

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

В. В. Радченко
В. О. Кобець

***Моніторинг та діагностика гідроенергетичного
обладнання і споруд ГЕС***

навчально-методичний посібник

***для студентів ЗДІА
спеціальності 7.090503, 8.090503 «Гідроенергетика»
усіх форм навчання***

**Запоріжжя
2014**

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

*Затверджено до друку
рішенням вченої ради ЗДІА
протокол № від*

***Моніторинг та діагностика гідроенергетичного
обладнання і споруд ГЕС***

навчально-методичний посібник

***для студентів ЗДІА
спеціальності 7.090503, 8.090503 «Гідроенергетика»
усіх форм навчання***

*Рекомендовано до видання
на засіданні
кафедри гідроенергетики
протокол № 11 від 12.01.2013*

**Запоріжжя
2014**

Моніторинг та діагностика гідроенергетичного обладнання і споруд

ГЕС. Навчально-методичний посібник.

Для самостійної та практичної роботи студентів ЗДІА спеціальності 7.090503, 8.090503 «Гідроенергетика» усіх форм навчання.

Авт.: В. В. Радченко, В. О. Кобець – Запоріжжя, ЗДІА, 2014, 198 с.

Автори: – **В. В. Радченко, к т. н., доцент; В. О. Кобець, ст. викл.**

Рецензенти: доц, к. т. н. О. В. Близняков (Запорізький національний технічний університет);
проф., д. т. н. І. Я. Яковлева (Запорізька державна інженерна академія)

Навчально-методичний посібник з дисципліни «Моніторинг та діагностика обладнання і споруд ГЕС» має наступні розділи:

Розділ 1. Основи технології діагностики технічних об'єктів.

Розділ 2. Розробка технології діагностування обладнання

Розділ 3. Прогнозування технічного стану обладнання

Розділ 4. Технології обробки сигналів

Розділ 5. Характеристика системи контролю ГЕС

Розділ 6. Системи контролю гідроагрегата

Розділ 7. Лабораторний практикум

Додаток. Довідкові матеріали

Наведено основні підходи до технології побудови діагностичних систем. Визначені основні задачі, технологія и засоби реалізації. Розглянуті основні види та етапи діагностування. Розглянуто основні питання реалізації технічної діагностики, особливості відмов, пошуку пошкоджених елементів, визначення надійності обладнання в експлуатації та умов використання окремих видів функціональних складових, а також загальні питання прогнозування стану технічних об'єктів. Наведено основні шляхи вирішення задач. Розглянуто інженерні підходи, види, форми і методи прогнозування, а також основні технології обробки інформаційних сигналів системи моніторингу. Містить основні відомості з реалізації системи керування ГЕС, ієрархії контролю та управління, основні складові й особливості архітектури, а також розглянуто реалізацію й особливості агрегатних систем контролю. Також містить лабораторний практикум з використанням обладнання ГЕС.

У тексті наводяться завдання для самостійної роботи студентів і контрольні запитання.

Зміст навчального посібника відповідає програмі дисципліни «Моніторинг та діагностика обладнання і споруд ГЕС».

Іл. – 50, бібл. список – 35 найм.

З м і с т

Вступ	5
1. ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЙ ДІАГНОСТУВАННЯ	7
1. 1 Загальні поняття і визначення	7
1. 2. Визначення технічного стану	13
1. 3. Загальна характеристика технології діагностики	14
1. 4. Визначення об'єктів діагностики	16
1.5. Вибір параметрів і розробка методів діагностування	20
1. 6. Вибір і розробка засобів діагностування устаткування	26
2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ДІАГНОСТУВАННЯ УСТАТКУВАННЯ ...	30
2. 1. Характеристика технології діагностики	30
2. 2. Визначення несправностей електроустаткування	34
2. 3. Експлуатаційна надійність елементів устаткування	39
2. 4. Порухення ізоляції устаткування	42
2. 5. Відмови електромеханічних елементів устаткування	49
3. ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ	57
3. 1. Фізичні основи прогнозування технічного стану устаткування	57
3. 2. Основні шляхи рішення задач прогнозування	61
3. 3. Інженерні методи прогнозування при експлуатації устаткування	64
4. ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ	76
4. 1. Основні властивості й характеристики сигналів	76
4. 2. Обробка аналогових сигналів	78
4. 3. Математичний опис цифрових сигналів	85
4. 4.. Аналіз в просторі станів	92
4. 5. Z – перетворення	98
5. ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГЕС	105
5. 1. Система контролю і управління ГЕС	107
5. 2. Ієрархія управління ГЕС	108
5. 3. Особливості архітектури Централог	110
6. СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ГІДРОАГРЕГАТУ	113
6. 1. Система контролю температури	113
6. 2. Аналізатор характеристик мережі	116
6. 3. Система механічного моніторингу гідроагрегату	120
6. 4. Моніторинг робочого зазору	151
7. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ	163
Контрольні запитання	190
ЛІТЕРАТУРА	193
Висновки	196
ДОДАТКИ	197

Питання

до вхідного контролю з дисципліни

1. Будова мікропроцесора.
2. Особливості будови контролера.
3. Організація обробки інформації.
4. Види і характеристики датчиків.
5. Принципи обробки інформації.
6. Особливості вимірювальних перетворювачів.
7. Особливості побудови датчиків.
8. Схеми контролю механічних деформацій.
9. Схеми електричних вимірювань
10. Контроль температури.
11. Особливості контролю вібрацій

ВСТУП

Моніторинг справедливо й слушно відносять до потужних сучасних засобів забезпечення потрібного функціонального рівня обладнання. Діагностика в поєднанні з можливостями обчислювальної техніки дозволяє створити системи контролю стану обладнання, що не має аналогів з багатьох поглядів. Однак головною перевагою є практична можливість безперервної реалізації зазначеного процесу.

На висвітлення основних питань розробки моніторингу зорієнтовано виклад наведеного матеріалу.

В першому розділі наведено основні підходи до технології побудови діагностичних систем. Визначені основні технічні задачі, технологія и засоби реалізації. Розглянуті основні види та етапи діагностування.

В другому розділі наведено основні питання реалізації технічної діагностики. Відображено особливості відмов, пошуку пошкоджених елементів, визначення надійності обладнання в експлуатації та умов його використання, а також особливості пошкоджень окремих видів функціональних складових.

В третьому розділі розглянуто основні загальні питання прогнозування стану технічних об'єктів. Наведено основні шляхи вирішення задач. Розглянуто інженерні підходи, види, форми і методи прогнозування.

В четвертому розділі наведено основні відомості з реалізації системи керування ГЕС. Розглянуто ієрархію контролю та управління, основні складові й особливості архітектури.

В п'ятому розділі розглянуто реалізацію й особливості агрегатних систем контролю. Наведено можливості основних систем моніторингу стану основного гідроенергетичного обладнання ГЕС.

Видання має сприяти ефективному засвоєнню необхідних знань й формуванню потрібних практичних навичок студентів, та використанню їх в дипломному проектуванні й підготовці кваліфікаційних робіт магістрів.

1. ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЙ ДІАГНОСТУВАННЯ

Надійність й функціональна ефективність обладнання та споруд ГЕС має велике значення з погляду реалізації енергетичних технологій. Вона має багато особливостей, що необхідно враховувати для створення дійсно корисної практичної реалізації. Поєднує також можливості науки та мистецтва. Вимагає розвинутих творчих здібностей та точних технічних знань.

1. 1. Загальні поняття й визначення

У числі найважливіших експлуатаційно-технічних характеристик, що визначають ефективність технічних об'єктів, особливе місце займають показники надійності.

Надійність – властивість об'єкту зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування. У даному визначенні, по-перше, підкреслена безперервність виконання об'єктом заданих функцій. Немає сенсу говорити про надійність об'єкту, наприклад, під час проведення на ньому планових попереджувальних робіт, ремонтів, заміни устаткування, оглядів і інших заходів, пов'язаних із зупинкою об'єкту, оскільки в цей час об'єкт не виконує своїх функцій, а саме: не видає електроенергію й т. і. По-друге, у визначення надійності включено поняття «Встановлені межі».

Складна система при відмові окремих елементів або підсистем зберігає свою працездатність і може забезпечувати своїх споживачів, наприклад, енергією, але в меншій кількості. По-третє, надійність об'єкту доцільно визначати за певні проміжки часу, наприклад, за час роботи на заданому рівні потужності, за час до припинення експлуатації й ін.

Залежно від умов вирішуваної задачі один і той же об'єкт може іменуватися системою або елементом. Під системою (системою елементів) зазвичай розуміють об'єкт, в якому необхідно і можливо розрізняти певні взаємозалежні частини, сполучені воєдино.

Елемент – певним чином обмежений об'єкт, що розглядається як частина іншого об'єкту.

Поняття «система» і «елемент» абстрактні й відносні. Так, будь-який об'єкт при рішенні одних задач може розглядатися як система, а при рішенні інших – як елемент. Наприклад, електричний апарат в цілому при аналізі його надійності є досить складною системою, елементами якої можливо назвати окремі пристрої, що забезпечують селективність відключення, перевантаження, короткого замикання й ін. Але якщо проводиться аналіз надійності системи управління ГЕС, що включає групу електричних апаратів, то в цьому випадку електричний апарат є елементом системи. У свою чергу, й електроенергетична система (ЕЕС) може бути елементом більшої ЕЕС даного економічного району країни. Проте таке уявлення про надійність об'єкту було б неповним, якщо не враховувати структуру елемента, задану комплектом технічної документації.

Можливо стверджувати, що надійність як складна, синтетична властивість залежно від призначення об'єкту за умов його застосування складається з поєднань наступних властивостей:

- # безвідмовність;
- # ремонтопридатність;
- # довговічність;
- # остійливість;
- # стабільність;
- # безпечність.

Для об'єктів, що працюють безперервно, таких, наприклад, як енергетичні блоки електричних станцій, гідроагрегати ГЕС, ГАЕС, з наведених властивостей найбільш важливі три перші.

Властивості, складові надійності, можуть також характеризувати й інші особливості технічного об'єкту. Так, безпека ЕЕС в значній мірі обумовлена безвідмовністю електроустаткування, хоча при цьому має і самостійне значення.

Безвідмовність – це властивість об'єктів зберігати працездатний стан протягом деякого часу або визначеного напрацювання. Зазвичай вона розглядається стосовно режиму експлуатації об'єкту, й перерви в його роботі (планові та позапланові) не враховуються. Безвідмовність переважно характеризується поточним технічним станом об'єкту: справністю, несправністю, працездатністю, непрацездатністю, дефектом, пошкодженням і відмовою. Кожний з цих станів має

сукупність значень параметрів, що характеризують стан об'єкту та якісні ознаки. Номенклатура цих параметрів і ознак, а також межі допустимих їх змін встановлюються нормативною документацією на об'єкт.

Стан об'єкту, що обумовлює здатність виконувати задані функції, які відповідають нормативно-технічній і конструкторській документації, фактично є його працездатність.

Справний стан об'єкту припускає відповідність всім вимогам нормативнотехнічної й конструкторської документації. Супротив цьому, несправний стан об'єкту означає невідповідність хоч би одній з вимог нормативно-технічної і конструкторської документації. Якщо значення хоч одного параметра, що характеризує реальну здатність елемента виконувати задані функції, не відповідає вимогам нормативно-технічної і конструкторської документації, то такий стан визначається як непрацездатний. А подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкту, зветься відмовою. Подія, що полягає в порушенні справного стану об'єкту, але зберігаючого його працездатність, носить назву пошкодження або дефекту.

Межі між справним і несправним, працездатним і непрацездатним станами зазвичай досить умовні й визначаються, в основному, сукупністю певних значень параметрів об'єктів. Ці значення одночасно є межами відповідних допусків.

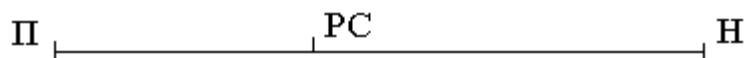


Рис. 1. 1. Робочий інтервал: П – працездатний стан; Н – непрацездатний стан; РС – робочий стан.

Працездатність і непрацездатність можуть бути як повними, так і частковими. Якщо об'єкт повністю працездатний, то в певних умовах експлуатації можливе досягнення максимальної ефективності його використання. Ефективність використання в тих же умовах частково працездатного об'єкту менше максимально можливої, але значення її показників знаходяться в межах, встановлених для такого функціонування, яке вважається нормальним для даного об'єкту.

Працездатність має розглядатися стосовно певних зовнішніх умов експлуатації об'єкту. Елемент, працездатний в одних умовах, може, залишаючись справним, виявитися непрацездатним в інших. Перехід

об'єктів з одного стану в інший зазвичай відбувається унаслідок пошкодження або відмови. Загальна схема станів і подій приведена на рис.1. 2.

