

ЕКСПЛУАТАЦІЯ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ

- КОВАЛЕНКО М.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>, e-mail: kovalenko_ma@i.ua;
- КОВАЛЕНКО І.Я. старший викладач, PhD, кафедри відновлювальних джерел енергії національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>, e-mail: 2048141@ukr.net;
- ТИТОВ Є.О. аспірант кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8222-7477>, e-mail: egor.shabadash@gmail.com;
- БАЗАРОВ О.О. аспірант кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8491-2678>, e-mail: bazarov.oleh@gmail.com.

Мета роботи. Метою роботи є здійснення всебічного аналізу статистичних даних щодо поломок бензинових та дизельних автономних електромеханічних установок для виявлення закономірностей і ключових причин несправностей.

Методи дослідження. Методи статистичного аналізу, класичні методи розрахунку синхронних явнополюсних генераторів із електромагнітним збудженням.

Отримані результати. Проведено аналіз статистики відмов автономних електромеханічних перетворювачів малої та середньої потужності. Отримані результати підкреслюють необхідність впровадження систем моніторингу стану генераторів для раннього виявлення несправностей. Регулярна діагностика та контроль навантаження допоможуть запобігти критичним поломкам та збільшити термін служби обладнання. Зібрані статистичні дані можна використовувати для розробки ефективних профілактичних заходів, удосконалення інструкцій з технічно-го обслуговування та оптимізації режимів експлуатації генераторів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку алгоритмів автоматичного розподілу навантаження між фазами, вдосконалення систем захисту та підвищення надійності ізоляційних матеріалів. Аналіз статистики несправностей дизельних і бензинових генераторів показав, що електричні поломки становлять 51% випадків, а механічні – 49%. Це свідчить про приблизно рівномірний розподіл між двома категоріями несправностей, що вказує на необхідність комплексного підходу до обслуговування та діагностики. При використанні даних установок у військових цілях баланс поломок зміщується: механічні відмови: 75-85%, електричні відмови: 15-25%. Серед електричних несправностей найбільш поширеними є пошкодження обмоток статора через асиметрію навантаження, вихід з ладу регуляторів напруги, несправності акумуляторної системи та порушення ізоляції електропроводки. Механічні поломки найчастіше пов'язані зі зносом поршневої групи, недостатнім змащенням, перегрівом двигуна через несправності системи охолодження та порушеннями у роботі паливної системи.

Наукова новизна. Проведено детальне узагальнення досвіду експлуатації автономних електромеханічних перетворювачів у реальних умовах, що дозволило встановити закономірності їхньої роботи, виявити типові проблеми та розробити рекомендації щодо їх усунення. Запропоновані у дослідженні методи оцінки ефективності роботи автономних електромеханічних перетворювачів можуть бути використані для подальшої модернізації існуючих систем, а також при створенні нових високоефективних автономних електрогенеруючих установок.

Практична цінність. Результати дослідження мають практичну цінність для інженерів, користувачів та виробників електромеханічного обладнання. Одержані результати можуть використовуватись для підвищення ефективності та надійності автономних енергетичних систем, що працюють у різних умовах. Зокрема, можливо зменшити витрати на технічне обслуговування, покращити енергоефективність та подовжити термін експлуатації обладнання. Отримані результати можуть використовуватись при розробці рекомендацій щодо вибору, модернізації та діагностики автономних електромеханічних установок.

Ключові слова: автономні електромеханічні перетворювачі, електрогенеруючі пристрої, експлуатація, енергоефективність, надійність, технічне обслуговування, електропостачання, генераторні системи.

I. ВСТУП

В умовах постійних обстрілів критичної інфраструктури України автономні електромеханічні перетворювачі (АЕП), зокрема дизель-генераторні установки (ДГУ) та бензогенераторні установки, стали життєво необхідними для забезпечення безперебійного електропостачання, дозволяючи лікарням, школам та іншим важливим установам продовжувати роботу, а також забезпечуючи базові потреби населення, такі як освітлення та опалення [1]. АЕП, ДГУ та бензогенератори підтримують роботу зв'язку та інтернету, що критично важливо для координації дій та отримання інформації, а їхня автономність допомагає підтримувати стійкість та функціонування суспільства в умовах війни [2], [3].

ДГУ, як автономні джерела електроенергії, що працюють на дизельному паливі, стали критично важливими для України, де російські обстріли регулярно пошкоджують енергетичну інфраструктуру. Їхня автономність, мобільність, надійність, широкий діапазон потужностей та швидкий запуск роблять їх незамінними для забезпечення безперебійного електропостачання критичної інфраструктури, військових об'єктів, промислових підприємств та побутових потреб [4].

Бензогенераторні установки, що працюють на бензині, також відіграють важливу роль у забезпеченні електроенергією [5]. Вони особливо корисні для невеликих домогосподарств, малих підприємств та в умовах, де потрібна мобільність та швидкий запуск. Бензогенератори, як правило, є меншими та легшими, ніж ДГУ, що робить їх зручними для транспортування та використання в різних умовах.

Крім того, АЕП, ДГУ та бензогенератори забезпечують роботу насосних станцій водопостачання та каналізації, підтримують транспортну інфраструктуру, дозволяючи працювати світлофорам, залізничним станціям та аеропортам, і дають можливість промисловим підприємствам виробляти товари першої необхідності, такі як продукти харчування та медикаменти [6].

