

УДК 62-833.4

ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА БАЗІ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ МЕТОДОМ НАЙМЕНШОЇ ЗАЛИШКОВОЇ ЕНТРОПІЇ

¹ С. В. Зайченко, д-р техн. наук
zstefv@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8446-5408

² К. І. Почка, д-р техн. наук
shanovniy@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0355-002X

³ Ю. О. Ромасевич, д-р техн. наук
romasevichyuriy@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5069-5929

² В. О. Шаленко, канд. техн. наук
vadshal@i.ua, ORCID: 0000-0002-6984-0302

¹ Р. Д. Куліш, ORCID: 0000-0003-0647-1578

² М. М. Балака, канд. техн. наук
balaka.mm@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4142-9703

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
03056, Україна, м. Київ, пр. Перемоги, 37

² Київський національний університет будівництва і архітектури
03037, Україна, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31

³ Національний університет біоресурсів і природокористування України
03041, Україна, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15

Вступ

Сучасний етап розвитку енергетики характеризується широким застосуванням альтернативних і відновлюваних джерел енергії. Проте системи, які використовуються для вироблення електричної енергії, у цілому є складними за своєю структурою, а сама енергія має високу питому вартість. Доступність відновлюваних джерел енергії дозволяє використовувати їх як автономні, проте ефективність і надійність повністю залежать від циркадних ритмів і сезону. Крім того, саме через вказані особливості суттєво обмежується можливість застосування альтернативних джерел енергії як надійного автономного джерела живлення електричною енергією [1, 2]. У той же час на сучасному підприємстві наявність надійного резервного джерела живлення електричною енергією – запорука безпечної та якісної роботи.

Рішенням, що дозволяє забезпечити резервне живлення підприємств, є використання акумуляторних батарей, зокрема, на основі Li-ion збірок і генераторів на базі двигунів внутрішнього згорання. Використання перших суттєво обмежене через вартість необхідної ємності акумуляторних батарей для забезпечення роботи підприємства. Більш простим і капіталомістким рішенням резервування джерел живлення залишаються енергетичні установки на базі двигуна внутрішнього згорання.

У роботі представлено методику вибору діагностичних параметрів для створення системи діагностування автономних джерел електричної енергії на базі бензинового й дизельного двигунів. Проведено аналіз конструктивних особливостей найпоширеніших на ринку України резервних джерел електричної енергії на базі двигунів внутрішнього згорання. Завдяки цьому розроблено логічну модель об'єкта дослідження, що встановлює взаємозв'язок між основними структурними елементами системи, а також визначає можливі стани системи. Проаналізовано вплив виникнення несправного стану кожного елемента на решту елементів системи. Серед нескінченної кількості можливих комбінацій фізичних параметрів, що характеризують систему, для визначення кінцевої кількості діагностичних параметрів запропоновано інформативний критерій – інформаційну ентропію К. Шеннона. Розглянуто рівно вірогідні випадки виходу з робочого стану кожного з елементів системи. Застосовуючи поняття інформаційної ентропії Шеннона, визначено залишкові ентропії системи при несправному стані одного з вузлів автономного джерела живлення. Критерієм інформативності є величина залишкової ентропії. Використання даного критерію дозволило встановити елементи системи, які з найбільшою ефективністю знижують ступінь невизначеності системи. На основі величин залишкової ентропії вибрані вузли системи, стан яких має першочергово контролюватися системою діагностування. Для таких елементів визначені діагностичні параметри і наведені способи їх отримання.

Ключові слова: система діагностування, джерело електричної енергії, двигун внутрішнього згорання, генератор.

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.
© С. В. Зайченко, К. І. Почка, Ю. О. Ромасевич, В. О. Шаленко, Р. Д. Куліш, М. М. Балака, 2023

Вважаємо, що свідченням його найвищої надійності й безпечності серед можливих варіантів автономного живлення слід визнати той факт, що даний тип обладнання використовується для генерації електричної енергії військовими й судовими енергетичними установками є [3–5].