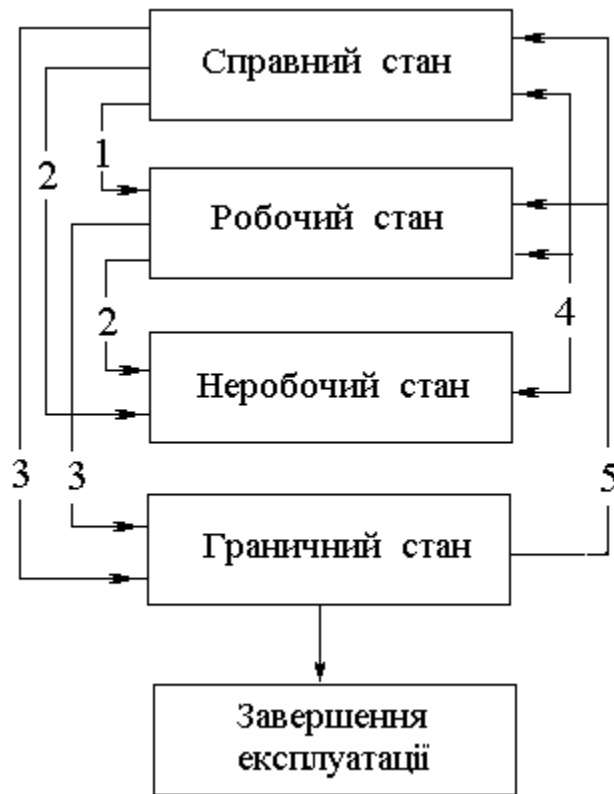


Рис.1. 2 Схема постійних станів і подій технічних об'єктів:

1 – пошкодження; 2 – відмова; 3 – перехід в граничний стан; 4 – відновлення; 5 – ремонт.

Працездатний об'єкт на відміну від справного має задовольняти лише тим вимогам нормативно-технічної і конструкторської документації, виконання яких забезпечує його застосування за призначенням.

Очевидно, що працездатний елемент може бути несправним або, наприклад, не задовольняючим естетичним вимогам, якщо погіршення зовнішнього вигляду не перешкоджає його застосуванню за призначенням.

Перехід елементу із справного в несправний стан відбувається внаслідок дефектів. Термін «дефект» застосовується, в основному, на етапах виготовлення і ремонту, коли необхідно враховувати окремо кожну конкретну невідповідність об'єкту вимогам, встановленим

нормативною документацією. Термін «несправність» використовується, коли потрібно враховувати зміни технічного стану елементів незалежно від числа виявлених дефектів. Знаходячись в несправному стані, об'єкт має один або декілька певних дефектів. У цьому плані можливе представлення станів у вигляді, показаному на рис. 1. 3.



Рис. 1. 3 Стани й події об'єкту

Несправність може призводити до відмови або дефекту. Накопичення дефектів також сприяє відмові. Тому важливо мати можливість усунення несправностей й відновлення технічного стану обладнання.

Ремонтопридатність – властивість об'єкту, що полягає в його пристосованості до попередження й виявлення причин відмов, пошкоджень і відновлення працездатного стану шляхом проведення технічного обслуговування і ремонтів. Ремонтопридатність є сукупність технологічності при технічному обслуговуванні й ремонтній технологічності об'єктів. Властивість ремонтпридатності повністю визначається його конструкцією, тобто передбачається і забезпечується при розробці, виготовленні і монтажі об'єктів з урахуванням майбутнього доцільного рівня їх відновлення, який визначається співвідношенням ремонтпридатності й зовнішніх умов для виконання ремонту, зокрема встановлюваних для цього меж відповідних витрат. Звідси витікає відносність ділення об'єктів на відновлювані і не відновлювані стосовно певних зовнішніх умов (точніше, на ті, що підлягають і не підлягають відновленню). Один і той же елемент залежно від навколишніх умов і етапів експлуатації може вважатися відновлюваним або не відновлюваним. Наприклад, доступність для виконання ремонту вбудованих електричних апаратів під час роботи підсистеми ЕЕС обмежена, ці елементи при роботі ЕЕС можливо віднести до не відновлюваних. Якщо електричний апарат

доступний для ремонту, то його відносять до відновлюваних. Слід зазначити, що доступність виконання ремонту часто включає й фактор просторовий. Так на ГЕС окрім підйомного обладнання передбачені й ремонтні майданчики.

Таким чином, поділ об'єктів на відновлювані і невідновлювані залежить від даної ситуації й в значній мірі умовний. Необхідне і безумовне ділення цих же елементів на взагалі доступні для ремонту і такі, що не підлягають йому стосовно всього часу їх існування, тобто на ремонтовні і неремонтовні. Ділення за обома ознаками для багатьох об'єктів співпадає: ремонтовний елемент може бути відновлюваним впродовж всього терміну служби, а неремонтовний, наприклад вакуумний вимикач, залишається невідновлюваним протягом всього часу існування. Проте є й ремонтовні об'єкти, які в певних ситуаціях у разі виникнення відмови протягом даного інтервалу часу не підлягають відновленню. З іншого боку, є неремонтовні елементи, самопоновлюючі працездатність у разі виникнення деяких відмов – зокрема, за наявності резервних елементів і відповідних автоматичних пристроїв, що здійснюють в таких випадках перехід на використання резерву (наприклад, елементи систем управління і захисту, збудження гідрогенераторів тощо).

Отже, при формулюванні й рішенні задач забезпечення, прогнозування та оцінювання надійності істотне практичне значення має основне рішення, яке має прийматися у разі відмови об'єкту, - відновлювати його чи ні.

Віднесення об'єкту до відновлюваних або невідновлюваних припускає вибір певних показників надійності. Наприклад, очевидно, що для невідновлюваного об'єкту взагалі не має сенсу такий показник надійності, як середній час відновлення.

Довговічність – це властивість об'єктів зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту. Для граничного стану об'єкту характерно наступне: подальше його застосування за призначенням неприпустимого або недоцільно, бо відновлення справного або працездатного станів неможливе або недоцільне. Критерієм граничного стану служить ознака. Сукупність ознак граничного стану

об'єкту, встановлено в нормативно-технічній і конструкторській документації. Об'єкт може перейти в граничний стан, залишаючись працездатним, якщо його подальше застосування за призначенням стане неприпустимим на вимоги безпеки, економічності або ефективності. Перехід об'єкту в граничний стан спричиняє за собою тимчасове або остаточне припинення його експлуатації.

Для неремонтовних об'єктів має місце граничний стан двох видів. Перший співпадає з непрацездатним станом; другий обумовлений тим, що починаючи з деякого моменту подальша експлуатація поки що працюючого елемента згідно певним критеріям виявляється неприпустимою у зв'язку з безпекою. Перехід ремонтного об'єкту в граничний стан другого вигляду відбувається раніше моменту виникнення відмови.

Для ремонтних об'єктів можливо виділити три види граничних станів. Перший і другий припускають капітальний або середній ремонт, тобто тимчасове припинення експлуатації. Третій – остаточне припинення експлуатації об'єкту.

Таким чином, в загальному випадку довговічність об'єктів, вимірювана технічним ресурсом або терміном служби, обмежена не відмовою об'єкту, а саме переходом в граничний стан, що означає необхідність в капітальному, середньому ремонтах або взагалі неможливість подальшої експлуатації.

Одним з центральних понять теорії надійності є поняття напрацювання, тому що відмови і переходи до граничного стану об'єктів обумовлені, як правило, їх роботою. Під напрацюванням розуміється тривалість або об'єм роботи об'єкту. Воно вимірюється в одиницях часу або одиницях об'єму виконаної роботи.

Об'єкт може працювати безперервно (за винятком вимушених перерв, обумовлених виникненням відмови і ремонтом) або з перервами, не обумовленими зміною технічного стану. У другому випадку розрізняють безперервне і сумарне напрацювання.

Обидва види напрацювання можуть бути випадковими і детермінованими величинами. Наприклад, напрацювання обладнання за зміну у разі відсутності вимушених простоїв. Сумарне напрацювання у ряді випадків зіставляють з певним інтервалом календарного часу.

Під технічним ресурсом, або ресурсом, розуміється напрацювання об'єкту від початку його експлуатації або його відновлення після ремонту певного вигляду до переходу в граничний стан.

Фізичний сенс ресурсу – зона можливого напрацювання об'єкту. Для неремонтованих елементів він співпадає із запасом знаходження в працездатному стані при експлуатації, якщо перехід в граничний стан обумовлений тільки виникненням відмови. Початок відліку напрацювання, створюючого ресурс, може співпадати з початком експлуатації об'єкту або після виконання ремонту. У кожен момент часу можливо розрізнити дві частини будь-якого ресурсу: витрачену до цього моменту у вигляді сумарного напрацювання, що відбулося, і що залишився до переходу в граничний стан. Залишковий ресурс оцінюють орієнтовно, оскільки ресурс в цілому є випадковою величиною. Як всяка випадкова величина, ресурс повністю характеризується розподілом вірогідності. Параметри цього розподілу служать показниками довговічності (середній і гамма/відсотковий ресурси). Все зазначене про види ресурсу повною мірою відноситься й до видів терміну служби за винятком того, що термін служби на відміну від ресурсу вимірюється календарним часом. Співвідношення значень ресурсу і терміну служби одного й того ж вигляду залежить від розподілу напрацювання в безперервному часі, тобто від інтенсивності експлуатації об'єкту.

Термін служби – календарна тривалість від початку експлуатації об'єкту або відновлення після ремонту певного вигляду до переходу в граничний стан.

Безпечність – особливо важлива властивість об'єкту не допускати ситуації, небезпечні для людини й навколишнього середовища.

Таким чином важливим завданням є визначення фактичного стану технічного об'єкту.

1. 2. Визначення технічного стану

Розглянемо систему, що складається з n елементів. Стан системи у момент часу t визначається станом окремих її елементів у цей момент. Якщо стан j -го елемента системи у момент часу t позначити через $Z_j(t)$, то стан системи можливо представити у вигляді

$$Z(t) = [Z_1(t), \dots, Z_n(t)], j = [1, n]. \quad (1. 1)$$

Визначеним сукупністям станів елементів відповідає стан справності системи в цілому Z (наприклад, стан Z_1, Z_2, Z_n завжди є станом справності для системи). Іншим сукупностям станів елементів відповідає стан відмови системи в цілому Z .

Пояснити наведене можливо на прикладі системи з двох елементів. Всього можливі чотири різні стани системи, визначувані станами окремих елементів:

$$Z^1 = (Z_1, Z_2), Z^2 = (\underline{Z}_1, Z_2), Z^3 = (Z_1, \underline{Z}_2), Z^4 = (\underline{Z}_1, \underline{Z}_2). \quad (1. 2)$$

З плином часу система може переходити з одного стану в інший, рис.1. 3.

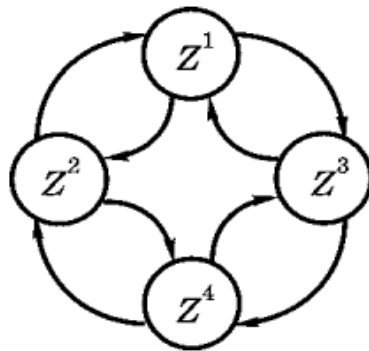


Рис. 1. 3 Схема переходу з одного стану в інший

Визначити вказаний перехід можливо засобами діагностики і контролю.

1. 3. Загальна характеристика технології діагностики

Метою діагностування є забезпечення найбільш ефективної експлуатації електроустаткування при заданому рівні надійності і скорочення до мінімуму витрат на технічне обслуговування й ремонт. Ця мета досягається шляхом визначення технічного стану електроустаткування, що дозволяє своєчасно запобігати відмовам, скорочувати простої із-за несправностей, проводити комплекс заходів щодо підтримки працездатності електроустаткування відповідно до даними діагностування, тобто мета досягається за допомогою

управління технічним станом електроустаткування в процесі експлуатації.

Основне завдання діагностування полягає в отриманні достовірної інформації про технічний стан устаткування без його розбирання.

Завдання діагностування в системі експлуатації електроустаткування полягають у встановленні необхідності заміни змінних вузлів і деталей, а також регулювань; необхідності ремонтних дій (поточного або капітального ремонтів); причин можливих відмов електроустаткування; якості проведення ремонтних робіт.

• **Методичні основи діагностики устаткування**

Важливою умовою ефективного використання основного устаткування ГЕС є контроль його стану. При цьому важлива діагностика як в процесі ремонту устаткування, так і контроль його поточного експлуатаційного стану.

Технічний стан вузлів і деталей устаткування змінюється в процесі експлуатації й залежить від режимів роботи і зовнішніх дій. У зв'язку з цим параметри, що характеризують стан вузлів і деталей, є змінними величинами. Електроустаткування в процесі експлуатації може знаходитися в кінцевій множині станів. Цю множину станів можливо розділити відповідно до ГОСТ 13377–75 на дві області: справних і несправних станів.

Для того, щоб встановити, в якій області станів (справного або несправного) знаходиться дане устаткування, при діагностуванні визначають його працездатність. Аналіз справного стану устаткування дозволяє встановити ступінь працездатності і момент його переходу в область несправних станів, тим самим прогнозувати стан електроустаткування. Якщо устаткування знаходиться в області несправних станів, то одним з головних завдань діагностування є пошук несправностей і причин їх виникнення.

Залежно від функціональних або конструктивних особливостей електроустаткування для визначення його дійсного технічного стану застосовується тестове або функціональне діагностування. При тестовому діагностуванні на устаткування подаються тестові дії від засобів діагностування. Склад і послідовність подачі цих дій

обирають виходячи з необхідної міри достовірності, отримуваних результатів і умов ефективності діагностування. Тестове діагностування проводять як у відключеному стані устаткування, так і під час його роботи. Функціональне діагностування здійснюють під час роботи електроустаткування, на яке поступають тільки робочі дії. Функціональне діагностування можна також проводити в режимах імітації функціонування устаткування.