Однак важливо пам'ятати, що АЕП, ДГУ та бензогенератори можуть виходити з ладу через інтенсивне використання або недостатнє обслуговування, що підкреслює необхідність регулярного технічного огляду та ремонту, включаючи перевірку рівня масла та охолоджуючої рідини, очищення фільтрів, перевірку електричних з'єднань та тестування роботи під навантаженням. Окрім того, в умовах використання ДГУ та бензогенераторів, дуже важливим стає питання паливної безпеки, правильного зберігання палива та вентиляції. Також, потрібно враховувати шумове забруднення, що створюється ДГУ та бензогенераторами, особливо в умовах густонаселених міст [7].

В умовах війни в Україні, ДГУ та бензогенератори стали не просто джерелом резервного електропостачання, а життєво необхідним елементом забезпечення стійкості та виживання країни.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Генератори електроенергії широко використовуються для забезпечення електроживлення у разі відсутності централізованого постачання. Основними типами таких пристроїв є дизельні та бензинові генератори. Вони працюють на основі внутрішнього згоряння палива та перетворення механічної енергії у електричну. Бензиновий генератор працює на основі бензинового двигуна внутрішнього згоряння. Паливо подається в карбюратор або систему уприскування, де змішується з повітрям, після чого отримана паливно-повітряна суміш запалюється іскрою свічки запалювання, що викликає вибухове згоряння [8]. Утворені гази розширюються, приводячи в рух поршень, який передає механічну енергію на колінчастий вал. Обертальний момент передається на ротор генератора, що індукуює електричний струм у статорах. Бензинові генератори зазвичай мають меншу потужність і застосовуються для короткочасного використання або в побутових умовах через їх відносно невисоку витрату палива та менший рівень шуму [9].

Дизельний генератор використовує дизельний двигун внутрішнього згоряння, який працює за принципом самозаймання пального під дією високої температури стискання [10]. У камеру згоряння подається чисте повітря, яке стискається поршнем до високого тиску, що значно підвищує його температуру. У стиснене гаряче повітря подається дизельне паливо, яке самозаймається без необхідності іскрового запалювання [11], [12]. Утворені гази розширюються, приводячи в рух поршень, який через кривошипно-шатунний механізм обертає колінчастий вал. Механічна енергія передається на генератор, де перетворюється в електричний струм. Дизельні генератори мають вищу ефективність і потужність, тому їх використовують у промислових масштабах та для тривалого автономного живлення [13].

Як бензинові, так і дизельні генератори можуть мати певні слабкі місця. Паливна система може виходити з ладу через засмічення паливного фільтра або несправність форсунок, що спричиняє нестабільну роботу. Перегрів двигуна через недостатнє охолодження може призвести до його виходу з ладу. Електрична система піддається зносу через проблеми з реле-регулятором або стартером, а масляна система, при недостатньому рівні масла або його забрудненні, спричиняє підвищений знос деталей двигуна. Акумуляторна батарея також може втратити ємність або мати окислені контакти, що

ускладнює запуск генератора [14]. Саме тому аналіз можливих поломок є критично важливим для забезпечення безперебійної роботи генераторів. Регулярна діагностика дозволяє виявити проблеми на ранніх етапах і уникнути серйозних несправностей, що можуть призвести до значних фінансових витрат і втрати працездатності пристрою. Важливо стежити за станом основних вузлів і проводити планове технічне обслуговування, щоб продовжити термін служби генератора та забезпечити його стабільну роботу в будь-яких умовах [15].

Обидва типи генераторів мають свої переваги та сфери застосування. Бензинові генератори підходять для короткочасного використання та невеликих навантажень, тоді як дизельні забезпечують вищу потужність та економічність при довготривалій роботі. Вибір між ними залежить від умов експлуатації, потреб користувача та економічної доцільності. При цьому, важливо враховувати потенційні проблеми у вузлах генераторів та проводити своєчасне обслуговування для продовження їх ресурсу.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є здійснення всебічного аналізу статистичних даних щодо поломок бензинових та дизельних автономних електромеханічних установок для виявлення закономірностей і ключових причин несправностей.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Статистичні дані, щодо типів поломок, несправностей та виходу з ладу автономних дизель-бензинових енергоустановок отримано за підтримки профільних підприємств та товариств: ПП «Стандарт-Електро» та ТОВ «Геко-центр». Зокрема, інформацію отримано з ремонтних журналів, актів виконаних робіт та записів у журналах в період з 2023 по кінець 2024 року включно.

Досвід експлуатації електромеханічних перетворювачів малої та середньої потужності показує, що причиною виходу з ладу таких перетворювачів є механічні та електричні несправності, що показано на рис.1.1.

Крім того, для автономних електромеханічних перетворювачів, що використовуються для потреб військових, механічна частина зазвичай виходить з ладу частіше (75-85% відмов), ніж електрична (15-25% відмов), це пояснюється наступними особливостями їх експлуатації:

1. Такі генератори працюють у складних умовах: пил, волога, високі та низькі температури, механічні навантаження та вібрації. Це призводить до прискореного зношування рухомих механізмів, таких як поршнева група, підшипники, клапани, муфти

тощо.

