

# ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ В СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.313

## АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ ЕНЕРГОБЛОКІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

С.Ф. Артюх<sup>1</sup>, П.В. Заниборщ<sup>2</sup>, Д.В. Іріков<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Українська інженерно-педагогічна академія, Харків; <sup>2</sup>Запорізька АЕС)

*Наведені та проаналізовані статистичні дані дефектів електроустаткування системи власних потреб Запорізької АЕС.*

***надійність, електроустаткування, енергоблок, атомні електричні станції***

На сучасному етапі розвитку енергетики забезпеченню надійності роботи електроустаткування АЕС приділяється велика увага.

Основні види порушень у роботі електроустаткування розглядаються з урахуванням усіх можливих режимів його експлуатації, основними з яких є: пуск (включення, відкриття, синхронізація); режим роботи (нормальний режим, режим регулювання, режим чекання чи навантажувальний резерв, непроєктний режим); останов (відключення, закриття); технічне обслуговування (випробування, ввід в дію, ревізія чи огляд, інші види ТО); ремонт (капітальний, середній, поточний).

Електроустаткування АЕС за своїми функціями виконує різні функції і може бути розділене на кілька характерних груп, а саме:

- силове електроустаткування, що забезпечує видачу потужності в енергосистему;
- системи електропостачання механізмів основного технологічного циклу і систем аварійного розхолодження, включаючи електроприводи насосних агрегатів, основні, резервні й аварійні джерела живлення, розподільні пристрої, кабельні траси, пристрої автоматики систем електропостачання;
- спеціальне електроустаткування систем керування і захисту реактора, аварійного охолодження активної зони і локалізації аварії.

Забезпечення надійного функціонування пристроїв нормальної експлуатації та захисних пристроїв, що локалізують аварії, істотно залежить від схемних і конструктивних рішень в електричній частині АЕС і надійності використовуваного устаткування [1].

Відмови окремих видів електрообладнання в умовах нормальної експлуатації може призвести до спрацьовування аварійного захисту реактора і зупинки енергоблоку, що небажано не тільки через різку зміну технологічного режиму реактора та його систем, але й через економічні збитки внаслідок зниження виробітку електроенергії. Крім того, аварійне відключення енергоблоку створює передумови для розвитку системної аварії, що може призвести до знеструмлення системи власних потреб (ВП). Особливу небезпеку можуть мати відмови в електричній частині систем аварійного розхолодження реактора [4].

Нижче розглянута статистика дефектів електроустаткування системи власних потреб блоків Запорізької АЕС. Визначення дефектів проводилось згідно РД 53.025.002-88 «Правил організації техногенного обслуговування і ремонту атомних станцій» та «Надійність техніки: терміни і визначення».

На рис. 1 наведені статистичні дані кількісного розподілу дефектів по основному електроустаткуванню системи ВП блоків АЕС за 2003 – 2004 рр.

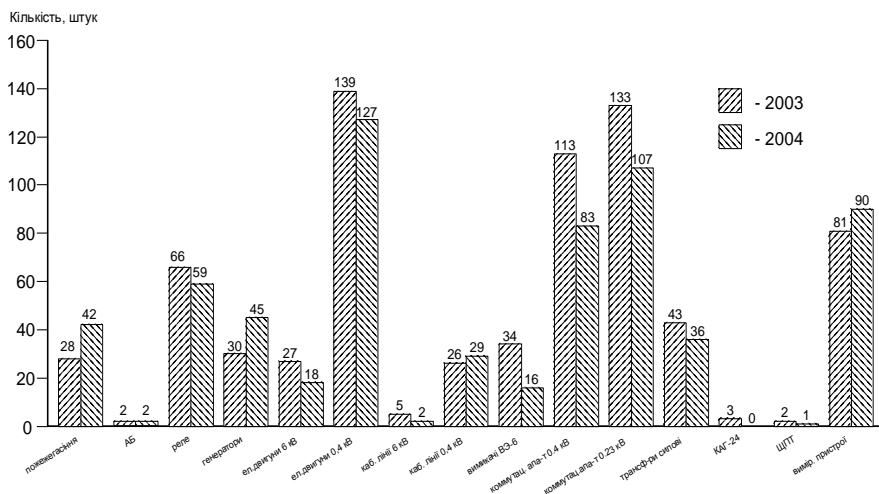


Рис. 1. Діаграма зміни кількості дефектів по електричному устаткуванню за 2003 – 2004 рр.