Частота застосування резервного джерела живлення залежить від надійності основної системи енергозабезпечення і може коливатися від поодиноких пусків за рік до щоденного використання. При цьому показник готовності обладнання суттєво знижується як в першому випадку за рахунок інтенсивного зношування, так і у другому через інтенсивне старіння полімерних елементів системи і погіршення якості паливно-мастильних матеріалів, наслідками чого є відкладення в каналах вузлів живлення двигуна внутрішнього згорання, розмагнічування ротора тощо. Вказані процеси, що протікають у автономних джерелах живлення на базі двигунів внутрішнього згорання, потребують постійного контролю задля збереження можливості використання даного обладнання як резервного джерела живлення електричною енергією. Особливо важливим для перешкодження виникненню аварійних ситуацій на атомних станціях є стан резервного живлення, зокрема мотор-генераторів [6, 7]. Вирішити дану задачу можна завдяки розробці системи діагностування автономних джерел енергії на базі двигунів внутрішнього згорання.

Додамо, що, встановлюючи технічний стан автономних джерел енергії на базі двигунів внутрішнього згорання, дослідники залежно від сфери своєї діяльності приділяють увагу механічній або електромеханічній частині об'єкта [8–10]. Проте, розглядаючи лише частину об'єкта, виділяються можливі стани і діагностичні показники, які, звісно, можуть визначати стан лише окремої складової. Таким чином, для з'ясування стану об'єкта в цілому необхідно провести цілий комплекс перевірок для окремих елементів, що суттєво збільшує час і вартість діагностування. Мінімізувати витрати на цей процес можна при розгляді об'єкта в цілому з визначенням його структури, можливих станів і необхідних перевірок.

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка нової системи технічного діагностування на основі визначення основних діагностичних структурних елементів і станів автономних джерел енергії на базі двигунів внутрішнього згорання з врахуванням особливостей взаємодії електромеханічної і механічної складових.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувалися наступні задачі:

- розробити структурну схему джерел енергії на базі двигунів внутрішнього згорання з врахуванням особливостей взаємодії електромеханічної та механічної складових, що дозволить встановити взаємні впливи різних частин об'єкта дослідження на його стан;
- визначити можливі стани автономних джерел енергії на базі двигунів внутрішнього згорання;
- встановити необхідні перевірки для визначення станів автономних джерел енергії на базі двигунів внутрішнього згорання.

Матеріал і результати дослідження

При розробці структурної схеми автономного джерела електричної енергії на базі дизельного двигуна розглянемо типову конструкцію, яка знайшла найбільше застосування на підприємствах та у приватних господарствах. Прототипом більшості станцій, які присутні на ринку України, є бензинові генератори Honda потужністю 2,5–5,0 кВт і дизельні генератори Hyundai й Forte потужністю 2,5–5,5 кВт. Лінійка даних бензинових генераторів використовує чотирьохактний двигун внутрішнього згорання з повітряним охолодженням об'ємом від 163 до 408 см³. Особливістю даного типу двигунів є відсутність системи змащування під тиском – змащування відбувається розбризкуванням. У паливній системі використовується поплавковий карбюратор серії P19. Більшість дизельних генераторів має паливну систему типу «Common rail». Газорозподільна система містить бокове двохклапанне SOHC управління з нижнім розподільчим валом і постійними фазами. У більшості генераторів як альтернатор використовується синхронний електрогенератор з автоматичним регулятором напруги, який містить обмотки ротора і статора. Частота обертання ротора електрогенератора підтримується за допомогою відцентрового регулятора частоти, зв'язаного з карбюратором. Можливі різні варіації компоновки окремих вузлів. Наприклад, конструкція двигуна дозволяє переобладнання паливної системи на змішану систему: паливо й газ. Система пуску двигуна також може бути різною: ручний, електричний або комбінований пуск. Як система запалювання використовується електронна схема із закріпленням на маховику магнітом. Оскільки основним призначенням даних автономних джерел є резервне забезпечення електричною енергією, можлива комплектація блоком автоматичного пуску.

На основі аналізу роботи автономних джерел електричної енергії на базі двигунів внутрішнього згоряння розроблена логічна модель бензинового й дизельного генераторів. Із структур логічних схем слід звернути увагу на взаємний вплив блоків двигуна і альтернатора, що підтверджує необхідність розглядати систему цілісно.