2. Високе навантаження та часті пуски/зупинки. На відміну від генераторів, що працюють у цивільних умовах, які часто працюють у стабільному режимі, військові установки піддаються частим ввімкненням та вимкненням, що створює додаткові навантаження на двигун внутрішнього згоряння, стартер, систему змащування та охолодження.

3. Недостатнє технічне обслуговування (ТО) у польових умовах. Регулярне ТО в умовах, що наближені до бойових є ускладнене через відсутність необхідних запчастин, інструментів або кваліфікованого персоналу. В результаті мастило, фільтри та інші витратні матеріали можуть замінюватися несвоєчасно, що підвищує зношування механічних компонентів.

4. Високий рівень механічних навантажень. Військові генератори часто транспортуються у вантажівках, бронетехніці або авіацією, що спричиняє значні ударні та вібраційні навантаження. Це негативно впливає на кріплення, підшипники, амортизуючі елементи та інші механічні вузли.

5. Використання низькоякісного пального та мастильних матеріалів. У військових умовах паливо може містити домішки або буди недостатньої якості, що пришвидшує зношування паливної системи та двигуна. Крім того, неправильний підбір мастильних матеріалів або їх передчасне старіння можуть призвести до надмірного тертя та перегріву.

6. Погане охолодження та пришвидшений знос елементів системи охолодження. У польових умовах можливе засмічення радіаторів пилом і брудом, що знижує ефективність охолодження двигуна та призводить до його перегріву, що є однією з основних причин виходу з ладу механічних вузлів. Крім того, електрогенеруючі установки у польових умовах часто маскуються, що негативно впливає на охолодження та ресурс установки в цілому.

Натомість електрична частина електромеханічних перетворювачів, що працюють для потреб військових (обмотки, регулятори напруги, випрямлячі) зазвичай є менш вразливою, оскільки не має рухомих частин і не піддається таким інтенсивним механічним навантаженням. Однак і вона може виходити з ладу при перегріві, перевантаженнях чи коротких замиканнях, хоча це трапляється рідше, ніж механічні пошкодження.

РІД ВІДМОВ АВТОНОМНИХ ЕМП

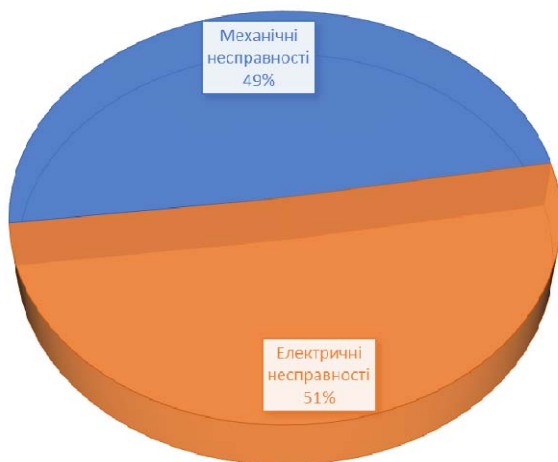


Рисунок 1. Розподілення відмов на електричні та механічні

Механічні несправності поділяються на: несправності системи охолодження/підігріву, несправності блоку двигуна та несправності датчиків. Використовуючи статистику звернень клієнтів у приватні сервісні центри з ремонту автономних електромеханічних установок проведено аналіз розподілення механічних поломок. Це зображено на рис. 2.

МЕХАНІЧНІ НЕСПРАВНОСТІ

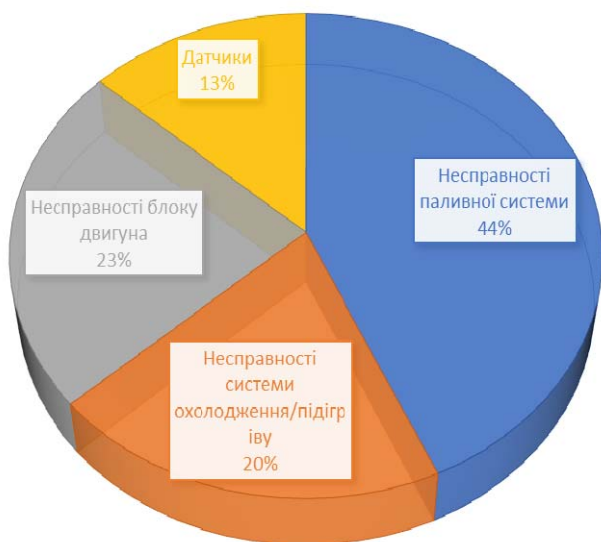


Рисунок 2. Розподілення механічних несправностей

Розширений аналіз механічних несправностей автономних електромеханічних перетворювачів.

В роботі проведено поглиблений аналіз механічних несправностей автономних

електромеханічних перетворювачів, з метою виявлення ключових факторів, що впливають на їх надійність та довговічність.

1. Несправності паливної системи є найбільш поширеними і зумовлені комплексом факторів, які визначаються наступним:

1) Недостатньою періодичністю технічного обслуговування: забруднення фільтрів, накопичення осаду в паливних баках, корозія паливопроводів.

2) Впливом ультрафіолетового випромінювання: руйнування гумових та пластикових компонентів, втрата еластичності ущільнювачів.