Часто для підвищення ефективності як тестового, так і функціонального діагностування, доводиться пристосовувати електроустаткування до діагностування, роблячи додаткові висновки. На практиці до таких додаткових висновків відносяться зроблені спеціально для цілей діагностування висновки з певних точок електричної схеми устаткування. Крім того, застосовують додаткові спеціально встановлені пристрої (датчики вібрації, лінійного переміщення, температури й ін.).

У зв'язку з тим, що діагностування є новою складовою частиною системи плановопереджувальних ремонтів (ППР) устаткування, при розробці методів і засобів для діагностування потрібно послідовно вирішувати технічні й організаційні питання, що забезпечують не тільки отримання достовірних результатів і прогнозування технічного стану. Це створює можливість високої ефективності застосування діагностування.

Виходячи з вимог до діагностування і досвіду його впровадження, основними етапами розробок по діагностуванню устаткування є: визначення вузлів і деталей, що обмежують ресурс роботи устаткування і що підлягають діагностуванню; вибір параметрів і розробка методів діагностування устаткування; вибір і розробка засобів для діагностування устаткування; розробка технологій діагностування устаткування; пошук несправностей устаткування й ін.

1. 4. Визначення об'єктів діагностики

Правильний вибір елементів (вузлів і деталей) устаткування, що підлягають діагностуванню, є одним з важливих питань розробки загальної системи діагностування. Від нього залежить напрям і зміст подальших робіт за визначенням параметрів, вимірюваних при

діагностуванні, розробці методів і засобів діагностування, розробці технології, і кінець кінцем, економічна ефективність діагностування даного типу обладнання.



Рис. 1. 4. Види діагностики

При створенні методів і засобів діагностування зустрічаються випадки, коли розробка проводиться для машин і апаратів, що випускаються серійно, нового устаткування і що пропрацювало певний час. У першому випадку для отримання початкових даних проводяться випробування дослідної партії нового устаткування.

У другому випадку для визначення вузлів і деталей, що підлягають діагностуванню, зазвичай збирають дані про відмови устаткування в умовах експлуатації.

На підставі аналізу кількості і причин відмов визначається перелік елементів конструкції, які обмежують ресурс або працездатність обладнання.

У зв'язку з тим, що діагностування устаткування, як і будь-якої машини або механізму, доцільно проводити за умови отримання відповідного економічного ефекту або забезпечення безпеки експлуатації, викладена методика визначення номенклатури елементів, що підлягають діагностуванню.

Приведені витрати на експлуатацію елемента будь-якої машини або апарату без застосування діагностування визначаються виразом

$$Ve_i = Vt_i + Vr_i + Vo_i + Zi$$

де Vt_i , Vr_i – приведені витрати відповідно на технічне обслуговування і ремонти (поточний і капітальний) елемента; Vo_i – приведені витрати на усунення відмов елемента; Zi – приведений збиток від відмови елемента.

Збиток унаслідок відмови елементів устаткування, як правило, пов'язаний з простоем робочих машин, механізмів і технологічних ліній або установок. Простій викликає зменшення кількості продукції, що виробляється, її псування й інші негативні наслідки.

Приведені витрати при експлуатації будь-якої машини або апарату

$$B_M = \sum_{i=1}^n V_i. \quad (1.3)$$

де n – число елементів машини або апарату.

На першому етапі приймають, що діагностуванню підлягають елементи, що обмежують ресурс роботи устаткування, тобто у яких в процесі експлуатації виникають відмови, що викликають витрати на їх усунення.

Оцінкою для порівняння наслідків відмов елементів машини або апарату є відношення

$$G = (V_{oi} + Z_i) / B_M. \quad (1.4)$$

В першу чергу подальшому аналізу мають піддаватися елементи, у яких відношення (1.4) має найбільше значення. Розташовуючи обчислені значення G в ряд в порядку убуючої послідовності, записуємо нерівність, що вказує на черговість подальшого аналізу елементів для визначення доцільності їх діагностування:

$$G_1 \geq G_2 \geq G_3 \geq \dots \geq G_n$$

У зв'язку з тим, що діагностування пов'язане з певними витратами, доцільність його проведення для елемента визначають по наявності економічного ефекту. Застосування діагностування приводить до зміни витрат на технічне обслуговування, зменшенню витрат на ремонт і усунення відмов, зазвичай знижує збиток від простоїв.

Приведені витрати при експлуатації елемента із застосуванням діагностування $B_{e,ді}$ записуються виразом

$$B_{e,ді} = B_{т,ді} + B_{р,ді} + B_{o,ді} + Z_{ді} + B_{ді}, \quad (1.5)$$

де $B_{т,ді}$, $B_{р,ді}$ – приведені витрати відповідно на технічне обслуговування і ремонт елемента при застосуванні діагностування; $B_{o,ді}$ – приведені витрати на усунення відмов елемента; $Z_{ді}$ –

приведений збиток від відмов елементу при застосуванні діагностування; $V_{ді}$ – приведені витрати на діагностування елементу.

- Приведені витрати при експлуатації машини або апарату із застосуванням діагностування записуються у вигляді:

$$V_{м.д} = \sum_{i=1}^n V_{е.ді}$$

Економічний ефект при застосуванні діагностування елементу машини або апарату $E_{е.ді}$ визначається з виразу

$$E_{е.ді} = V_{еі} - V_{е.ді}.$$

Зменшення витрат, пов'язаних з експлуатацією елементу машини або апарату, при діагностуванні досягається збільшенням ресурсу і безвідмовності, а також встановленням оптимальної періодичності обслуговування.

Діагностування елементу доцільне, якщо дотримується нерівність $V_{еі} > V_{е.ді}$, тобто коли приведені витрати при експлуатації елементу без застосування діагностування більше приведених витрат при застосуванні діагностування. Інакше діагностування елементу недоцільне.

- Економічний ефект від застосування діагностування машини або апарату визначається як

$$E_{м.д} = \sum_{i=1}^n E_{е.ді},$$

де n_1 – число елементів машини або апарату, діагностування яких забезпечує отримання економічного ефекту.

Відносна ефективність використання діагностування елементів визначається наступним чином

$$G_{д} = E_{е.ді} / E_{м.д}.$$

Обчислені долі ефективності $G_{д}$ діагностування кожного елементу в загальній ефективності діагностування обладнання розташовують в ряд за убиваючими значеннями

$$G_{д1} \geq G_{д2} \geq G_{д3} \dots G_{дn}$$

Отриманий ряд характеризує саме ті елементи, що підлягають діагностуванню, вказує на порівняльну ефективність їх діагностування, а також створює можливість прийняття рішення про

черговість робіт з розробки методів і засобів діагностики елементів визначеного технічного об'єкту .

1. 5. Вибір параметрів і розробка методів діагностування

При розробці методів діагностування технічного обладнання важливим і досить складним завданням є визначення оптимального набору параметрів, що використовуються при діагностуванні і характеризують технічний стан контрольованого об'єкту.

- Параметри, величини які доцільно вимірювати при діагностуванні устаткування, характеризуються номінальними значеннями і полями допусків, залежностями номінальних значень від зовнішнього середовища (наприклад, струмів витоку ізоляції від ступеня її зволоження), закономірностями зміни залежно від часу експлуатації або напрацювання, необхідною точністю вимірювань і ін. У машинах і апаратах значне число параметрів можна зміряти безпосередньо (напругу, частоту і ін.). Для вимірювання решти параметрів застосовують перетворювачі. Для вибору параметрів діагностування, що характеризують технічний стан деталей і вузлів обладнання, їх можна класифікувати таким чином: параметри, виражені електричними величинами такі що дозволяють вимірювати їх значення безпосередньо (напруга і сила змінного або постійного струмів, частота, тривалість і амплітуди імпульсів, індуктивності, ємності, опору і ін.); параметри, виражені електричними величинами такі що вимагають для свого вимірювання додаткового перетворення (великі або малі струми й напруги, модуляція і ін.); параметри, вимірювані непрямим шляхом; параметри, виражені не електричними величинами такі що вимагають для свого вимірювання первинного перетворення (температура переміщення і ін.); параметри, оцінка яких проводиться візуально (наявність слідів перегріву або нагару на контактних поверхнях, наявність раковин на поверхні колектора або контактних кілець і ін.). Класифікація параметрів діагностики представлена на рис. 1. 5.

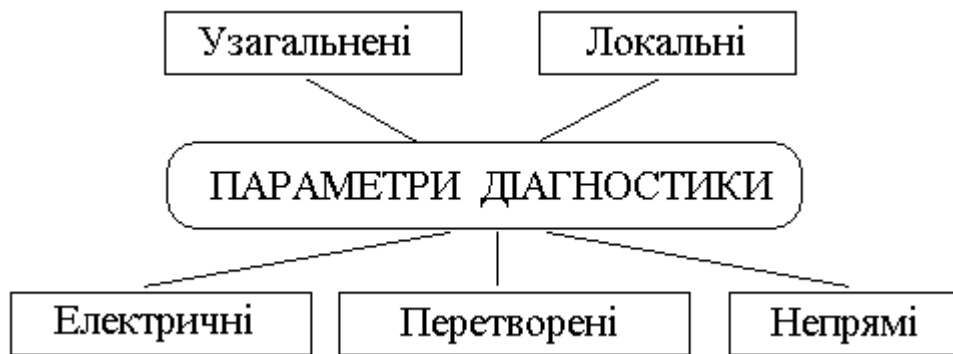


Рис. 1. 5. Параметри діагностики

За інформативністю параметри можливо умовно розділити на дві групи: узагальнені і локальні. Узагальнений параметр несе велику кількість інформації і характеризує стан декількох або одного вузла, декількох деталей, а локальний – тільки однієї деталі або елементу.

Для оцінки технічного стану можливо зміряти досить багато параметрів, проте таке вимірювання вимагає наявності великого числа приладів і великих витрат часу, що може звести ефективність застосування діагностування до мінімуму і навіть привести до збитків. Тому з сукупності параметрів вибирають оптимальне їх число і поєднання, що забезпечує необхідну достовірність результатів діагнозу при мінімальних витратах. Часто доводиться виключати з діагностичного ряду параметри, що несуть великий об'єм інформації, але мають високу вартість вимірювання. Отже, вибір діагностичних параметрів для даного технічного об'єкту часто зводять до рішення задачі оптимізації набору цих параметрів. У табл. 1. 1 наводяться основні параметри, що характеризують технічний стан об'єкту. Форма таблиці має наступний вигляд.

Таблиця 1. 1 Основні параметри характеризуючі технічний стан.

Діагностований елемент	Параметр	Вид несправності	Засоби контролю

Набір діагностичних параметрів багато в чому індивідуальний і визначається специфікою контролюваного устаткування.

При виборі діагностичних параметрів керуються наступними основними положеннями. Кожному значенню параметра вузла або

деталі устаткування (наприклад, провалу контактів магнітних пускачів), що перевіряється, має відповідати тільки одне значення діагностичного параметра (вимога однозначності). Діагностичний параметр має відносно легко вимірюватися по можливості простими засобами (вимога доступності і зручності вимірювання). Діагностичному параметру бажано мати можливо більший діапазон вимірювання при зміні контрольованого параметра вузла або деталі в процесі роботи устаткування, що дозволяє підвищити точність вимірювання й достовірність діагностування (вимога широти області зміни).

При виборі номенклатури діагностичних параметрів зазвичай проводять аналіз всіх параметрів, що характеризують технічний стан об'єкту діагностики, виражених фізичними величинами, які можливо зміряти. В першу чергу аналізують параметри, які можна зміряти безпосередньо, не вдаючись до перетворень. Особлива увага звертається на відсутність зворотного зв'язку між параметрами і станом контрольованого вузла або деталі. Якщо параметр впливає на процес роботи або технічний стан вузла, що діагностується, або деталі, то він не може служити діагностичним і з подальшого розгляду виключається.

При аналізі діагностичних параметрів перевага надається параметрам, що мають прямий функціональний зв'язок з технічним станом діагностованого вузла або деталі й мають велику інформативність. Окрім потенціалу інформативності для кожного діагностичного параметра визначають прилади, якими його можна зміряти, а також трудомісткість і вартість вимірювання. У загальному випадку застосування параметра як діагностичний доцільно, якщо дотримується умова, при якій витрати $Z_{ді}$ на визначення технічного стані елемента за допомогою діагностичного параметра менше або відповідає витратам $Z_{пі}$ на визначення технічного стану того ж елемента шляхом безпосереднього вимірювання параметрів після розбирання механізму, тобто коли

$$Z_{ді} < Z_{пі} , \quad (1. 6)$$

$$\text{де } Z_{пі} = Z_{в} + qZ_{р} , \quad (1. 7)$$

де Z_v – витрати на вимірювання параметрів елемента після розбирання машини або апарату; Z_p – витрати на розбірно-складальні роботи для визначення технічного стану машини або апарату; q – вірогідність відмови машини або апарату в наслідок відмови даного елемента.

У рівнянні (1. 7) другий член правої частини виражає частину витрат на розбирання і збирання, що припадають на визначення технічного стану даного елемента.

При виборі діагностичних параметрів в першу чергу відкидаються параметри, що не задовольняють умові (1. 6), а також малоефективні, що мають істотні витрати вимірювання. При визначенні вартості діагностування враховуються витрати часу на діагностування, вимоги до діагностів, амортизаційні відрахування на прилади, витрати на електроенергію й інші витрати.

