kompyuternaya optymyzatsyya toplivopodachy y rabochykh protsessov dvyhatelyy vnutrenneho s-horanyya*. – M.: yzd-vo MHTU ym. N.E. Baumana, 2000. Print. 4. Toroptsev, N. D. *Asynkhronnye heneratory dlya avtonomnykh elektroenerhetycheskykh ustanovok*. – M.: NTF «Énerhoprogress», 2004. Print. 5. Chorny, O. P. *Modelyuvannya elektromekhanichnykh system: [pidruchnyk] / [Chorny O. P. ta in.]* – Kremenchuk, 2001. Print.

Надійшла (received) 14.07.2015