3) Якістю матеріалів компонентів: використання неякісних фільтрів, паливопроводів, насосів, що призводить до швидкого зносу та виходу з ладу.

4) Екстремальними умовами експлуатації: робота в умовах високої запиленості, вологості, температурних коливань, що прискорює знос компонентів.

Крім того, що велике значення має якість палива. Використання палива з великим вмістом домішок, або яке не відповідає нормам чи рекомендаціям виробника привідного двигуна, значно прискорює вихід з ладу паливної системи.

2. Несправності системи охолодження/підігріву займають друге місце за частотою виникнення:

а. Складність системи та недоступність внутрішніх компонентів для користувача ускладнюють обслуговування: забруднення радіатора, витік охолоджуючої рідини, вихід з ладу водяного насоса.

б. Основною причиною є низька якість компонентів, що знижує ефективність профілактичного обслуговування: використання неякісних радіаторів, патрубків, термостатів.

с. Варто зазначити, що використання не якісної охолоджуючої рідини, призводить до корозії внутрішніх елементів системи охолодження.

3. Несправності блоку двигуна:

а. Стан двигуна визначається якістю його виготовлення: знос поршневої групи, вихід з ладу підшипників, тріщини в блоці циліндрів.

б. Регулярне технічне обслуговування підтримує функціональність поршневої групи, але не гарантує довговічність механічних компонентів: контроль рівня масла, заміна фільтрів, регулювання клапанів.

с. Необхідно додати, що перегрів двигуна, та робота із використанням неналежного мастила, призводить до швидкого виходу з ладу двигуна внутрішнього згорання.

4. Несправності датчиків наприклад, датчиків тиску мастила, температури охолоджуючої рідини є менш критичними. Вони швидко усуваються спеціалістами сервісних центрів: заміна датчика, перевірка електричних з'єднань. Експлуатаційні умови мають незначний вплив на працездатність

датчиків: вібрація, температурні коливання. Але варто відмітити, що вихід з ладу деяких датчиків, може призвести до критичних пошкоджень двигуна, якщо вчасно не буде виявлено проблему.

Варто відмітити важливість використання якісних мастильних матеріалів для зменшення зносу компонентів. Необхідність регулярної перевірки та заміни фільтрів (паливних, повітряних, масляних). Вплив вібрації на довговічність компонентів та необхідність використання віброізоляційних матеріалів. Контроль електричних з'єднань, також має велике значення, для запобігання виходу з ладу електрообладнання.

Нижче приведено приклад механічної несправності ДГУ (рис. 3).



Рисунок 3. Руйнування шестерні приводу помпи охолодження генератора внаслідок заклинювання підшипника

На рис. 3 показано руйнування шестерні приводу помпи охолодження генератора внаслідок заклинювання підшипника. Розглянемо детальніше дану механічну несправність. По рис. 3 видно значне пошкодження зубів шестерні, що включає сколи та деформації. Це свідчить про те, що шестерня зазнала значного механічного впливу. У нижній частині фотографії (рис. 3) видно частину корпусу помпи

охолодження. Це дає змогу ідентифікувати пошкоджену шестерню як частину приводу помпи. У центрі шестерні розташований підшипник. Ймовірно, саме клин підшипника спричинило руйнування шестерні. Причинами виходу з ладу підшипникових вузлів, в даному випадку, можуть бути наступні: наслідок недостатнього змащення, забруднення, зносу або механічного пошкодження підшипника; низька якість комплектуючих; несвоєчасне або не професійне технічне обслуговування та помилки діагностування.

При клині підшипника шестерня зазнає різкого та значного механічного навантаження. Матеріал шестерні не витримує цього навантаження, що призводить до руйнування зубів. Наслідки руйнування привідної шестерні можуть призвести до наступних аварійних ситуацій:

1) Погіршення або вихід з ладу системи охолодження. Руйнування шестерні призводить до зупинки роботи помпи охолодження. Це, в свою чергу, може спричинити перегрів привідного двигуна автономної енергоустановки;

2) Пошкодження привідного двигуна внутрішнього згорання. Перегрів двигуна може призвести до серйозних пошкоджень, таких як деформація головки блока циліндрів, пошкодження поршнів, циліндрів, паливної апаратури і т.ін.

Пошкодження системи охолодження, як показує практика реальних експлуатацій, призводить до високовартісного ремонту, оскільки частковий, поточний чи капітальний ремонт або заміна привідного двигуна автономного генератора є дороговартісною процедурою. Для запобігання виникнення ситуацій такого типу рекомендується виконувати наступні дії та операції:

1) Виконувати регулярне технічне обслуговування. Регулярне проведення технічного обслуговування генератора, включаючи перевірку стану помпи охолодження та підшипників зменшує ризик раптового виходу окремих деталей, вузлів та елементів конструкції.

2) Проведення регламентного технічного огляду стану підшипникових вузлів та системи їх змащення. При використанні підшипників закритого типу необхідно приділяти увагу стану поверхонь кочення та рівню мастила в них, яке не повинно перевищувати чи бути меншим 1/3 від загального об'єму підшипника.

3) Необхідно своєчасно проводити заміну зношених деталей, включаючи підшипники та шестерні. Також необхідно дотримуватись регламенту заміни деталей, вузлів та механізмів, що рекомендуються заводом-виробником обладнання, навіть у випадку відсутності візуальних пошкоджень та будь-яких ознак зносу чи дефекту. Як показує практика, вихід з ладу вживаних деталей може відбуватись раптово і призводити до значних матеріально-технічних витрат.