Для того, щоб діагностична система працювала з максимальною ефективністю, у кожному конкретному випадку треба вирішити задачу вибору мінімально достатньої кількості діагностичних параметрів [11]. Одним із головних критеріїв вибору діагностичного параметру системи серед можливих фізичних параметрів, які характеризують технічний стан, є інформативний. Діагностичний параметр, вибраний за інформативним критерієм, дозволяє з найбільшою вірогідністю визначити стан об'єкта, що досліджується.

Модель бензинового генератора

Для вибору діагностичних параметрів скористаємося структурною схемою бензинового генератора (рис. 1). Система, що розглядається, складається з $N=16$ елементів. За можливі стани прийємо відмову кожного елемента. Контроль стану автономного джерела плануємо за кількістю параметрів, рівною кількості елементів $k=16$. Слід відмітити, що в загальному випадку кожен з елементів може мати декілька діагностичних параметрів. У результаті дослідження відмов елементів системи створена таблиця станів (табл. 1).

Вірогідність відмов кожного елемента для попереднього розгляду прийємо рівними

$$P(S_i) = \frac{1}{N} = \frac{1}{16}. \quad (1)$$

У цьому випадку ентропія системи з кінцевою кількістю станів максимальна.

Вихідна ентропія системи визначається кількістю можливих станів

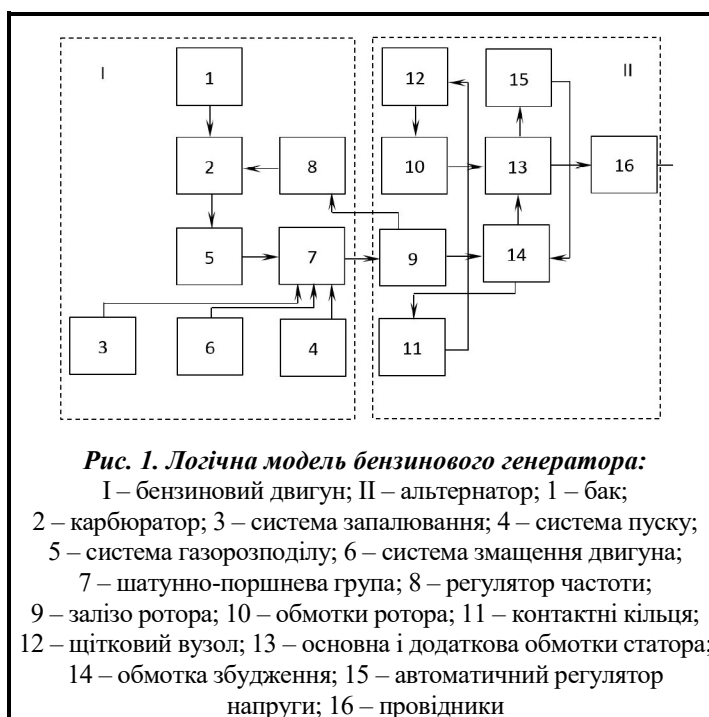


Рис. 1. Логічна модель бензинового генератора:

- I – бензиновий двигун; II – альтернатор; 1 – бак;
 2 – карбюратор; 3 – система запалювання; 4 – система пуску;
 5 – система газорозподілу; 6 – система змащення двигуна;
 7 – шатунно-поршнева група; 8 – регулятор частоти;
 9 – залізо ротора; 10 – обмотки ротора; 11 – контактні кільця;
 12 – щітковий вузол; 13 – основна і додаткова обмотки статора;
 14 – обмотка збудження; 15 – автоматичний регулятор напруги; 16 – провідники

Таблиця 1. Таблиця станів бензинового генератора

Z_k	Стани																$H(A/Z_k)$
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}	A_{16}	
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,662
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,000
3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,662
4	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,662
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
6	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,662
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,662
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,662
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,662
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,662
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,662
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,662
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	∞

$$H(S_i) = \sum_{i=1}^n P(N_i) \log_2 P(N_i) = -16 \frac{1}{16} \log_2 \frac{1}{16} = 4 \text{ [bit]}. \quad (2)$$

Позначимо через m_1 – число одиниць в кожному рядку таблиці, m_0 – число нулів у тому самє рядку. Залишкова невизначеність при контролі кожного параметра на першому кроці обчислюється за формулою

$$H\left(\frac{A}{Z_k}\right) = \frac{m_1}{N} \log_2 m_1 + \frac{m_0}{N} \log_2 m_0. \quad (3)$$

Результати розрахунку залишкової ентропії наведені в останньому стовпчику табл. 1. На основі розрахунків побудовано діаграму ентропії системи (рис. 2), яка дозволяє встановити інформативну значимість діагностичного параметру.