Після визначення діагностичних параметрів наступним етапом робіт є вибір і розробка методів і засобів для діагностування, після чого можливо уточнити, вартість діагностування й остаточно встановити номенклатуру діагностичних параметрів. У зв'язку з тим, що для визначення технічного стану деталей і вузлів устаткування розроблено і використовується на практиці певне число методів, спочатку з них вибирають методи, які відповідають вимогам діагностування устаткування без розбирання і забезпечують вимірювання діагностичних параметрів.

Оскільки відомими методами зазвичай неможливо вимірювати всі необхідні діагностичні параметри, часто виникає необхідність розробки нових методів, викликана наступними причинами: конструктивною непристосованістю устаткування до діагностування; неможливістю в разі його конструктивних особливостей використання окремих параметрів, що несуть великий об'єм інформації і забезпечують високу достовірність результатів, як діагностичних; складністю застосування для діагностування деяких методів, розроблених для визначення технічного стану деталей і вузлів устаткування після розбирання; доцільністю використання при діагностуванні певного поєднання двох і більше параметрів.

Діагностування застосовується в практиці експлуатації порівняно недавно, тому раніше при розробці конструкцій устаткування не

враховувалися вимоги його пристосованості до діагностування. Досить часто, при розробці нового устаткування прагнення герметизувати основні вузли обладнання, випускає з уваги вимоги забезпечення до нього достатнього доступу під час експлуатації. Це у великій мірі ускладнює, а в деяких випадках робить неможливим застосування при діагностуванні ряду параметрів досить великої інформативності, що забезпечують високу точність результатів при незначних витратах. Наприклад, конструкцією устаткування не передбачаються місця установки датчиків для вимірювання таких узагальнених діагностичних параметрів, як вібрації, не передбачені вбудовані датчики контролю технічного стану основних вузлів. Установка вбудованих датчиків для контролю технічного стану особливо себе виправдовує у відповідальному устаткуванні, доступ до якого неможливий або утруднений. Велику інформативність про технічний стан вузла підшипників електричних машин, що обертаються, має величина зазору між тілами кочення і біговими доріжками, проте цей параметр досить легко можливо зміряти тільки при розібраній машині.

Досить часто ефективні методи визначення технічного стану деталей і вузлів розібраного устаткування неможливо застосувати для нерозбірного діагностування. Тому для спрощення і зниження витрат на діагностування у ряді випадків розробляються нові методи або пристосовуються відомі ефективні методи до умов безрозбірного діагностування. Прикладом може служити застосування методу визначення технічного стану міжвиткової ізоляції обмотки статора електричних машин, придатного для застосування при вийнятому з розточування статора роторі, для діагностування в зібраному стані. Однак з цією метою потрібно додатково розробити спосіб, що дозволяє виключити отримання при діагностуванні недостовірних результатів, обумовлених магнітною асиметрією, що вноситься обмоткою ротора в магнітні ланцюги фаз електричної машини.

Крім того, досить часто для визначення залишкового ресурсу елементів і вузлів устаткування потрібно розробляти методи діагностування, засновані на застосуванні декількох характеристик одного діагностичного параметра або певного поєднання декількох параметрів, що надає великий об'єм інформації, одночасно знижуючи

трудомісткість і спрощуючи обробку даних діагностування. Наприклад, при діагностуванні корпусної і міжфазної ізоляції визначають чотири характеристики діагностичного параметра струму витоків при додатку напруги постійного струму. З цією метою при вимірюванні струмів витоків фіксують коливання або кидки струму (що характеризують наявність тріщин, шпилькових отворів і порожнеч в ізоляції), абсолютне значення струму витоків (характеризує наявність пошкоджень, забруднення або зволоження ізоляції), відносний приріст струмів витоків при збільшенні напруги на певне значення (дозволяє як допоміжний критерій розпізнати причину великих струмів витоків – наявність тріщин, пошкоджень або забруднення, зволоження ізоляції), а також несиметрію струмів витоків обмоток фаз (вказує на наявність місцевих дефектів в ізоляції фази).

Виходячи з викладеного, загальні вимоги до розробки або вибору методів діагностування наступні: вони мають бути простими і не вимагати для реалізації застосування або розробки складних і дорогих діагностичних засобів; повинні забезпечувати необхідну достовірність результатів діагностування; при проведенні вимірювань не вимагати режимів роботи устаткування, які важко здійснити на практиці; в порівнянні з іншими методами і способами забезпечувати скорочення часу і витрат засобів на діагностування.

При розробці методів в першу чергу прагнуть до спрощення процесу вимірювання і підвищення ефективності діагностування. Для цього іноді можливо використовувати деталі і вузли устаткування як датчики або засоби реєстрації переміщення одних деталей щодо інших. Наприклад, обмотку котушки магнітного пускача можливо використовувати для вимірювання переміщення контактів при діагностуванні контактної системи, а обмотки і магнітопровід електродвигуна – в якості електромагніту, що переміщає ротор в радіальних напрямках паралельно розточуванню статора, при вимірюванні зазорів в підшипниках.

Розробка методів зазвичай проводиться на підставі статистичних даних про режими роботи, функціональних залежностей величин параметрів від часу роботи устаткування, а також даних теоретичних і експериментальних досліджень.

1. 6. Вибір і розробка засобів діагностування устаткування

Виходячи із завдань і принципів організації робіт, при діагностуванні устаткування застосовуються прилади і пристрої. Класифікація засобів діагностування електроустаткування, показана на рис. 1. 6. Діагностування і прогнозування устаткування зазвичай проводиться за допомогою переносних приладів ручного управління.

Достатньо широке застосування отримують також пристрої діагностування електроустаткування, які можуть здійснювати постійний або періодичний автоматичний контроль за технічним станом і сигналізувати про настання передаварійного стану. Такі пристрої не дозволяють автоматиці або персоналу включати і відключати устаткування з мережі при загрозі виникнення несправностей. Перспективи широкого застосування пристроїв для діагностування пояснюються тим, що електроустаткуванням, на відміну від інших машин і механізмів, порівняно легко можна управляти завдяки наявності апаратури управління і схем автоматизації його роботи. Природно, що автоматичні діагностичні пристрої в першу чергу доцільно встановлювати для контролю за устаткуванням, відмови якого приводять до великого збитку, а також за устаткуванням, доступ до якого утруднений або неможливий.

Слід зазначити, що при цьому один пристрій може контролювати групу устаткування або його параметрів, наприклад, температурні характеристики.

На подальших етапах розробки засобів і впровадження діагностування, як складового елементу нової форми системи ППР, передбачається природний процес переходу до створення діагностичних систем, в яких більшість операцій проводяться напівавтоматично й автоматично. Як правило, діагностичною системою автоматично видається результат діагнозу і прогнозу.

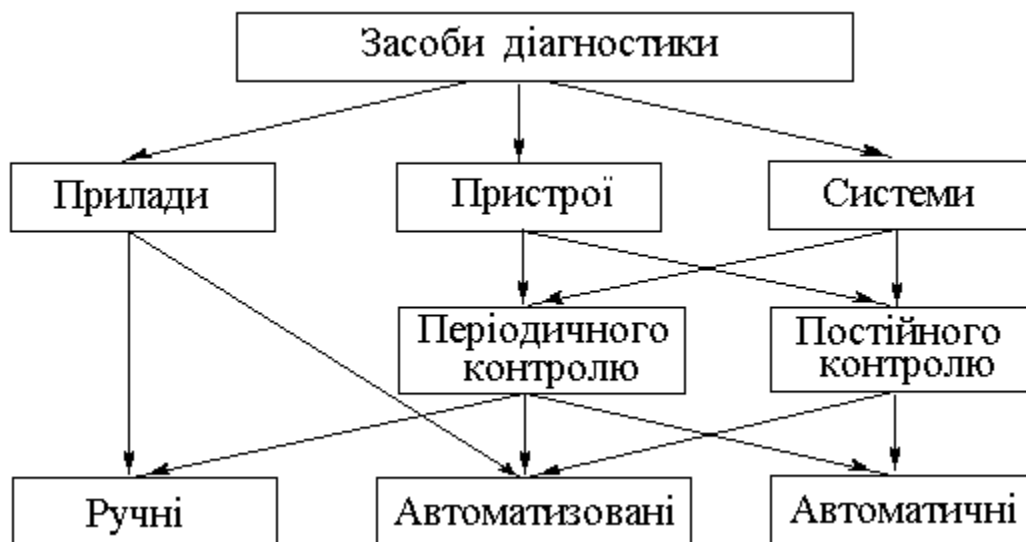


Рис. 1. 6. Класифікація засобів діагностування обладнання

Засоби для діагностування за принципом дії на об'єкт діагностування розподіляються на дві групи: тестову і функціональну. За допомогою засобів тестової групи при діагностуванні в контрольоване устаткування посилаються сигнали, що викликають тестові дії, при цьому вимірюють необхідні параметри, що характеризують реакцію обладнання на сигнали, і по цих параметрах оцінюється його технічний стан. Засобами діагностування функціональної групи визначається поточний технічний стан устаткування під час роботи, причому ніяких зовнішніх дій, що відбиваються на його функціонуванні, не проводиться.

• При розробці засобів проводиться класифікація діагностичних параметрів, за допомогою яких визначається технічний стан електроустаткування, а також встановлюються межі зміни цих параметрів.

У випадку, якщо величину діагностичного параметра не можливо визначити прямим вимірюванням, проводять вибір або розробку перетворювачів та датчиків. Залежно від характеру діагностичних параметрів визначається, до якої групи відноситиметься засіб діагностування (тестової або функціональної).

При розробці діагностичних засобів прагнуть створити конструкції й схеми, що забезпечують мінімальну трудомісткість і вартість діагностування, а також задану точність вимірювання. Велике значення при розробці засобів для діагностування

устаткування має форма представлення результатів, яка має бути зручною для аналізу й прогнозування.

На першому етапі створення засобів діагностування зазвичай переважає зчитування показань приладів, цифрових індикаторів, світлова і звукова сигналізація. При цьому зчитування даних приладів і цифрових індикаторів в більшості випадків властиве діагностуванню за допомогою переносних засобів, а світлова або звукова індикування – напівавтоматичним і автоматичним пристроям контролю технічного стану, що встановлюються біля контрольованого устаткування. Надалі по мірі вдосконалення засобів діагностування, спостерігається перехід до електронних форм представлення результатів діагностування у вигляді аналогових або цифрових записів. При розробці діагностичних засобів одним з важливих ключових показників є врахування області застосування, тобто відповідність приладу, що розробляється, пристрою або системи основним положенням організації діагностування устаткування.

Досвід розробки і впровадження діагностування в практику експлуатації устаткування показує, що засоби діагностування доцільно розділити за наступним принципом:

1. Прості засоби діагностування за обмеженим числом узагальнених діагностичних параметрів, що дозволяють визначати загальний технічний стан устаткування. Ці засоби призначаються для визначення технічного стану устаткування при технічному обслуговуванні, а також для виявлення простих несправностей. До таких засобів переважно відносяться переносні прилади.

2. Засоби для проведення повного діагностування і прогнозування, що дозволяють визначати технічний стан всіх елементів, що обмежують ресурс роботи або працездатність устаткування. Ці засоби призначені для проведення планового діагностування й пошуку несправностей устаткування.

3. Засоби для проведення доремонтного й післяремонтного діагностування, призначені для застосування в спеціалізованих ремонтних підприємствах або ділянках з метою визначення номенклатури вузлів і деталей, що підлягають ремонту і якості ремонту устаткування по параметрам, що характеризують післяремонтний ресурс.

Залежно від призначення засоби діагностування можуть розроблятися переносними, пересувними і стаціонарними. Важливим показником таких засобів діагностування є ступінь їх автоматизації. Умовно засоби діагностування розподіляють на автоматизовані, автоматичні і ручного управління.

На перших етапах розробки проводять розрахунки по оптимальному вибору діагностичних засобів, тобто за визначенням типу, параметрів, характеру вирішуваних задач і ін. При цьому враховуються вимоги, що пред'являються до засобів діагностування організацією експлуатації устаткування, а також достовірність результатів діагностування. Однією з основних вимог є призначення засобу, що розробляється: для визначення працездатності; визначення працездатності і ресурсу; визначення працездатності, ресурсу і пошуку несправностей; визначення ресурсу; пошуку несправностей і ін.

Оптимальний вибір діагностичних засобів має забезпечувати мінімальну вартість перевірки елементів, мінімум витрат від погрішності перевірки елементів, а також максимальну економічну ефективність застосування засобів. Економічну ефективність застосування засобів діагностування розраховують відповідно до методики визначення ефективності використання нової техніки.

Слід зазначити, що економічна ефективність застосування засобу, що розробляється, тим вище, чим більшу кількість устаткування можливо діагностувати з його допомогою, тобто чим вище його продуктивність. Після отримання позитивного результату при перевірочному розрахунку економічної ефективності та доцільності створення конкретного засобу діагностування, складають принципові кінематичні і електричні схеми, а також розраховують параметри деталей і вузлів. Потім створюється макетний або експериментальний зразок, який проходить спочатку лабораторні, а потім виробничі випробування. При випробуваннях встановлюють відповідність засобу, що розробляється, своєму цільовому призначенню і його працездатність; визначають погрішності і трудомісткості вимірювання діагностичних параметрів. За наслідками випробувань вносять необхідні корективи до схеми і конструкції засобу і розробляють дослідний зразок.