4) Використовувати якісні запасні частини. Це допоможе запобігти передчасному зносу та поломкам.

Проведений розширений аналіз надає більш детальне розуміння механічних несправностей автономних електромеханічних перетворювачів та підкреслює важливість регулярного технічного обслуговування та використання якісних компонентів для забезпечення їх надійної роботи.

Окремою частиною відомою автономних електромеханічних перетворювачів становлять різного типу та виду відмови електричної частини. Аналіз електричних несправностей автономних електромеханічних перетворювачів зображено на рис. 4.



Рисунок 4. Розподілення електричних відмов

До складу системи вироблення електроенергії автономних електромеханічних перетворювачів входять різні пристрої та системи. Основою такої системи є електрогенератор: в більшості випадків у вигляді синхронного явнополюсного генератора із електромагнітним збудженням. В науковій та технічній літературі електрогенератор також називається альтернатором. Що походить від слова "alternating", тобто змінний, змінний струм. Також використовуються і інші типи генераторів: подвійного живлення, із постійними магнітами, вентильні генератори і т.ін. По наявності рухомого контакту бувають як контактні (зі щітками та кільцями на роторі) так і безконтактні (без рухомого контакту). Очевидно, що кожен тип електрогенератора має свої переваги та недоліки, які в подальшому визначають їх експлуатаційну надійність та ремонтпридатність.

Іншими елементами електричної системи автономних електромеханічних установок є системи, що забезпечують регулювання вихідної напруги,

частотти та інших параметрів електрогенератора. Інша частина направлена на роботу системи привідного двигуна, власні потреби та системи автоматичного ввімкнення резерву (ABP).

В даній роботі проведено аналіз електричних несправностей автономних електромеханічних перетворювачів, з метою виявлення ключових факторів, що впливають на їх надійність та довговічність. До основних і самих розповсюджених несправностей відносяться:

1. Несправності системи AVR та альтернатора.

Ці несправності є найбільш поширеними і зумовлені переважно експлуатаційними факторами, а саме: критичним перевантаженням системи; перевищенням допустимих навантажень, що призводить до перегріву та виходу з ладу компонентів. Неправильним підключенням навантаження: помилки в підключенні, що спричиняють стрибки напруги та пошкодження електроніки. Недостатнє охолодження: погана вентиляція, що призводить до перегріву та зниження ефективності роботи.

Варто зазначити, що якість компонентів також відіграє важливу роль. Використання неякісних АВР та альтернаторів збільшує ризик виходу з ладу.

2. Несправності системи підігріву охолоджуючої рідини. Дані несправності є поширеними через тривалий режим роботи електричного тону при низьких температурах. Також постійна робота при низьких температурах призводить до швидкого зносу тону. Існують також і не критичні несправності: вихід з ладу тону не є критичним для роботи енергоустановки, особливо при високих температурах навколишнього середовища або при використанні не турбованого двигуна.

Важливо відмітити, що якість охолоджуючої рідини також впливає на ресурс електричного тону, системи охолодження та її складових, двигуна внутрішнього згорання в цілому. Це є фактор, що може призвести до раптового виходу установки з ладу та досить дороговартісного ремонту.

3. Несправності системи заряду акумуляторної батареї (АКБ). Система заряду АКБ включає генератор власних потреб, реле-регулятор заряду та власне саму АКБ. При наявності аномально високих чи екстремальних температур навколишнього середовища може відбутися вихід з ладу комплектуючих реле-регулятора заряду. При проведенні ревізій, технічного обслуговування чи планового технічного обслуговування необхідно регулярно перевіряти справність системи заряду АКБ.

Необхідно підкреслити, що якість самої АКБ, та правильність її обслуговування, значно впливає на роботу даної системи.

4. Несправності допоміжних електроприводів. Такі несправності стосуються виходу з ладу приводів керування паливною рейкою, глушіння, регулювання

карбюратора тощо. Тобто системи, що в тому числі відповідає за регулювання обертів при зміні навантаження (а отже і частоти), а отже і якості виробленої електроенергії. Несправності допоміжних електроприводів безпосередньо впливають на роботу енергоустановки, на її стабільність в статичних та динамічних режимах, економічність, ефективність та якість електроенергії. Використовуючи регулярне тестування (за рекомендаціями – кожного тижня) можливо забезпечити своєчасну заміну дефектних комплектуючих та безвідмовну роботу установки. Крім того, вібрація та рівень вологості, негативно впливають на роботу та ресурс даних вузлів.

5. Несправності контролера енергоустановки/регулятора обертів. Контролер енергоустановки/регулятор обертів є складним електронним пристроєм, що забезпечує захист, управління та моніторинг. У випадку виходу з ладу даних вузлів та їх компонентів, робота по ремонту та заміні повинна виконуватись висококваліфікованими фахівцями, що спеціалізуються по даним типам установок. Не дивлячись на те, що конструкція пристроїв контролера забезпечує стійкість до вібрації та впливу вологості, на практиці трапляються їх виходи з ладу $\approx 13\%$ випадків. Високий рівень захисту даного елемента забезпечується, в тому числі, за рахунок наявності компаундування всіх вузлів та елементів контролера. Однак, з іншого боку, це значно ускладнює поелементний ремонт таких вузлів.