З даної діаграми видно, що найбільша кількість дефектів у 2003 – 2004 рр. була в електродвигунах 0,4 кВ і комутаційній апаратурі.

На рис. 2 наведені дефекти в електродвигунах 0,4 кВ більш детально з розбивкою по вузлах та елементах конструкцій.

Виходячи з результатів вищенаведених даних, можна відзначити приріст дефектів у літній період часу. Це можна пояснити в першу чергу підвищенням температури навколишнього середовища до 30 – 35 °С, що приводить до зносу електроустаткування через прискорений знос ізоляційних матеріалів обмоток електродвигунів, виникнення в них мікротріщин і підвищення ймовірності пробою ізоляції з виникненням ситуації повного виходу з ладу обмотки через міжвиткове замикання, а також підвищення нагріву рухомих контактних з'єднань силового комутаційного устаткування, що призводить до ушкодження контактних вузлів.

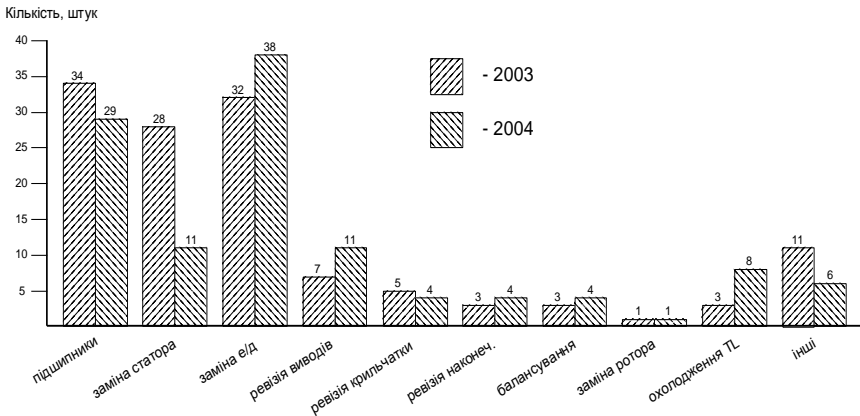


Рис. 2. Розподіл дефектів електродвигунів 0,4 кВ по основних вузлах

Не виключено, що підвищується кількість дефектів тих вузлів, які мають справу з охолоджуючою водою, яка в літній період більше засмічується.

Далі розглянемо більш детально надійність електродвигунів 0,4 кВ, які є найбільшими споживачами власних потреб станції.

Їх ушкодження можна розділити на дві основні групи:

- ті, що характеризують ушкодження обмоток статора електродвигуна;
- ті, що пов'язані з ушкодженням підшипникових вузлів.

За даними, отриманими у процесі експлуатації електродвигунів Запорізької АЕС протягом 2000 – 2005 рр. відмови розподіляються в такий спосіб: ушкодження підшипникового вузла – 40%; ушкодження обмотки статора – 35%; ушкодження силових виводів обмоток – 17%; ушкодження обмотки ротора і балансування – 5%; інші причини – 3%. Розглянемо найбільш характерні причини ушкоджень.

Ненормальна робота підшипникового вузла виявляється за надмірним підвищенням температури, шуму, вітоку змащення, підвищеному опору під обертання та збільшення моменту рушання. Причини, що при-

водять до цього, дуже різноманітні як за своєю фізичною природою, так і за ступенем їхнього впливу на кінцевий результат.