2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ДІАГНОСТУВАННЯ УСТАТКУВАННЯ

Як вказано вище, при діагностуванні устаткування в основному вирішуються три завдання: визначення працездатності, встановлення залишкового ресурсу і пошук причин відмов. Відповідно до цих завдань розробляють і технології діагностування, які повинні забезпечувати рішення поставлених задач з мінімальними витратами засобів при заданому рівні достовірності результатів.

2. 1. Характеристика технології діагностики

Зазвичай технологія діагностування розробляється у вигляді набору технологічних карт, в яких приведено найменування і зміст операцій, порядок їх проведення й технічні вимоги, вказано, якими діагностичними засобами необхідно проводити вимірювання, а також приведені номінальні, граничні і допустимі значення діагностичних параметрів. Технологічні карти взаємно ув'язуються так, щоб забезпечувалася безперервність робіт діагностування.

Основна складність, що зустрічається при розробці технології діагностування, полягає у встановленні послідовності діагностування вузлів і деталей устаткування а також послідовності операцій при визначенні причин відмов устаткування. Найповнішу інформацію про технічний стан можливо отримати при діагностуванні всіх елементів обладнання. Проте витрати праці і вартість діагностування при цьому будуть надмірно великими, оскільки багато елементів устаткування можуть опинитися у хорошому стані й не призведуть до відмов до наступного діагностування. Якщо при діагностуванні вимірюється обмежене число параметрів, то в обладнанні виникатимуть відмови, що може призвести до великих витрат на усунення відмов і до значного збитку від простоїв.

Технологія діагностування має забезпечувати мінімальні сумарні приведені витрати при експлуатації деталей і вузлів (елементів) устаткування, включаючи і витрати на діагностування.

Таким чином, оптимальну структуру діагностування визначають за критерієм мінімуму сумарних приведених витрат $B_{м.д}$ при експлуатації електроустаткування по формулі

$$\text{Вм. д} = \min \sum_{i=1}^n \text{Вe.ді}$$

де Вe.ді – приведені витрати при експлуатації елементів устаткування із застосуванням діагностування; n – число елементів устаткування.

При цьому слід враховувати, що витрати на діагностування будуть оптимальними, коли об'єм і періодичність діагностування відповідають технічному стану обладнання. Слід також зважати на те, що поточне діагностування у вигляді системи моніторингу, окрім економічних чинників, має суттєві переваги в оперативності й часі.

При розробці технології враховується її цільове призначення. При проведенні технічного обслуговування в основному визначається працездатність і правильність функціонування устаткування. В цьому випадку об'єм і глибину діагностування встановлюють таким чином. Серед діагностичних параметрів обирають такі параметри, що несуть інформацію про загальний технічний стан декількох або окремого елемента контрольованого об'єкту, тобто так звані узагальнені діагностичні параметри.

Діагностування проводять, починаючи з вимірювання цих узагальнених параметрів, а потім вимірюють параметри, що характеризують стан елементів, який не можливо визначити за допомогою узагальнених параметрів. Якщо результати вимірювання узагальнених параметрів свідчать про задовільний стан контрольованих елементів або вузлів, подальше поглиблене діагностування устаткування не проводиться.

До таких узагальнених діагностичних параметрів для електричних машин можна віднести температуру, вібрацію й структуру шуму при роботі, споживані з мережі струми й ін. Якщо дані вимірювань узагальнених параметрів указують на порушення працездатності або на відхилення в правильності функціонування, то додатково проводять вимірювання певного числа індивідуальних діагностичних параметрів для уточнення діагнозу, пошуку несправності або її причини.

Основним завданням планового діагностування, окрім перевірки працездатності, є встановлення залишкового ресурсу вузлів і деталей устаткування. В цьому випадку, окрім вимірювання обов'язкових

параметрів для визначення працездатності, необхідно зміряти певне число діагностичних параметрів, по яких проводять прогнозування залишкового ресурсу роботи обладнання.

У зв'язку з викладеним, одним з важливих етапів робіт при розробці технології діагностування є складання мінімального діагностичного тесту, тобто визначення мінімального числа перевірок, при яких забезпечується необхідна достовірність визначення, прогнозування технічного стану й помітність станів контрольованого об'єкту.

Мінімальний діагностичний тест складають після побудови діагностичної матриці у вигляді таблиці функцій несправностей. При складанні матриці у її верхній частині (стовпцях) розташовують найменування вузлів і елементів устаткування, що підлягають діагностуванню, а в рядках – діагностичні параметри, вибрані з множини параметрів, що характеризують технічний стан даного виду устаткування. Наявність зв'язку між діагностичним параметром і технічним станом елемента або вузла, що діагностується, позначають цифрою «1», а відсутність зв'язку – «0». Зазвичай для зручності роботи з діагностичною матрицею нулі опускають.

Мінімальне число перевірок встановлюють, вибираючи мінімальну множину рядків матриці, так, щоб кожен стовець мав позначення «1» не менше, чим в одному з рядків матриці. Вибір якнайкращої множини рядків проводять по критерію мінімальної вартості діагностування або питомої вартості діагностування на одиницю напрацювання устаткування. При цьому заздалегідь враховують оптимальну послідовність діагностування елементів або вузлів. Слід зазначити, що мінімальний діагностичний тест встановлює мінімальне число перевірок, які мають обов'язково виконуватися при діагностуванні елемента, вузла або машини й механізму в цілому. Для складних механізмів мінімальні діагностичні тести с початку визначають окремо для вузлів, а потім в цілому. Для порівняно простого устаткування мінімальні діагностичні тести визначають відразу для машини або механізму в цілому.

У матриці для складних машин або механізмів у верхній частині розташовують складові їх вузлів, а в рядках – діагностичні параметри мінімальних діагностичних тестів цих вузлів. На підставі аналізу

матриці об'єкту встановлюють діагностичні параметри, що входять в мінімальний діагностичний тест. У зв'язку з тим, що трудомісткість і вартість діагностування значною мірою залежать не тільки від числа діагностичних операцій, але і від послідовності їх виконання, при розробці технології діагностування визначається послідовність виконання контрольних операцій, що забезпечує мінімальну трудомісткість діагностування обладнання.

Якщо при діагностуванні електричної машини необхідно зміряти n діагностичних параметрів, то для їх виконання можливо скласти $n!$ послідовностей виконання. Так, за наявності тільки семи незалежних діагностичних параметрів існує 5040 поєднань послідовного їх вимірювання, а при 11 параметрах – 39916800. Так за наявності п'яти і більш діагностичних параметрів встановити простим перебором варіантів, при якій послідовності перевірок трудомісткість діагностування мінімальна, практично неможливо. Тому при встановленні послідовності діагностування спочатку визначають загальні вимоги до проведення діагностування, наприклад, початковий стан, режим роботи об'єкту (машина має працювати або бути відключена від мережі, бути холодною або прогрітою й т. д.). Потім складають матрицю режимів діагностування, у верхній частині якої у стовпцях поміщають всі діагностичні параметри згідно мініальному тесту діагностування, а в рядках – режими виконання або окремі вимоги, що пред'являються до виконання операцій діагностування. Аналізуючи дані матриці, знаходять зв'язки між діагностичними параметрами й режимами, при яких вони вимірюються, тобто вимірювання діагностичних параметрів класифікуються по групах. При цьому вимірювання при діагностуванні зазвичай проводять по групах параметрів при заданому початковому стані або режимі роботи електричної машини або механізму.

Для оптимізації алгоритму діагностування на наступному етапі встановлюють послідовність виконання робіт по групах параметрів. Як правило, ця послідовність також залежить від теплового стану обладнання під час діагностування. Спочатку вимірюють групу параметрів, які необхідно провести у відключеному і практично холодному стані машини або апарату, потім групу, вимірювану під

час пуску або прогріву машини, а після неї групу, що вимагає номінального нагріву або номінального режиму роботи і т. д.

Таблиця 2. 1. Група параметрів діагностики

	Елемент 1	Елемент 1	Елемент 3
Параметр 1			1
Параметр 2*	1	1	1
Параметр 3	1		

* Мінімальний діагностичний тест.

- Для подальшого скорочення трудомісткості вимірювань параметри в групах ділять на підгрупи, об'єднані загальними характеристиками або вимірювані одним приладом, наприклад, вимірювання струмів витoku й перевірка рівня електричної міцності міжвиткової ізоляції.

При визначенні залишкового ресурсу скорочення трудомісткості і вартості діагностування зазвичай досягається встановленням послідовності проведення вимірювань, що забезпечує в першу чергу виявлення несправностей, при яких дана машина або механізм підлягають поточному або капітальному ремонту. У таких випадках після вимірювання параметра, що вказав на необхідність ремонту устаткування, подальше діагностування припиняють як таке, що не має сенсу, оскільки при ремонті устаткування розбирається і визначається технічний стан деталей і вузлів.

2. 2. Визначення несправностей електроустаткування

Швидкий пошук несправностей дозволяє встановити причини відмов і відновити працездатність устаткування з мінімальними витратами. Пошук несправностей порівняно простого за конструкцією устаткування не викликає особливих труднощів, а для виявлення несправностей складного устаткування й складних схем управління потрібно скласти відповідні алгоритми пошуку несправностей, що дозволяють визначити найбільш раціональну послідовність виконання

операцій. При цьому мають забезпечуватися мінімальні витрати часу і засобів на проведення пошуку

У технічній літературі досить широко висвітлені різні способи і методичні підходи до складання алгоритмів пошуку несправностей машин і механізмів, радіоелектронної й іншої апаратури тощо.

До найбільш поширених методів пошуку несправностей відносяться такі способи: послідовного функціонального аналізу, половинного розбиття, імовірнісний-часовий, гілок і меж та їх численні модифікації.

Метод послідовного функціонального аналізу заснований на визначенні основних функцій контрольованого об'єкту. Перевіряючи параметри цих функцій, відзначаються відхилення і, таким чином, встановлюють елемент, що відмовив. Спосіб достатньо простий, відрізняється наочністю результатів і не вимагає докладної початкової інформації, основним його недоліком є те, що послідовність пошуку несправності не оптимальна.

Метод половинного розбиття застосовний для об'єктів контролю з послідовно сполученими елементами. Він заснований на визначенні параметра, що характеризує технічний стан елемента, який незалежно від результатів контролю, позитивних або негативних, розділяє об'єкт контролю на дві частини, вірогідність станів яких однакова. Потім вибирають наступний елемент, що розділяє несправну половину об'єкту також на частини з однаковою вірогідністю станів. Операції проводяться до тих пір, поки не буде виявлений несправний елемент.

Для об'єктів, в яких функціональні елементи сполучені довільно, при визначенні послідовності перевірок застосовують імовірнісний – часовий спосіб, що використовує показники, характеризуючі надійність елементів. Початковою інформацією згідно імовірнісно – часового способу пошуку несправностей є вірогідність відмови (безвідмовної роботи) елементів, час, необхідний на перевірку елемента, а також відношення часу перевірки елемента до вірогідності його відмови або відношення вірогідності безвідмовної роботи до часу перевірки. Алгоритм пошуку складається з урахуванням функціональної моделі й матриці несправностей об'єкту контролю.

Функціональну модель будують за структурною або електричною схемою устаткування, причому для об'єктів контролю тільки з послідовним або тільки з паралельним з'єднанням елементів функціональна модель і структурна схема співпадають. У функціональній моделі, призначеній для пошуку несправностей, первинні функціональні елементи визначають з урахуванням необхідної точності контролю.

- При побудові функціональної моделі приймаються наступні вимоги: для кожного функціонального елемента відомі допустимі значення вхідних і вихідних сигналів, їх функціональні залежності і спосіб вимірювання; несправним вважається функціональний елемент, у якого при номінальних вхідних сигналах на виході з'являється сигнал, що виходить за поле допуску; якщо на вхід функціонального елемента подати хоч би один сигнал, що вийшов за поле допуску, вихідний сигнал відрізнятиметься від номінального; зовнішні вхідні сигнали мають тільки номінальні значення. Зазвичай функціональна модель зображається графічною схемою, що складається з прямокутників або кіл і стрілок між ними. Прямокутниками позначають функціональні елементи, вхідними стрілками позначають вхідні сигнали, а тими що з них виходять – вихідні. Вхідних стрілок в один функціональний елемент може бути декілько, а вихідних – тільки одна.

Матриця несправностей будується наступним чином. У верхній частині матриці приводять перелік всіх основних ознак несправностей A_n , а в рядках – перелік причин відмов d_i або елементів, що відмовили, зміна стану яких може викликати зазначені ознаки.

Форма матриці несправностей приведена в табл. 2. 2. Цифрою «1» в матриці позначають наявність зв'язку між ознаками несправностей (станом об'єкту) і елементами об'єкту або причинами відмови.