Для зменшення ймовірності виходу з ладу дороговартісного контролера/регулятора обертів необхідно використовувати якісні електричні компоненти. Також, необхідно регулярно проводити перевірку електричних з'єднань, контактів та проводки.

Вихід з ладу альтернатора, є одним з найбільш дороговартісним випадком виходу з ладу автономних електромеханічних перетворювачів. Більше по вартості можливий лише капітальний ремонт привідного двигуна внутрішнього згорання. На рис. 5 приведено приклад електричної несправності альтернатора.

Дана несправність виникла через несиметрію навантаження, коли одна з фаз генератора була перевантажена, що призвело до перегріву інших фаз обмотки статора. У трифазних генераторах важливо рівномірно розподіляти навантаження між фазами, оскільки значна несиметрія навантаження по фазах призводить до локального перегріву окремих фаз обмоток.

При перевантаженні однієї фази через нерівномірний розподіл струму виникає надмірне нагрівання її обмотки, що призводить до деградації ізоляції, міжвиткових замикань та, зрештою, вигорання секції статора. При цьому інші фази можуть залишатися в нормальному робочому стані, що ускладнює своєчасне виявлення проблеми без

відповідних засобів контролю. Для запобігання подібним аварійним ситуаціям, необхідно:

- 1) Контролювати баланс навантаження між фазами за допомогою вимірювальних приладів.
- 2) Використовувати пристрої захисту, такі як реле асиметрії напруги або струму.
- 3) Регулярно перевіряти роботу генератора та розподіл навантаження в мережі.

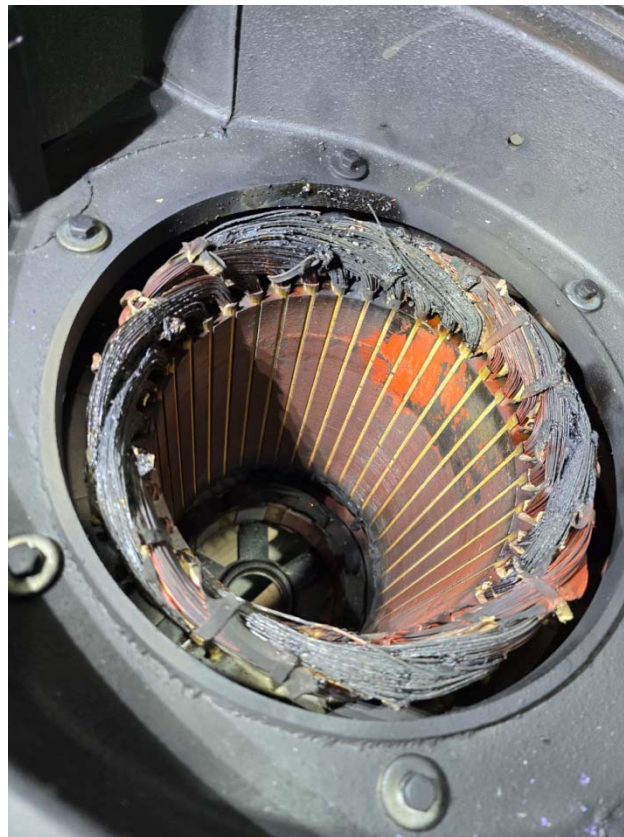


Рисунок 5. Зруйнована силова обмотка статора ДГУ

У цьому випадку необхідний капітальний ремонт статора – можливо, перемотка або заміна обгорілих секцій. Також слід проаналізувати схему електропостачання, щоб унеможливити подібні перевантаження в майбутньому.

V. ВИСНОВКИ

Аналіз статистики несправностей дизельних і бензинових генераторів показав, що електричні поломки становлять 51% випадків, а механічні – 49%. Це свідчить про приблизно рівномірний розподіл між двома категоріями несправностей, що вказує на необхідність комплексного підходу до обслуговування та діагностики. При використанні даних установок у військових цілях баланс поломок зміщується: механічні відмови: 75-85%, електричні відмови: 15-25%.

Серед електричних несправностей найбільш

поширеними є пошкодження обмоток статора через асиметрію навантаження, вихід з ладу регуляторів напруги, несправності акумуляторної системи та порушення ізоляції електропроводки. Виявлено, що асиметричне навантаження є однією з головних причин критичних відмов, оскільки перевантаження окремих фаз призводить до локального перегріву та руйнування ізоляції.

Механічні поломки найчастіше пов'язані зі зносом поршневої групи, недостатнім змащенням, перегрівом двигуна через несправності системи охолодження та порушеннями у роботі паливної системи. Важливим фактором, що впливає на знос механічних компонентів, є якість пального та регулярність технічного обслуговування.