На зносостійкість і довговічність деталей підшипників впливають структурні особливості металу, хімічна комбінація матеріалу та змачення, корозія, тепловий вплив, стан і коливання.

Переважним видом зносу підшипника, викликаного контактною втомою робочих поверхонь, є викришування з них металу у виді дрібних кульок, а також відшарування частинок металу. Однією з причин виникнення дефектів у підшипниках є їх підвищена вібрація. Найбільш істотними джерелами вібрації є радіальне та осьове биття кілець, овальність, гранчастість і конусність кілець, різномірність кульок, допуски в гніздах сепараторів, хвилястість і шорсткість доріжок кочення, овальність і гранчастість кульок.

Радіальне биття зовнішніх кілець порушує співвісність у підшипникових вузлах. Бічне биття торців внутрішніх і зовнішніх кілець викликано їхньою непаралельністю, що призводить до перекосу внутрішнього кільця щодо зовнішнього. Величина зазначеного биття тим менше, чим вища прецизійність підшипника.

Овальність кілець є причиною вібрації з частотою (Гц), рівній подвійній частоті обертання машини (об/с)  $f = 2n$ .

Частота вібрацій, порушувана різномірністю кульок, залежить від швидкості обертання сепараторів і конкретного розподілу різномірних кульок у підшипнику. За рівномірного чергування в підшипнику кульок великого і малого розмірів ця частота (Гц) визначається

$$f = \frac{r_1 z n}{(r_1 + r_2)^2},$$

де  $r_1, r_2$  – радіуси доріжок кочення відповідно внутрішнього та зовнішнього кілець;  $z$  – кількість тіл кочення;  $n$  – число обертів машини.

Овальність і гранчастість тіл кочення залежать від класу точності підшипників. Частота вібрації (Гц), викликана гранчастістю тіл кочення

$$f = (1 - d_{\text{ш.о.}}^2) z k_1 n / d_{\text{ш.о.}},$$

де  $d_{\text{ш.о.}} = d_{\text{ш}} / D_0$  – відносний діаметр тіл кочення;  $D_0$  – діаметр кола по центрах тіл кочення;  $d_{\text{ш}}$  – діаметр тіл кочення;  $k_1$  – кількість граней.

Надмірно великі зазори в гніздах сепараторів приводять до зсуву сепараторів на величину зазору і появу вібрації з частотою (Гц)

$$f = (1 - d_{\text{ш.о.}}) n / 2.$$

Вібрація з такою ж частотою виникає через незрівноваженість сепаратора. Малі зазори можуть бути причиною заїдання кульок і порушення кінематики обертання підшипника, що є причиною підвищеного шуму.

Виникаючі в підшипникових вузлах динамічні імпульси від хвилястості не мають періодичного характеру. Частота і спектр вібрацій, обумовлених цими причинами, нестабільні. Складові цього спектра лежать переважно в області високих частот. Рекомендується стосовно доріжок кочення кулькових підшипників хвилястістю вважати поглиблення, що перевищують за висотою 0,1 мкм і довжиною, співмірною з радіусом кульок.

Частота (Гц) вібрацій, обумовлена хвилястістю

$$f \approx m(1 \pm d_{\text{ш.о.}})n/2,$$

де  $m$  – кількість хвилястостей по колу доріжок кочення внутрішнього (–) чи зовнішнього (+) кілець.

Шорсткість поверхонь кочення має менше значення у віброеспектрі підшипників через малу відстань між окремими виступами порівняно з радіусом кульок.

Крім зазначених причин можливі локальні дефекти на доріжках кочення. До числа таких дефектів відносяться місцеве бринелювання доріжок кочення під час транспортування машин залізницею. Частота (Гц) цієї вібрації

$$f = z(1 \pm d_{\text{ш.о.}})k_2 n/2,$$

де  $k_2$  – число дефектів на доріжках кочення.