Таблиця 2. 2. Матриця несправностей

Причини відмови	Ознаки					
	A1	A2	A3	A4	...	An
d ₁		1	1			
d ₂	1			1		
d ₃			1			
...						
d _n	1				1	

Побудова такої матриці дозволяє мати наочну інформацію про можливі стани об'єкту і класифікувати їх. У матриці кожній ознаці несправності відповідає своя множина причин відмови. Значення вірогідності відмов або безвідмовної роботи встановлюються статистичним шляхом і використовуються для визначення послідовності виконання перевірок. Послідовність перевірки елементів відповідно до імовірісно-часового методу пошуку несправностей встановлюється за збільшенням відношення

$$\frac{t_1}{Q_1} < \frac{t_2}{Q_2} < \dots < \frac{t_n}{Q_n}$$

або за зменшенням наступного співвідношення

$$\frac{P_1}{t_1} > \frac{P_2}{t_2} > \dots > \frac{P_m}{t_m}$$

де t_1, t_2, \dots, t_n – час, що витрачається на перевірку i -го елемента; Q_1, Q_2, \dots, Q_n – вірогідність відмови i -го елемента; P_1, P_2, \dots, P_n – вірогідність безвідмовної роботи i -го елемента. Пошук несправності починається з перевірки елемента, що має найменше відношення часу перевірки до вірогідності відмови або має найбільше відношення вірогідності безвідмовної роботи до часу перевірки. Побудована таким чином програма забезпечує мінімальні витрати часу на пошук несправності.

Слід зазначити, що одним з основних критеріїв для визначення оптимальної послідовності пошуку несправностей є мінімум середніх витрат на проведення пошуку, які можна виразити формулою

$$V_{\text{пс}} = \sum_{i=1}^n C_i g_i,$$

де g_i – вірогідність того, що відмова об'єкту обумовлена відмовою саме i -го елемента; C_i – загальна вартість перевірок, необхідних для виявлення i -го відмовившого елемента при даній послідовності перевірок.

Відомий також критерій мінімакса, згідно якому якнайкращою послідовністю є послідовність перевірок, при якій максимальна вартість виявлення елемента, що відмовив, є найменшою в порівнянні з іншими послідовностями.

У зв'язку з наведеним, разом з використанням показників надійності при визначенні послідовності пошуку несправностей вводять також як показник – вартість перевірки. Тоді доцільна послідовність перевірок для виявлення несправностей встановлюється для випадку наявності одного елемента, що відмовив, в порядку зменшення відношення

$$\frac{Q_1}{B_1} > \frac{Q_2}{B_2} > \dots > \frac{Q_m}{B_m},$$

де Q_1, Q_2, \dots, Q_n – вірогідність відмови i -го елемента, що перевіряється; B_1, B_2, \dots, B_n – вартість перевірки i -го елемента. При вірогідності одночасної наявності декількох елементів, що відмовили, послідовність пошуку несправності встановлюється в порядку зменшення наступного відношення

$$\frac{Q_1}{B_1(1-Q_1)} > \frac{Q_2}{B_2(1-Q_2)} > \dots > \frac{Q_m}{B_m(1-Q_m)}$$

Слід зазначити, що введення показника вартості в порівнянні із застосуванням показника «час перевірки елемента» дозволяє точніше визначати послідовність пошуку несправностей, оскільки вартість узагальнено враховує не тільки час, що витрачається на пошук, але і вартість вживаного устаткування, кваліфікацію діагноста й інші показники.

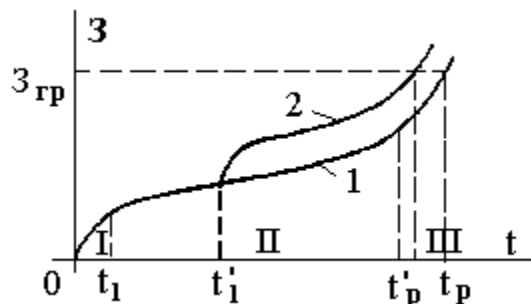
2. 3. Експлуатаційна надійність елементів устаткування

Надійність устаткування переважно визначається ресурсом його функціональних елементів. Істотну роль при цьому відіграє знання основних складових працездатності. Процеси зносу безпосередньо визначають ступінь працездатності устаткування. Тому важливо визначити такі закономірності.

Закономірності процесів зносу устаткування

Не зважаючи на різноманітність призначення, конструкційних форм, матеріалів, навантажень, умов експлуатації й інших чинників, процеси зносу деталей, вузлів машин і механізмів, мають однозначні загальні закономірності.

Зазвичай процес зносу будь-яких деталей умовно поділяють на три основних періоди, рис. 2. 1. У I періоді, що відповідає приробленню елементів, інтенсивність зношування досить висока, оскільки відбувається стирання нерівностей обробки й «підгін» сполучення пов'язаних поверхонь деталей. У II періоді нормального зношування відбувається рівномірний з порівняно малою сталою



швидкістю знос деталей.

Рис. 2. 1. Класична крива зносу: I – період прироблення; II – період нормального зношування; III – період інтенсивного зношування.

Звичайно це найтриваліший період експлуатації деталі, вузла або механізму. Наступним є досить короткий період інтенсивного зношування, що характеризується різким збільшенням швидкості зносу даної деталі або вузла і пов'язаних з ними інших деталей і вузлів, за рахунок збільшення зазорів і інших причин. У III періоді

найбільш вірогідний вихід деталі з ладу або вона може послужити причиною виходу з ладу іншої, зв'язаної з нею деталі або вузла. В деяких випадках такий знос деталі і вузла не створює аварійну ситуацію, тобто не приводить до відмов, але робить роботу машини або механізму економічно не вигідною.

*Одним з основних заходів визначення справності деталі або вузла, а саме здатності виконувати задані функції, є встановлення граничних значень зносу або інших параметрів, що характеризують їх працездатність. Якщо знос і інші параметри ще не вийшли за свої граничні значення, вважається, що деталь або вузол працюють задовільно. При виході зносу або параметрів за граничні значення деталь або вузол вважаються такими, що відмовили. На рис. 2. 1 граничне значення зносу позначене на вісі ординат $Z_{гр}$.

Число відмов будь-якого технічного пристрою за певний період – інтенсивність відмов в одиницю часу, є основною кількісною характеристикою його надійності.

Відмови такого устаткування, як машини й механізми, розподіляються на конструктивні, технологічні, експлуатаційні й знос.

Конструктивні відмови – це результат помилок і прорахунків при розробці конструкцій машин і апаратів. Ці відмови найчастіше виникають в I-й період експлуатації устаткування. До особливостей конструктивних відмов можна віднести і те, що вони виникають майже у всіх машин або механізмів певного типу. Прикладом конструктивних відмов може служити вихід з ладу підшипників. Одночасний знос посадочних місць під підшипники, доріжок і тіл кочення підшипників призводить до збільшення асиметрії положення ротора щодо розточування статора і в результаті – до зачіпання ротора за статор.

Технологічні відмови устаткування обумовлені порушенням технологічних процесів виготовлення деталей і вузлів. Технологічні відмови, як правило, теж виникають в I-й період експлуатації устаткування. Прикладом технологічних відмов служать відмови, викликані обривами стрижнів обмоток електричних машин тощо.

Експлуатаційні відмови виникають у випадках порушення правил технічної експлуатації електроустаткування, при невідповідності конструкції устаткування умовам зовнішнього

середовища або режимам роботи. Наприклад, невчасна заміна мастила в підшипниках електричних машин приводить до відмов підшипникових вузлів – до виходу їх з ладу.

Відмови зносу устаткування обумовлені старінням матеріалів ізоляційних конструкцій, виникненням корозії, зносом робочих поверхонь деталей і іншими причинами. Прикладом відмови зносу може служити відмова магнітного пускача в результаті зносу напайок нерухомих або рухомих його контактів.

За даними практики експлуатації термін служби устаткування, як і процес зносу деталей, можна умовно розділити на три періоди. Прикладом правомірності такого розділення служать дані про відмови устаткування.

Першим є період прироблення, який відноситься до початку роботи і в якому спостерігається найбільше число відмов, обумовлених технічними й технологічними дефектами. В результаті вивчення характеру і причин відмов встановлено, що період прироблення в середньому складає приблизно 1000 год. роботи.

Другий період – нормальної експлуатації, характеризується зразковою постійністю інтенсивності відмов в одиницю часу. У цей період основною причиною відмов є випадкові явища: робота на двох фазах за відсутності або неправильно настроєному захисту, технологічні перевантаження, аварії механізму, приводом якого є електродвигун і ін.

Протягом **третього** періоду відмови виникають унаслідок зносу і старіння вузлів і деталей електричних машин, особливо ізоляції обмоток тощо.

Слід окремо зазначити шкідливий вплив розбирань устаткування на процеси зносу деталей і вузлів. Як і для будь-якої машини або механізму, для електричних машин і апаратів передчасне розбирання негативно впливає на подальшу працездатність. Особливо шкідливі розбирання, при яких порушується взаємне розташування зв'язаних деталей. Після розбирання і подальшої збірки, як би ретельно вони не були проведені, внаслідок зміни затягування з'єднань, деформації деталей, зміни взаємного розташування знов відбувається прироблення зв'язаних деталей, тобто вимушено виникає період підвищеної інтенсивності зносу.

- На рис. 2. 1 крива 1 характеризує знос деталі для випадку, коли за період роботи до вичерпання свого ресурсу у момент часу t_r , тобто до досягнення граничного значення зносу Z_{gr} , деталь працювала в сполученні, яке не розбиралося. Якщо через певний час після початку експлуатації, наприклад у момент часу t'_1 , сполучення було розібране, то залежність зносу цієї деталі від напрацювання, починаючи з моменту часу t_1 , відобразатиме крива 2, оскільки в точці t'_1 знов почнеться період прироблення деталі після збірки сполучення. З рисунка також видно, що знос деталі після розбирання і збірки сполучення досягає свого граничного значення Z_{gr} у момент часу t'_r , тобто робочий ресурс деталі фактично зменшиться.

2. 4. Порушення ізоляції обмоток устаткування

Обмотки є найбільш важливою і складною за умовами роботи частиною електричних машин і апаратів. Вихід обмоток з ладу в більшості випадків обумовлений переважно пошкодженнями їх ізоляції. Визначенню причин виходу з ладу обмоток електричних машин присвячено багато досліджень. На підставі збору і статистичної обробки даних промислової експлуатації встановлено, що понад 84% всіх відмов відбувається за різних пошкоджень обмоток. Згідно цих даних, 80% відмов обмоток виникають в результаті пошкодження ізоляції. Таким чином, вихід електричного устаткування з ладу, в тому числі й високої напруги, в більшості випадків виникає у зв'язку з пошкодженнями ізоляції.

На обмотки й особливо на їх ізоляцію в процесі експлуатації діють різні фактори: електромагнітні сили, вібрація, температура, навколишнє середовище й інші чинники. Сумісна дія перерахованих чинників призводить до незворотних процесів зміни структури і хімічного складу матеріалу ізоляції, тобто до старіння ізоляції. Крім того, в ізоляції можуть бути приховані дефекти, що виникають як в процесі виготовлення матеріалів, з яких складається ізоляційна конструкція, наприклад, мікроотвори або сторонні вclusions в шарі ізоляційного покриття обмотувальних проводів, так і при виготовленні самої ізоляційної конструкції. Особливо часто при укладанні обмоток ушкоджується саме виткова ізоляція, що значно скорочує термін їх служби. Використання при укладанні обмоток

металевого інструменту часто приводить до продавлювання і прорізання ізоляційного шару. Різкі перегини також сприяють утворенню в ізоляції значної механічної напруги, внаслідок чого виникають тріщини.

Кількість дефектів у витковій ізоляції знижується при зменшенні коефіцієнта заповнення паза. Зменшення коефіцієнта заповнення паза на 2,5% і застосування відповідного інструменту при укладанні обмоток дозволяє суттєво підвищити надійність ізоляції.

Розвиток місцевих дефектів зазвичай приводить до пошкоджень ізоляційних конструкцій в 1-й період роботи після введення електричних машин в експлуатацію. Як правило, такі пошкодження виникають у вигляді часткового та повного пробою міжвиткової ізоляції. На надійність роботи обмоток також негативно впливає розтягування проводів при намотуванні котушкових груп на намотувальних верстатах. Це розтягування може досягати 5—7% довжини дроту.

В процесі роботи на обмотки електричних машин впливають електродинамічні і механічні зусилля, що досягають великих значень при пусках і реверсуванні. Так, пускові струми електродвигунів перевищують номінальні в 5 – 7 разів, у зв'язку з чим на обмотки діють значні електродинамічні сили, значення яких пропорційні квадрату струмів. Кратність струмів КЗ складає 20. Під дією таких зусиль в ізоляції виникають тріщини, а також механічні пошкодження.

Особливо небезпечною для ізоляції обмоток електричних машин є вібрація, що виникає у зв'язку з невірноваженістю частин, що обертаються, вигином валу, при зносі підшипників, при обриві стрижнів, обмоток роторів і з інших причин. Вібрація може також передаватися з боку механізмів, приводом яких вони є. Сили, що викликаються вібрацією, діють впродовж всього періоду роботи електричних машин і призводять до втрати механічної і електричної міцності ізоляції проводів обмоток та компаунду, яким їх просочують. Все це може також привести до пошкодження ізоляції. Вібрація здатна скоротити термін служби ізоляції у декілька разів.

До зносу виткової ізоляції може призводити також тертя між окремими витками, стрижнями й витків об корпусну ізоляцію, що

виникає в електричних машинах за різних коефіцієнтів теплового розширення міді обмоток і активної сталі сердечників. Звичайно таке тертя відбувається при нагріванні електричних машин під час пуску і роботи, а також при охолодженні після її виключення з мережі.