Елемент системи з найменшою залишковою ентропією дає найбільшу кількість інформації про її стан. Таким параметром на першому кроці буде Z_2 , тобто, виходячи зі структурної схеми автономного джерела електричної енергії на базі двигуна внутрішнього згоряння (див. рис. 1), цей номер відповідає карбюратору. Наступними елементами, які суттєво впливають на ентропію системи, будуть Z_5, Z_7, Z_8, Z_9 . Ці номери відповідають системі газорозподілу, циліндро-поршневій групі, регулятору частоти обертання і залізу ротора.

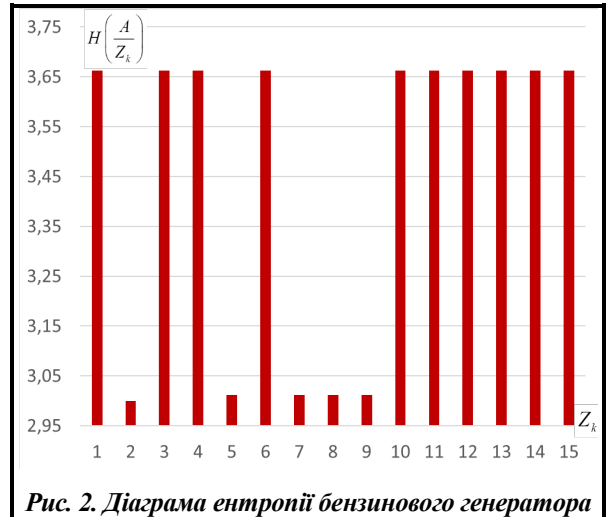


Рис. 2. Діаграма ентропії бензинового генератора

Для роботи системи діагностування слід оперувати фізичними величинами (величиною діагностичних параметрів системи). Тому зазначимо наступне.

Стан карбюратора можна визначити за наявністю палива в циліндрі і за вихлопами у компресорному режимі. Роботу системи газорозподілу і циліндро-поршневої групи можна оцінити за величиною струму стартера при роботі двигуна в компресорному режимі. Справність роботи регулятора частоти обертання можна оцінити шляхом аналізу кривої генерованої напруги. Основною причиною несправної роботи заліза ротора є його розмагнічування. Діагностичним параметром відсутності або низького значення напруженості магнітного поля є низьке значення напруги на обмотках статора.

Модель дизельного генератора

Застосуємо аналогічний підхід для визначення параметрів дизельного генератора (рис. 3). Система дизельного генератора складається з $N=16$ елементів. За можливі стани прийємо відмову кожного елементу. Контроль стану автономного джерела плануємо за кількістю параметрів, рівною кількості елементів $k=16$. Стани системи при відмовах кожного елементу зведені до табл. 2.

Вірогідність відмов кожного елементу для попереднього розгляду прийнято рівною

$$P(S_i) = \frac{1}{N} = \frac{1}{16}. \quad (4)$$

У цьому випадку ентропія системи з кінцевою кількістю станів максимальна.