Знак «–» приймається за наявності дефектів на зовнішньому кільці.

Вібрація підшипників збуджується також періодичними змінами твердості підшипника під час перекочування тіл кочення. Частота (Гц) цієї вібрації  $f = z(1 - d_{\text{ш.о.}})n/2$ .

На рівень вібрації з цією частотою крім твердості кілець впливають радіальний зазор і величина навантаження на підшипник.

Усі зазначені частоти можна знайти в спектрі вібрації машини, знімаючи його на зовнішніх кільцях підшипників.

**Критерії працездатності підшипникових вузлів.** Основними критеріями працездатності підшипників кочення є: момент тертя, температура зовнішнього кільця, загальний рівень вібрацій, віброеспектр підшипникового вузла, хімічний склад мастила.

Підвищений момент тертя викликає розігрів деталей підшипникового вузла, тому збільшення температури зовнішнього кільця понад припустиме значення свідчить про несправність підшипника. Критерієм відмови звичайно є підвищення температури на 15-20<sup>0</sup>С за 10-15 годин роботи машини. Підвищення загального рівня вібрації на 15% від первісного значення в номінальному режимі роботи також є критерієм відмови підшипникового вузла.

Однією з причин виникнення дефекту в підшипниковому вузлі двигуна може бути дисбаланс його ротора. Дисбаланс ротора може виникнути через технологічні відхилення під час виготовлення, прогин вала, деформації ро-

тора через нагрівання, асиметрії конструкції машини, неоднорідності обертових частин. На практиці в машинах цілком усунути дисбаланс неможливо [2]. У зв'язку з цим розроблений ДСТ 12327 – 79 «Машини електричні обертові. Залишкові дисбаланси роторів. Норми і методи виміру», яким лімітуються величини залишкових незрівноважень залежно від маси ротора, а машини залежно від вимог за вібраціям поділяються на три класи.

**Причини пошкодження ізоляції електричних двигунів.** У процесі експлуатації ізоляція часто працює в тяжких умовах зовнішніх впливів. Руйнування ізоляції відбувається в результаті нагрівання, механічних зусиль (вібрація, тиск, удари тощо), впливу вологи, агресивних середовищ та інших факторів. У високовольтних машинах істотне значення має вплив електричного поля. Поступове руйнування ізоляції в експлуатації чи під час випробувань звичайно завершується проблемою.

Основним критерієм працездатності ізоляції є пробивна напруга  $U_{пр}$ . Розрізняють три основних форми пробою твердих однорідних діелектриків: тепловий, електричний та іонізаційний.

Електричний пробій розглядають за наступних умов. У діелектрику виключена можливість теплового пробою, провідність  $\rho$  і діелектричні втрати  $\text{tg } \delta$  малі; матеріал діелектрика хімічно стабільний, відсутня іонізація газових включень. Таким чином, електричний пробій характеризує речовина діелектрика, зв'язана з його структурою і мало залежить від зовнішніх умов. Електричний пробій відбувається в більшості випадків за напруженості електричного поля  $10^6 - 10^7$  В/см.

Іонізаційний пробій пов'язаний з іонізаційними процесами в газових включеннях ізоляції. Під час іонізації газового включення відбувається електронне й іонне бомбардування твердого діелектрика, що стикається з газовими включеннями. Через деякий час, за достатньої інтенсивності бомбардування, настає пробій найближчого до газового включення шару твердого діелектрика. Розвиток цього процесу може призвести до повного чи часткового пробою твердого діелектрика. Іонізаційний пробій найбільш характерний для органічної ізоляції.

Факторами, що впливають на термін служби ізоляції електричних машин, є температура обмотки, вплив електричного поля чи механічні зусилля, а також вплив вологи, агресивних середовищ, запиленість тощо. З перерахованих факторів у багатьох випадках домінує температура і як наслідок – теплове старіння ізоляції.