Певний вплив на технічний стан ізоляції електричних машин надає теплове й електричне старіння. Важливими характеристиками ізоляційних конструкцій електричних машин і апаратів є теплостійкість і нагрівостійкість. Теплостійкість характеризує здатність ізоляційних матеріалів зберігати свої властивості при короткочасних нагрівах, а нагрівостійкість – зберігати властивості без істотного погіршення протягом тривалого періоду, якщо температура не перевищує допустимих значень, встановлених для даного класу ізоляції. Нагрівостійкість в основному визначається швидкістю старіння ізоляції.

Найважливішим показником, використовуваним при експлуатації, діагностиці і прогнозуванні працездатності ізоляції є термін її служби. Особлива увага при дослідженнях приділена встановленню залежності терміну служби ізоляції від її робочої температури. В результаті сформульовано «правило восьми градусів». Відповідно до цього правила, підвищення температури на кожні вісім градусів призводить до скорочення терміну служби ізоляції удвічі. Аналітично «правило восьми градусів» записується наступним виразом:

$$T = T_0 \cdot 2^{\frac{v}{\Delta v}} = T_0 e^{-0,0866v}, \quad (2. 1)$$

де v – температура нагріву ізоляції; T – строк служби ізоляції, років; T_0 – строк служби ізоляції при температурі $v = 0$, років; Δv – підвищення температури, при якій строк служби скорочується в два рази.

В подальшому було уточнено, що для ізоляційних матеріалів класу А Δv дорівнює 8°C , для матеріалів класу В – 10°C , а для класу С – 12°C .

В логарифмічній формі рівняння (2. 1) приймає вигляд

$$\ln T = \ln T_0 - kv, \quad (2. 2)$$

де $k = \ln 2 / \Delta v = 0,693 / \Delta v$.

З рівняння (2. 2) видно, що логарифм терміну служби ізоляції має лінійну залежність від температури.

Не дивлячись на те, що вираз (2. 1) імпиричний, встановлений на підставі великого об'єму експериментального матеріалу, його використання при прогнозуванні ресурсу роботи електроустановки у багатьох випадках не забезпечує отримання досить достовірних результатів.

Іншим шляхом визначення терміну служби ізоляції з урахуванням дії температури є використання загальних законів кінетики хімічних реакцій, встановлених Вант Гоффом і Арреніусом.

Вант Гофф і Арреніус встановили наступну залежність швидкості хімічних реакцій від температури:

$$\ln k = B/\theta + A,$$

де k – стала швидкості реакції; θ – абсолютна температура; A , B – постійні коефіцієнти.

Окислювальні процеси, що відбуваються в ізоляції, відносяться до мономолекулярних реакцій, для яких постійну швидкості реакції k можливо визначити з рівняння

$$k = 1/t (C_0/C),$$

де C_0 – початкова концентрація молекул, що не прореагували; C – концентрація молекул, що не прореагували, в даний момент часу; t – час, год.

Коефіцієнти A і B пов'язані з постійними, такими, що характеризують хімічний склад і структуру речовини, що бере участь в реакції, наступними співвідношеннями:

$$B = -E_a/R; A = \ln (P Z),$$

де R – універсальна газова постійна (8,317 Дж/ (град-моль)); E_a – енергія активації (надмірна кількість енергії, що має мати молекула для подолання енергетичного бар'єру й бути здібною до хімічної взаємодії); Z – число зіткнень між реагуючими молекулами в одиницю часу; P – чинник вірогідності належної орієнтації молекул при зіткненні.

Величину P визначають з наступного виразу

$$P = e^{\frac{\Delta S}{R}},$$

де ΔS – ентропія активації (величина, що характеризує частку загального числа зіткнень, при яких молекули орієнтовані належним чином).

На підставі наведених залежностей рівняння Вант Гоффа – Арреніуса записується наступним чином:

$$k = A e^{-\frac{E_a}{R\theta}}.$$

У цьому виразі постійна швидкості реакції є величиною, що визначає відносне число ефективних зіткнень частинок, що завершуються хімічною взаємодією. При використанні рівняння Вант Гоффа – Арреніуса з метою встановлення часу, протягом якого ізоляція досягає свого граничного стану (терміну служби), після відповідних перетворень і сумісного рішення рівнянь отримаємо вираз для терміну служби ізоляції

$$\ln T = E_a/R\theta - G,$$

де $G = \ln A - \ln \ln C_0/C$.

В табл. 2. 3 наведені осереднені значення постійних E_a , G і B для ізоляційних матеріалів різних класів нагрівостійкості ізоляції.

Якщо відомий строк служби ізоляції T_1 при температурі θ_1 , то строк служби T_2 при температурі θ_2 можливо визначити за формулою

$$T_2 = T_1 e^{\frac{E_a}{R}(\frac{1}{\theta_2} - \frac{1}{\theta_1})}.$$

До електричного старіння під дією електричних полів схильна ізоляція високовольтного обладнання, причому практичний вплив полів виявляється в ізоляції обмоток електричних машин напругою 6 кВ і вище. Особливу загрозу для електричних машин, що пропрацювали певний час, ізоляція яких має певний ступінь старіння, мають комутаційні перенапруження, оскільки електрична міцність їх ізоляції знижена. Комутаційні перенапруження можуть перевищувати амплітудне значення живлячої напруги в 7 та більше разів .

Таблиця 2. 3. Значення постійних для визначення терміну служби ізоляції

Клас ізоляції	E_a , Дж/моль	G	$B \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$
A	7, 90\	15, 3	0, 95
E	8, 19	15, 1	0, 985
B	8, 48	15, 5	1, 02
F	10, 55	19, 7	1, 27
H	12, 89	24, 2	1, 55
C	12,89	21,8	1,55

Суттєвий вплив на прискорення процесу старіння ізоляції має волога. В основному проникнення вологи в ізоляцію обмоток електричних машин відбувається в неробочі періоди, особливо при їх охолодженні, коли тиск в порах і капілярах матеріалу ізоляції є нижче атмосферного. Проникнення вологи викликає гідролітичне руйнування ізоляційних матеріалів, особливо тих що мають волокнисту структуру. Періодичне проникнення вологи в ізоляцію і її видалення в процесі підсушування під час роботи електричних машин сприяє розвитку пір в ізоляції. При цьому просочення обмоток компаундуючими лаками тільки уповільнює процес зволоження і підсушки ізоляції, а не виключає його. Зволоження є однією з головних причин пробою ізоляції обмоток електричних машин, особливо намотаних проводами з оплетенням, що має високу гігроскопічність. Проникаюча в пори і тріщини волога значно знижує електричну міцність ізоляції. Небезпечним є також зволоження забруднених обмоток. При зволоженні їх різко знижується напруга пробою в місцях дефектів і тим самим створюються умови для виникнення часткових та дугових розрядів при відносно низьких значеннях перенапружень. Експериментальні дослідження показали, що при зволоженні обмоток з дефектами в ізоляції опір ізоляції знижується в десятки разів і при цьому різко збільшуються струми витоку крізь ізоляцію. У цих випадках через дефекти в ізоляції під дією напруги проходять струми, що руйнують ізоляцію, унаслідок чого виникає коротке замикання між витками обмоток або замикання обмоток на землю. Електричні машини, що мають такі дефекти ізоляції, вимагають заміни обмоток, тобто капітального ремонту.

Процес розвитку дефектів в міжвитковій ізоляції всипних і стрижньових обмоток електричних машин можливо представити наступним чином. Якщо ізоляція не має технологічних дефектів, то під дією температури, вібрації, зволоження, зовнішнього середовища й інших чинників протягом часу відбувається поступове старіння ізоляції, що проявляється в її усиханні, випаровуванні летючих компонентів, втраті еластичності, виникненні пір і тріщин. У найбільш послаблених місцях ізоляції виникають місцеві дефекти, що мають низьке значення напруги пробою. У моменти перенапружень (атмосферних або комутаційних) в місці дефекту виникають часткові іскрові розряди, які повторюються при кожному подальшому перенапруженні, значення якого перевищує напругу пробою місця дефекту. Унаслідок дії розрядів місцева пробивна напруга поступово зменшується доти, поки в місці дефекту починає виникати дуговий розряд при робочій нарузі між витками. В такому випадку відбувається повне міжвиткове замикання й обмотка виходить з ладу.

У зв'язку з тим, що пробивна напруга в місці дефекту після першого пробою чимала, а перенапруження у витках обмоток досягають значення пробивної напруги не так часто, з моменту виникнення дефекту в ізоляції до повного виткового замикання проходить певний час.

Результати аналізу пошкоджень ізоляції електричних машин, що поступають в капітальний ремонт, показують, що 72,6% пошкоджень ізоляції відноситься до пробоїв в пазах і в лобових частинах. Слід зазначити, що знос направляючих підшипників може приводити до зачіпання активної сталі ротора за статор і, як наслідок, до пошкодження ізоляції в місці зачіпання. Тому можливо припускати, що у ряді випадків відмови ізоляції обмоток можуть бути викликані також чинниками механічними, зокрема нерівномірністю робочого зазору й надмірним зносом підшипників.

У зв'язку з тим, що електрична міцність є одним з основних показників працездатності ізоляції обмоток, для з'ясування причин і механізму розвитку дефектів в ізоляції визначаються її електричні міцнісні характеристики при капітальному ремонті.

Встановлено, що пробій ізоляції обмоток статорів, як правило, викликаний не стільки загальним старінням, а й розвитком місцевих

дефектів в ізоляції, які виникають при сторонніх включеннях та механічних пошкодженнях обмоток. Унаслідок розвитку місцевих дефектів в шарі ізоляції виникають канали й тріщини, через які надходить волога. Через певний час сумісна дія вологи, напруги й температури руйнує ізоляційний шар.

Спочатку крізь місце провідності або механічного пошкодження ізоляції починає протікати струм, що поступово нагріває ізоляцію в місці пробією. Нагріта ізоляція руйнується, струм, що проходить крізь місце пошкодження, збільшується, нагріває ізоляцію розташованих поряд з дефектом ділянок обмотки і в її ізоляції також виникають тріщини. Після певного періоду роботи виникає виткове замикання, струм в пошкоджених витках швидко збільшується, нагріває ізоляцію по всій довжині короткозамкнутих витків і вона виходить з ладу, спікаючись і розтріскується.

Аналіз пошкоджень електричних машин показує, що ізоляція обмоток є одним з найбільш важливих елементів конструкції, машин, що істотно обмежують їх працездатність. Технічний стан ізоляції необхідно контролювати в процесі експлуатації.

2. 5. Відмови електромеханічних елементів устаткування

Відмови електромеханічного плану гідроенергетичного устаткування переважно пов'язані з нагрівом, деформаціями, переміщеннями окремих елементів під дією електромагнітних та інших чинників. Слід розглянути їх впливи докладніше.

Знос і пошкодження підшипників електричних машин

Статистичні дані і аналіз пошкоджень електричних машин, що обертаються, свідчать, що знос і вихід з ладу підшипників, разом з виходом з ладу ізоляції обмоток, є найбільш частими причинами відмов електричних машин. У переважаючій більшості випадків при зносі підшипників ротор може почати зачіпати пакет активної сталі статора, в місці зачіпання в разі тертя різко збільшується температура або відбувається зрушення листів в зубцях, що приводить до пошкодження ізоляції обмоток.

При роботі електричних машин мастило в підшипниках також старіє й забруднюється пилом і абразивними частинками, що потрапляють в підшипник з навколишнього середовища: металевий пил, продукти корозії і зносу щіток і ін. При інтенсивному провертанні зовнішнього кільця підшипника унаслідок послаблення посадки в підшипниковому щиті частинки матеріалу щита також можуть потрапляти в підшипник.

Однією з можливих причин виходу підшипників з ладу також є неправильна їх посадка на вал. При наприсовці підшипників на вал з великим натягом виникає затискання тіл кочення, підвищений нагрів і вигорання мастила. У цих випадках підшипники швидко зношуються. При слабкій посадці підшипників їх внутрішні кільця обертаються на валу, нагріваються і розширюються, внаслідок чого затискаються тіла кочення і підшипник також виходить з ладу.

Великий вплив на термін служби підшипників, разом з іншими чинниками, має вібрація електричних машин в результаті невірноваженості частин, що обертаються, передачі вібрації від механізмів, що приводяться, і ін. Так, вал гідрогенератора Дніпровської ГЕС, масою понад 90 т., складається з трьох частин, несоосність та динамічна невірноваженість яких суттєво впливають на вібраційні якості гідроагрегату та направляючі підшипники.

Довговічність підшипників розраховується виходячи з умов втомної міцності, на яку основний вплив при нормальній експлуатації мають навантаження й швидкість обертання.

Термін служби підшипників можна розрахувати по формулі:

$$T = 1/n(C_p/Q_n)^k,$$

де T – строк служби підшипника, год; n – частота обертання, s^{-1} ; C_p – коефіцієнт працездатності; Q_n – приведені навантаження; k – показник ступеню.

Приведені навантаження визначається з урахуванням радіальної й осевої складових навантаження на підшипник, його кінематики, вібрації та температури. Показник k для вживаних зазвичай в підшипниковій промисловості сталей дорівнює 3,33.

Умови роботи підшипників ковзання теж мають свої особливості. На їх робочих поверхнях можуть спостерігатися сліди підгорання,

викликані, так звані, «сухим ходом», тобто роботою підшипників без мастила. Найбільш поширеними дефектами опорних підшипників є тріщини на робочій поверхні п'яти і вифарбовування поверхні тертя підп'ятника.