Вихідна ентропія системи визначається кількістю можливих станів

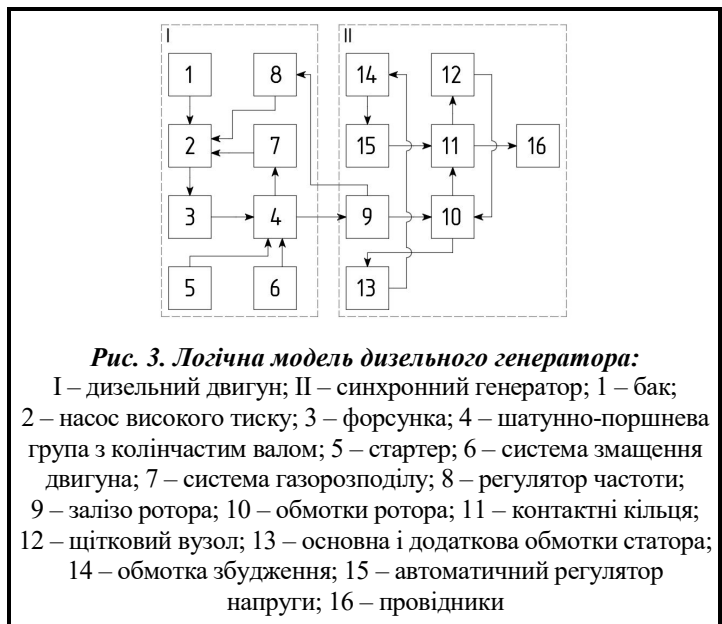


Рис. 3. Логічна модель дизельного генератора:

- I – дизельний двигун; II – синхронний генератор; 1 – бак;
- 2 – насос високого тиску; 3 – форсунка; 4 – шатунно-поршнева група з колінчастим валом; 5 – стартер; 6 – система змащення двигуна; 7 – система газорозподілу; 8 – регулятор частоти;
- 9 – залізо ротора; 10 – обмотки ротора; 11 – контактні кільця; 12 – щітковий вузол; 13 – основна і додаткова обмотки статора; 14 – обмотка збудження; 15 – автоматичний регулятор напруги; 16 – провідники

$$H(S_i) = \sum_{i=1}^n P(N_i) \log_2 P(N_i) = -16 \frac{1}{16} \log_2 \frac{1}{16} = 4 \text{ [bit]} \quad (5)$$

Позначимо через m_1 – число одиниць у кожному рядку таблиці, m_0 – число нулів у тому саме рядку. Залишкова невизначеність при контролі кожного параметра на першому кроці обчислюється за формулою (3).

Результати розрахунку залишкової ентропії наведені в останньому стовпчику табл. 2. На основі розрахунків побудовано діаграму ентропії системи (рис. 4), яка дозволяє встановити інформативну значимість діагностичного параметра.

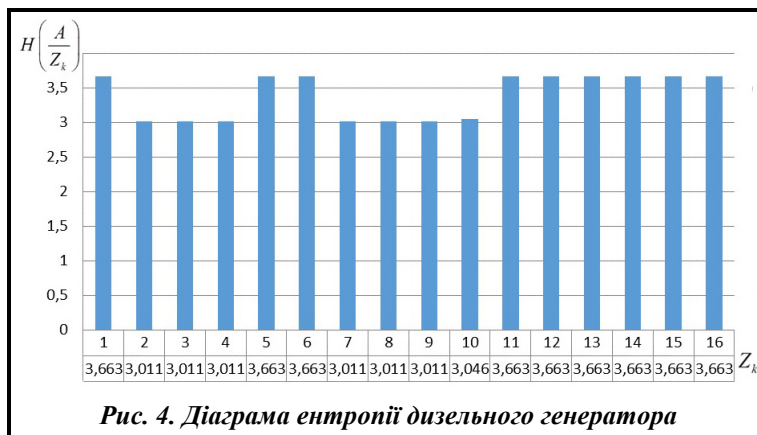


Рис. 4. Діаграма ентропії дизельного генератора

У даному випадку елемент системи, який має найменшу залишкову ентропію, так само дає найбільшу кількість інформації про її стан, і тому він повинен контролюватися у першу чергу. Таким параметром на першому кроці буде Z_{10} . Спираючись на структурну схему дизельного генератора (рис. 3), цей номер відповідає обмоткам ротора. Наступними елементами, які суттєво впливають на ентропію системи, будуть $Z_2, Z_3, Z_4, Z_7, Z_8, Z_9$. Ці номери відповідають насосу високого тиску, форсунці, шатунно-поршневій групі з колінчастим валом, системі газорозподілу, регулятору частоти й залізу ротора.

Для роботи системи діагностування слід оперувати фізичними величинами (величиною діагностичних параметрів системи). Виходячи з цього, зазначимо наступне.