Отримані результати підкреслюють необхідність впровадження систем моніторингу стану генераторів для раннього виявлення несправностей. Регулярна діагностика та контроль навантаження допоможуть запобігти критичним поломкам та збільшити термін служби обладнання. Зібрані статистичні дані можна використовувати для розробки ефективних профілактичних заходів, удосконалення інструкцій з технічного обслуговування та оптимізації режимів експлуатації генераторів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку алгоритмів автоматичного розподілу навантаження між фазами, вдосконалення систем захисту та підвищення надійності ізоляційних матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Головка В. М. Математичне моделювання автономної вітроелектричної установки з магнітоелектричним генератором / В. М. Головка, М. Я. Островерхов, М. А. Коваленко, І. Я. Коваленко, Д. В. Ципленков // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2022. – № 5. – С. 74–79. – DOI: 10.33271/nvngu/2022-5/074.
- [2] Чумак В. Стабілізація напруги керованого автономного магнітоелектричного генератора з магнітним шунтом та збудженням від постійних магнітів / В. Чумак, В. Базенов, О. Тимошук, М. Коваленко, С. Цивінський, І. Коваленко, І. Ткачук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2020. – № 6(5(114)). – С. 56–62. – ISSN 1729-3774.
- [3] Островерхов М. Розробка системи керування для зняття максимальної потужності автономної вітроустановки з синхронним магнітоелектричним генератором / М. Островерхов, В. Чумак, М. Коваленко, І. Коваленко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2022. – № 4(2(118)). – С. 67–78. – DOI: 10.15587/1729-4061.2022.263432.
- [4] IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions // IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000). – 2010. – P. 1–50.
- [5] Harris C. R. Array programming with NumPy / C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt, R. Gommers, P. Virtanen et al. // Nature. – 2020. – Vol. 585, № 7825. – P. 357–362. – URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
- [6] Hunter J. D. Matplotlib: A 2d graphics environment / J. D. Hunter // Computing in Science & Engineering. – 2007. – Vol. 9, № 3. – P. 90–95.
- [7] Munoz-Galeano N. Instantaneous approach to IEEE std. 1459 power terms and quality indices / N. Munoz-Galeano, J. Alfonso-Gil, S. Orts-Grau, S. Seguí-Chilet, F. Gimeno-Sales // Electric Power Systems Research. – 2015. – Vol. 125. – P. 228–234.
- [8] Song-Manguelle J. A theoretical analysis of pulsating torque components in ac machines with variable frequency drives and dynamic mechanical loads / J. Song-Manguelle, G. Ekemb, D. Mon Nzongo, T. Jin, M. Doumbia // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65. – P. 9311–9324.
- [9] Song-Manguelle J. Analytical expression of pulsating torque harmonics due to pwm drive / J. Song-Manguelle, G. Ekemb, S. Schroder, T. Geyer, J.-M. Nyobe-Yome, R. Wamkeue // 2016.
- [10] Чумак В. Порівняння синхронних генераторів для автономної бензинової установки / В. Чумак, М. Коваленко, І. Ткачук, І. Коваленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2022. – № 2(8). – С. 32–38. – DOI: 10.20998/2079-3944.2022.2.06.
- [11] Song-Manguelle J. Pulsating torques in pwm multi-megawatt drives for torsional analysis of large shafts / J. Song-Manguelle, J.-M. Nyobe-Yome, G. Ekemb // Industry Applications, IEEE Transactions on. – 2010. – Vol. 46. – P. 130–138.
- [12] Makedonski N. Experimental Study of an Autonomous Power Supply System with a Special Type of Electric Drive / N. Makedonski, P. Parushev // 2023 IEEE Bulgaria Section Conference (BulEF). – 2023. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/BulEF59783.2023.10406266.
- [13] Mingazeva K. A. Development of scientific foundations and method of autonomous power and gas supply of remote consumers from gas distribution networks / K. A. Mingazeva, R. Karimov, M. E. Dmitriev, T. R. Kuskildin, R. Tashbulatov, Ch. I. Nurmuhamedov // Petroleum Engineering. – 2024. – Vol. 22. – P. 294–303. – DOI: 10.17122/ngdelo-2024-4-294-303.
- [14] Serhiienko V. Development of autonomous energy supply of a mobile surface degassing plant / V.

Serhiienko // Journal of Electrical and Power Engineering. – 2023. – Vol. 28. – P. 47–52. – DOI: 10.31474/2074-2630-2023-1-47-52.

Science and Engineering. – 2019. – Vol. 643. – P. 012105. – DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012105.

Надійшла (Received) 27.02.2025

Прийнята (Accepted) 11.03.2025

Опублікована (Published) 30.04.2025

- [15] Fedotov A. Utilization of electrochemical energy storage devices in autonomous power supply systems / A. Fedotov, R. Misbakhov, N. Chernova, K. Bakhteev // IOP Conference Series: Materials

OPERATION OF AUTONOMOUS ELECTROMECHANICAL CONVERTERS OF LOW AND MEDIUM POWER

- KOVALENKO M.A. PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>, e-mail: kovalenko_ma@i.ua;
- KOVALENKO I.Y. Senior lecturer of Renewable Energy Sources, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>, e-mail: 2048141@ukr.net;
- TITOV Y.O. Postgraduate student, Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8222-7477>, e-mail: egor.shabadash@gmail.com;
- BAZAROV O.O. Postgraduate student, Department of Electrotechnical Devices and Electrotechnological Complexes National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8491-2678>, e-mail: bazarov.oleh@gmail.com.

Purpose. To assess the reliability of operation of low and medium power electromechanical converters based on real experience in operating such systems.

Methodology. Statistical analysis methods, classical calculation methods for synchronous salient pole generators with electromagnetic excitation.