Механічні і термомеханічні фактори, що впливають на ізоляцію, також значною мірою впливають на термін служби. Термомеханічні навантаження виникають в результаті періодичного нагрівання та охолодження обмоток [3]. Механічні навантаження є наслідком електродинамічних сил, що виникають у машині, незрівноваженості обертових частин, магнітного тяжіння, відцентрових зусиль, ударів і поштовхів з боку

приводу чи приводного механізму. Перераховані зусилля звичайно мають знакомінний циклічний характер, причому найбільш типово є вібрація з частотою близькою до 100 Гц.

Механічні характеристики ізоляції залежать від температури, а саме: під час нагрівання межа міцності ізоляції швидко знижується й одночасно ізоляція стає більш еластичною. Особливо це відноситься до ізоляційних конструкцій на основі термопластикових компаундів. Наприклад, межа міцності ізоляції на розтягнення складає  $3340 \text{ Н/см}^2$  для  $20^\circ\text{C}$  і відповідно  $344 \text{ Н/см}^2$  для  $100^\circ\text{C}$ , тобто знижується майже в 10 разів. За зниження температури така ізоляція на термореактивних сполученнях більш стабільна.

Серйозними факторами, що впливають на термін служби ізоляції, є волога та хімічно агресивні середовища. Волога проникає в ізоляцію тоді, коли машина знаходиться в неробочому стані, особливо під час її остигання. Мала в'язкість та інші властивості води сприяють її проникненню в дрібні пори. Волога знижує опір ізоляції та її електричну міцність, створюючи тим самим передумови для появи в ізоляції струмів витоку, часткових розрядів та інших явищ, що збільшують ймовірність пробою. Просочення не завжди охороняє матеріал від зволоження (усе залежить від складу просочувальної рідини і технології), а тільки зменшує швидкість поглинання вологи, оскільки просочувальні складки не проникають у мікроскопічні пори ізоляції, куди легко проникає вода.

Шкідливий вплив на ізоляцію роблять хімічно активні речовини такі, як кислоти, луги та їхні ангідриди, що знаходяться в навколишньому середовищі. Ізоляцію руйнують оливи та пари розчинників. Пил, що міститься в повітрі, здійснює на ізоляцію абразивну дію та знижує її опір.

Вплив на довговічність ізоляції температури, вологості й агресивних середовищ оцінюють за формулою

$$\tau = A \exp(B/Q) C^{-m} \eta^{-n},$$

де  $C$  – концентрація агресивного агента;  $\eta$  – відносна вологість;  $m$ ,  $n$  – коефіцієнти.

Отже, вплив вологи й агресивних середовищ сприяє прискоренню й активізації процесів старіння та попереднього пробою ізоляції. В основі ж руйнування ізоляції лежать температурні та механічні впливи.

Розглянемо детальніше один з основних показників надійності асинхронних електродвигунів 0,4 кВ експлуатованих на блоках АЕС, яким є параметр потоку відмовлень,  $W$  1/рік.

Зведемо в таблицю статистичні дані відмовлень електродвигунів 0,4 кВ, отримані в процесі експлуатації протягом 2004 року.

Кількість дефектів електродвигунів 0,4 кВ в розрізі по блоках і місяцях 2004 року наведено в табл.

Кількість дефектів електродвигунів 0,4 кВ  
в розрізі по блоках і місяцях 2004 року

місяць № блоку	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень	Усього по блоках
блок 1	0	3	1	1	1	2	3	1	2	1	1	0	<b>16</b>
блок 2	1	0	1	0	1	2	4	3	1	0	1	0	<b>14</b>
блок 3	1	3	0	2	1	1	4	1	2	2	0	1	<b>18</b>
блок 4	3	2	1	3	4	0	3	1	1	0	2	0	<b>20</b>
блок 5	0	3	3	5	1	2	0	0	3	4	1	1	<b>23</b>
блок 6	2	0	4	1	0	4	0	4	1	2	3	1	<b>22</b>
<b>Усього по місяцях</b>	<b>7</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>113</b>

Як видно з табл. 1, найбільша кількість дефектів – 23, протягом 2004 р. було на блоці № 5.