Стан паливного насосу високого тиску можна оцінити за величиною тиску палива в магістралі, стан форсунок – за величиною коефіцієнтів корекції подачі палива по форсункам, роботу системи газорозподілу і циліндро-поршневої групи – за величиною струму стартера при роботі двигуна в компресорному режимі. Справність роботи регулятора частоти обертання можливо оцінити шляхом аналізу кривої генерованої напруги. Основною причиною несправної роботи заліза ротора є його розмагнічування. Діагностичним параметром відсутності або низького значення напруженості магнітного поля є низьке значення напруги на обмотках статора. Стан обмоток ротора можна оцінити за величиною опору кожної секції.

Таблиця 2. Таблиця станів дизельного генератора

Z_k	Стани																$H(A/Z_k)$
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}	A_{16}	
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,663
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,663
6	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,663
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	3,046
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,663
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,663
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,663
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,663
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,663
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,663

Висновки

1. У даній роботі розроблено структурні схеми типових конструкцій автономних джерел електричної енергії на базі двигунів внутрішнього згоряння (бензиновий та дизельний генератор).

2. Складено таблицю можливих станів системи при дефекті одного вузла. У припущенні рівновірогідного виникнення відмов елементів системи визначено такі, що мають найбільший вплив на невизначеність стану системи. При створенні системи технічного діагностування їх стан має визначатися першочергово. Для бензинового генератора це карбюратор, система газорозподілу, циліндропоршнева група, регулятор частоти обертання, залізо ротора. Для дизельного – обмотки ротора, насос високого тиску, форсунка, шатунно-поршнева група з колінчастим валом, система газорозподілу, регулятор частоти та залізо ротора. Проте для безоператорного діагностування найбільш вірогідно, що кількість таких елементів буде збільшена.

3. Запропоновано діагностичні параметри та методи їх визначення для діагностування вищезазначених елементів системи.

4. Для систем, що мають зворотні зв'язки, застосування такого методу призводить до невизначеності серед замкнених елементів, оскільки сигнал несправного елемента впливає на решту елементів.

Література

1. Сінчук І. О., Бойко С. М., Лосіна К. І. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Кременчук: Щербатих О. В., 2013. 192 с.
2. Абрашин В. О., Новічонок С. М. Можливості застосування альтернативних джерел електричної енергії у збройних силах України. *Системи озброєння і військова техніка*. 2010. № 3 (23). С. 12–18.
3. Гаспарян Т. Г. Двигатель внутреннего сгорания. *Большая российская энциклопедия. Электронная версия*. 2017.
4. Гильмияров Е. Б., Цветков В. В. Многокритериальный подход к выбору судовой энергетической установки. *Вестник МГТУ*. 2006. Т. 9. № 3. С. 502–513.
5. Правила классификации и постройки морских судов. *Российский морской регистр судоходства*. 2003. Т. 2. С. 618.
6. Бойчук В. С., Гашев М. Х., Миколайчук О. А., Громов Г. В., Дибач О. М., Жабін О. І., Воронцов Д. В., Рижов Д. І., Інюшев В. В., Носовський А. В., Шоломицький С. Е. План дій щодо впровадження на АЕС України заходів з підвищення безпеки за результатами стрес-тестів. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2013. № 2 (58). С. 3–7. [https://doi.org/10.32918/nrs.2013.2\(58\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2013.2(58).01).
7. Кондратюк В. А., Письменний С. М., Верінов О. М., Філатов В. І., Остапенко І. А. Підвищення безпеки ядерної енергетики з урахуванням уроків важких аварій. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2022. № 3 (95). С. 76–81. [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3\(95\).08](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3(95).08).
8. Maughan C. V. Root-cause diagnostics of generator service failures. *Proceedings of the IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, San Antonio, TX, USA, May 2005. P. 1927–1935. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2005.195983>.
9. Zaichenko S., Shevchuk S., Opryshko V., Pryadko S., Halem A., Adjebi A. Determination of autonomous electrical energy source technical condition based on an internal combustion engine. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 305–308. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250074>.
10. Shevchuk S., Zaichenko S., Opryshko V., Adjebi A. Determination of the diagnostic system inertial parameters for power generating station combustion engine. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine, 2019. P. 88–91. <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764170>.
11. Четвергов В. А., Овчаренко С. М., Бухтеев В. Ф. Техническая диагностика локомотивов: учебное пособие. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. 371 с.

Надійшла до редакції 10.01.2023