Findings. An analysis of failure statistics of autonomous electromechanical converters of small and medium power was carried out. The results obtained emphasize the need to implement generator condition monitoring systems for early detection of malfunctions. Regular diagnostics and load control will help prevent critical breakdowns and increase the service life of the equipment. The collected statistical data can be used to develop effective preventive measures, improve maintenance instructions and optimize generator operating modes. Further research can be aimed at developing algorithms for automatic load distribution between phases, improving protection systems and increasing the reliability of insulating materials. An analysis of the failure statistics of diesel and gasoline generators showed that electrical breakdowns account for 51% of cases, and mechanical ones - 49%. This indicates an approximately even distribution between the two categories of failures, which indicates the need for a comprehensive approach to maintenance and diagnostics. When using these installations for military purposes, the balance of failures shifts: mechanical failures: 75-85%, electrical failures: 15-25%. Among electrical failures, the most common are damage to the stator windings due to load asymmetry, failure of voltage regulators, malfunctions of the battery system and violations of the insulation of the electrical wiring. Mechanical failures are most often associated with wear of the piston group, insufficient lubrication, engine overheating due to malfunctions of the cooling system and malfunctions in the fuel system.

Originality. A detailed generalization of the experience of operating autonomous electromechanical converters in real conditions was carried out, which allowed us to establish the regularities of their operation, identify typical problems and develop recommendations for their elimination. The methods for assessing the efficiency of autonomous electromechanical converters proposed in the study can be used for further modernization of existing systems, as well as for creating new highly efficient autonomous power generating units.

Practical value. The results of the study have practical value for engineers, users and manufacturers of electromechanical equipment. The results obtained can be used to improve the efficiency and reliability of autonomous power systems operating in various conditions. In particular, it is possible to reduce maintenance costs, improve energy efficiency and extend the service life of the equipment. The results obtained can be used in the development of recommendations for the selection, modernization and diagnostics of autonomous electromechanical installations.

Keywords: autonomous electromechanical converters, power generating devices, operation, energy efficiency, reliability, maintenance, power supply, generator systems.

REFERENCES

- [1] Golovko, V. M., Ostroverkhov, M. Y., Kovalenko, M. A., Kovalenko, I. Y., & Tsyplenkov, D. V. (2022). Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 74–79. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074>
- [2] Chumack, V., Bazenov, V., Tymoshchuk, O., Kovalenko, M., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, I., & Tkachuk, I. (n.d.). Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114)), 56–62.
- [3] Ostroverkhov, M., Chumack, V., Kovalenko, M., & Kovalenko, I. (2022). Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetoelectric generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(2(118)), 67–78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263432>
- [4] IEEE. (2010). IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions (IEEE Std 1459-2010). IEEE.
- [5] Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Bastien, T., ... & Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- [6] Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95.
- [7] Munoz-Galeano, N., Alfonso-Gil, J., Orts-Grau, S., Seguí-Chilet, S., & Gimeno-Sales, F. (2015). Instantaneous approach to IEEE std. 1459 power terms and quality indices. *Electric Power Systems Research*, 125, 228–234.
- [8] Song-Manguelle, J., Ekemb, G., Mon Nzongo, D., Jin, T., & Doumbia, M. (2018). A theoretical analysis of pulsating torque components in ac machines with variable frequency drives and dynamic mechanical loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65, 9311–9324.
- [9] Song-Manguelle, J., Ekemb, G., Schroder, S., Geyer, T., Nyobe-Yome, J.-M., & Wamkeue, R. (2016). Analytical expression of pulsating torque harmonics due to pwm drive. (Журнал или конференция не указаны, пожалуйста, предоставьте эту информацию).
- [10] Chumak, V., Kovalenko, M., Tkachuk, I., & Kovalenko, I. (2022). Porivniannia synkhronnykh heneratoriv dlia avtonomnoi benzynovoi ustanovky. *Visnyk NTU «KhPI». Serii: Problemy udoskonalennia elekt-rychnykh mashyn I aparativ. Teoriia I praktyka*, (2 (8)), 32–38. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.06>
- [11] Song-Manguelle, J., Nyobe-Yome, J.-M., & Ekemb, G. (2010). Pulsating torques in pwm multi-megawatt drives for torsional analysis of large shafts. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46, 130–138.
- [12] Makedonski, N., & Parushev, P. (2023). Experimental Study of an Autonomous Power Supply System with a Special Type of Electric Drive. 1-6. <https://doi.org/10.1109/BulEF59783.2023.10406266>
- [13] Mingazeva, K. A., Karimov, R., Dmitriev, M. E., Kuskildin, T. R., Tashbulatov, R., & Nurmuhamedov, C. I. (2024). Development of scientific foundations and method of autonomous power and gas supply of remote consumers from gas distribution networks. *Petroleum Engineering*, 22, 294-303. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-4-294-303>
- [14] Serhiienko, V. (2023). Development of autonomous energy supply of a mobile surface degassing plant. *Journal of Electrical and Power Engineering*, 28, 47-52. <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2023-1-47-52>
- [15] Fedotov, A., Misbakhov, R., Chernova, N., & Bakhteev, K. (2019). Utilization of electrochemical energy storage devices in autonomous power supply systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 643, 012105. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012105>