Протягом 2004 р. під час експлуатації електродвигунів 0,4 кВ блоку 5 ЗАЕС дефекти розподілилися наступним чином:

- ушкодження підшипникових вузлів, 11 дефектів;
- ушкодження обмоток статора, 5 дефектів;
- заміна крильчатки, 1 дефект;
- ревізія виводів обмоток статора, 3 дефекти;
- дефекти систем водяного охолодження, 3 дефекти.

Кількість електродвигунів установлених на блоці – 590.

Кількість відмовлень – 23.

Встановлено, що коефіцієнт використання даних електродвигунів складає

$$K_B = 0,4.$$

Параметр потоку відмовлень досліджених електродвигунів становив

$$W = \frac{23}{590 \cdot 0,4} = 0,097 \text{ 1/рік.}$$

З результатів розрахунків видно, що параметр потоку відмовлень електродвигунів, експлуатованих на блоці №5 ЗАЕС нижче встановленого стандартами і дані електродвигуни мають високий рівень надійності.

Підвищення надійності електричних машин насамперед пов'язане з подальшою розробкою наукових основ проектування і втіленням відповідних заходів з удосконалення методів їх конструювання, виробництва й експлуатації.

Основні шляхи підвищення надійності електричних машин можна визначити так:



- поліпшення теплового стану машин шляхом переходу на більш високий клас нагрівостійкості ізоляції;
- вирівнювання температури окремих частин машини за рахунок вибору навантажень, розробки систем охолодження, застосування високоякісних, чутливих захистів від перевантажень;
- розробка та впровадження конструкцій і вузлів підвищеної надійності;
- розробка та використання нових конструкцій підшипникових вузлів;
- розробка та впровадження заходів щодо зниження вібрацій як електричної машини так й електромеханічної системи в цілому;
- підвищення якості комплектуючих виробів і матеріалів у тому числі: застосування підшипників підвищених класів, впровадження просочувальних лаків, що мають високу нагрівостійкість, застосування спеціальних проводів з міцною й еластичною ізоляцією, зниження твердості обмотувальних проводів, застосування високоякісної міканітової ізоляції. Вдосконалення методів контролю (вхідний контроль матеріалів і комплектуючих виробів, міжопераційний контроль), проведення різного типу випробувань тощо.

**Висновки.** Із проведених досліджень надійності електрообладнання за даними експлуатації атомних електричних станцій видно, що надійність дослідженого електрообладнання АЕС відповідає встановленим вимогам. Для підтримки і підвищення його надійності дуже важливо мати статистичну реальну інформацію про його відмови під час експлуатації.

Результати наведених досліджень можуть бути використані розробниками і виготовлювачами електрообладнання, вони можуть допомогти виявити слабкі та ненадійні вузли й намітити шляхи їхньої модернізації. Вони також можуть бути основою вдосконалення конструкцій і технології виробництва, визначення обґрунтованих термінів ремонту різних видів електрообладнання.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Артюх С.Ф., Пантелеєва І.В. Электрические станции, сети и системы: Учебник для вузов. – Х.: ЗАО «Харьковская типография № 16», 2001. – 368 с.*
2. *Князевский Б.А., Трунковский Л.Е. Монтаж и эксплуатация промышленных электроустановок: Учебник для вузов по спец. "Электроснабжение пром. предприятий, городов и сельского хоз-ва"; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1984. – 175 с.*
3. *Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для электротехн. спец. вузов. / 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.*
4. *Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 198 с.*

*Надійшла 24.03.2006*

**Рецензент:** доктор технічних наук, професор О.М. Фоменко,  
Харківський університет Повітряних Сил.