Наведені дані про відмови й характерні дефекти підшипників електричних машин свідчать про те, що підшипники є досить критичним елементом електричних машин, що вимагає уваги й періодичного контролю їх технічного стану в процесі експлуатації.

Знос і пошкодження активної сталі

В процесі роботи активна сталь електричних машин теж схильна до зносу, особливо інтенсивний знос спостерігається в розточуванні статорів. Причинами зносу пакету активної сталі є корозія поверхні і наявність в повітряному зазорі порошин пилу, піску й інших абразивних частинок.

Для визначення значення зносу активної сталі в процесі експлуатації вимірюються внутрішні діаметри статорів, діаметри роторів і відхилення робочих зазорів.

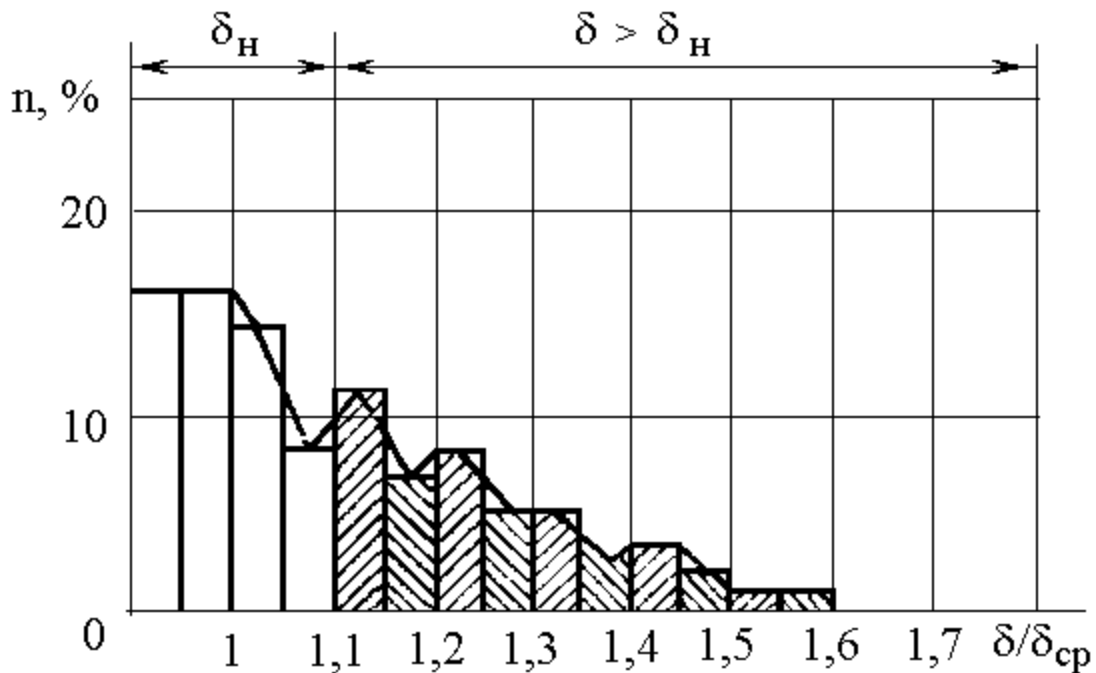


Рис. 2. 2. Гістограма й полігон розподілу величин повітряного зазору

Вимірювання показують, що робочий повітряний зазор часто перевищує своє номінальне значення. Рис. 2. 2 ілюструє гістограму і полігон розподілу відносного значення повітряного зазору досліджених електричних машин.

Окрім зносу, в умовах експлуатації можуть зустрічатися вм'ятини, сліди оплавлення дугою поверхні і розпушення зубців крайніх листів активної сталі.

Швидкий великий знос активної сталі статора і ротора може спостерігатися, як зазначено, при зачіпанні ротора за статор при зносі направляючих підшипників вище допустимих значень або при вигині валу гідрогенератора. Знос поверхні по довжині розточування статора неоднаковий. Зазвичай по краях статора знос найбільший, а при наближенні до середини його значення зменшується. Овальність розточування статора, як правило, не спостерігається.

Слід зазначити, що на практиці механічному зносу активної сталі багато в чому перешкоджає система поточного контролю й моніторингу параметрів робочого зазору.

Знос і пошкодження контактних механізмів

У контактних кілець електричних машин найчастіше зношується робоча поверхня, виникають подряпини, підвищені шорсткості або плями від підгорання. Унаслідок зносу також виникає биття поверхні контактних кілець та додатковий знос й пошкодження щіток.

Досить часто в електричних машинах старих конструкцій спостерігається порушення контакту між вивідною шпилькою і контактними кільцями або пошкодження ізоляції шпильок контактних кілець. Досить часто спостерігаються випадки забруднення поверхні між контактними кільцями, що викликає перекриття ізоляції між ними електричною дугою.

Основними несправностями щіткового механізму є обгорання або механічне пошкодження обойм, втрата пружинами своїх властивостей, ослаблення затягування в контактних з'єднаннях, наявність тріщин в траверсах і пошкодження ізоляції пальців щіткотримачів. Зі всіх деталей щіткового вузла найбільш схильні до зносу саме щітки. Особливо швидко зношуються щітки при великих

струмових навантаженнях, що зустрічаються в ланцюгах ротора гідрогенераторів. В результаті зносу щіток по висоті зменшується натиснення на них пружин, тобто натиснення в контакті між щіткою і колектором або контактним кільцем, внаслідок чого між щіткою і колектором або кільцем виникає інтенсивне іскріння, яке приводить до прискорення процесу зносу як щіток, так і колектора.

Знос і пошкодження апаратів управління і захисту

Від технічного стану низьковольтних апаратів управління: магнітних пускачів, автоматичних вимикачів, реле, перемикачів і ін. в значній мірі залежать довговічність і надійність роботи електроприводів і електричних установок. Відмови низьковольтних апаратів можна розділити на два види: раптові і поступові. Раптові відмови настають, як правило, при стрибкоподібній зміні одного або декількох параметрів функціональних вузлів апаратів. Поступові відмови настають унаслідок зносу й старіння функціональних вузлів і деталей. Найбільше число відмов низьковольтних апаратів спостерігається в контактах, обмотках котушок і в механічній частині.

Відмови контактів електричних апаратів управління в більшості випадків пояснюються досить важкими умовами їх роботи. На знос контактів мають вплив такі чинники, як струм і напруга, рід струму, частота включення й відключення, характер навантаження, зовнішнє середовище: температура, вологість і запилення повітря, наявність пари або газів, вібрація й ін. У зв'язку з цим спостерігається досить частий вихід контактів з ладу. Особливо це відноситься до контактів апаратів, що працюють у важких режимах.

У електромагнітних реле за статистикою 60% відмов доводиться на контакти, а інші 40% відмов майже порівну розподіляються між обмотками й механічною частиною. Найчастіше в умовах експлуатації відмови контактів відбуваються із-за зносу матеріалу контактів. Одним з найбільш важливих чинників, що впливають на знос контактів, є електрична ерозія та дія електричної дуги, що виникають при їх розмиканні. Дуговий розряд при розмиканні контактів викликає оплавлення і випаровування матеріалу, з якого виготовлені контакти. Ступінь зносу контактів залежить від струму дуги, часу її горіння, матеріалу контактів і їх форми. При великих

струмах і нечастих включеннях і відключеннях знос контактів можливо вважати пропорційним числу, відключень. При відносно невеликих струмах і частих включеннях знос контактів в значній мірі залежить від частоти включення, яка багато в чому визначає температуру контактів і активність процесів окислення їх поверхонь.

Електричний знос контактів, що зазвичай перевищує механічну складову, відбувається при їх включенні й відключенні під напругою. При виключенні між контактами виникає місток розплавленого металу, який випаровується й розбризкується тим інтенсивніше, чим більше сила струму у момент розмикання контактів. Електричний знос контактів виникає також при відскоку рухомих контактів від нерухомих при ударі у момент їх зіткнення – брязкоті.

У апаратів постійного струму відбувається електрична ерозія контактів, при якій частина металу переноситься з одного контакту на інший, унаслідок чого на одних контактах виникають поглиблення, а на інших – підвищення з перенесеного металу. Механічний знос виникає при ударах, що відбуваються при замиканні контактів, а також при терті поверхонь контактів. У електричних ланцюгах з малим значенням струму досить часто виникають відмови у вигляді не замикання, викликані утворенням окисних плівок на поверхні контактів при малому їх натисканні.

Відмови обмоток управляючих котушок апаратів найчастіше виникають із-за обривів і міжвиткових замикань. Провідники котушок зазвичай обриваються в місцях з низькою якістю паяння при механічних впливах на дроти і при їх вібрації. Міжвиткові замикання обмоток котушок низьковольтних апаратів виникають при пошкодженні ізоляції проводів, якими намотані котушки і при довготривалому проходженні струму, значення якого перевищує номінальне. Струм в котушці найчастіше збільшується за рахунок зазору при заклинюванні в проміжних положеннях або при нещільному приляганні робочих поверхонь магнітопроводів апаратів. Крім того, ізоляція ушкоджується при перенапруженнях під час включення й відключення живлення обмотки котушки та з інших причин.

Так, для визначення струму, що проходить через короткозамкнуті витки обмотки, в котушках магнітних пускачів ПМЕ-200, намотаних

дротом ПЕТВ діаметром 0,18мм, закорочувались 50 і 100 витків. Результати вимірювання показали, що при повному металевому замиканні 50 витків струм в них перевищує номінальний струм котушки приблизно в 30 разів. За наявності 100 короткозамкнутих витків струм у витках перевищує номінальний приблизно в 25 разів. Якщо між витками є неповне коротке замикання, т. ч, місце дефекту ізоляції має певний опір, то струм в короткозамкнутих витках різко зменшується і при опорі 90 Ом дорівнює номінальному струму котушки.

Отже, при опорі в місці дефекту міжвиткової ізоляції менше 90 Ом у витках проходить струм більше номінального у декілька разів, що приводить до перегріву котушки, прискореного розвитку тих, що є і виникнення нових дефектів в ізоляції та до виходу обмотки котушки пускача з ладу.

Таким чином, в умовах експлуатації необхідно не тільки виявляти короткозамкнуті витки з повним металевим замиканням, але і послаблені ділянки ізоляції, які можуть привести до виходу котушки з ладу. У зв'язку з цим, для виявлення ослаблених місць в ізоляції рекомендується прикладати до виткової ізоляції напругу, що в 10 – 15 разів перевищує номінальну. Це надає можливість виявляти дефекти в початковій стадії їх розвитку і приймати необхідні заходи.

Пробій ізоляції котушок на корпус спостерігається тільки в безкаркасних конструкціях котушок.

Аналіз роботи низьковольтних апаратів показує, що відмови котушок істотно залежать від напруги їх живлення: чим більше напруга живлення, тим менший рівень їх надійності. Котушки низьковольтних апаратів, що мають більшу номінальну напругу, намотуються з дроту меншого діаметру, мають меншу товщину ізоляції й більше число витків, що знижує надійність котушки. У цих умовах виникає досить велика вірогідність виникнення замикання між витками котушок.

Експериментальні дані свідчать, що інтенсивність відмов котушок можливо вважати лінійною функцією від напруги живлення. Крім того, кількість відмов котушок збільшується із збільшенням числа циклів включення – відключення апарату, температурного режиму і часу роботи котушки.

Відмови механічних систем низьковольтної апаратури найчастіше виникають у зв'язку зі зносом і зломом деталей, а також із-за перекосів, зачіпань та заклинювань рухомої системи. До відмов механічних систем відноситься близько 20% всіх відмов низьковольтних апаратів. Дослідженнями встановлено, що відмови механічних систем в більшості випадків є поступовими відмовами, що виникають унаслідок зносу деталей і вузлів. Раптові відмови зазвичай спостерігаються тільки в початковий період роботи апаратів.

Разом з відмовами механічних систем у магнітних пускачів змінного струму зустрічаються розриви короткозамкнутих витків, що викликають вібрацію. Порівняно часто низьковольтна апаратура виходить з ладу при втраті механічної міцності або пружних властивостей пружин. Особливо це відноситься до автоматичних вимикачів, реле і перемикачів.

У останні десятиліття при виготовленні низьковольтної апаратури широко застосовуються пластмаси. Проте виготовлені з пластмаси деталі (траверси, корпуси, кришки та ін.), в деяких випадках не мають необхідного запасу міцності й в умовах експлуатації виходять з ладу.

Велике число низьковольтних апаратів також виходить з ладу у зв'язку з корозією деталей механічної системи. Це відноситься до апаратури, що працює у вологих умовах, а також за наявності в навколишньому середовищі агресивних домішок, що викликають посилену поверхневу корозію деталей.

Перевірка теплових і особливо електромагнітних розчеплювачів автоматичних вимикачів з номінальними струмами вище 60 А викликає певні труднощі, оскільки прилади, що випускаються, не забезпечують необхідної сили струму. У зв'язку з цим розробляються необхідні нестандартні пристосування для перевірки, регулювання теплового, електромагнітного та релейного захисту потужних електроустановок при технічному обслуговуванні й ремонті, що забезпечує регульований струм від 0 до 2000 А. Таке устаткування найчастіше виконують переносним і складається воно переважно з вимірювального та навантажувального блоків.

3. ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ

Прогнозування технічного стану устаткування є важливою технічною проблемою забезпечення функціональної надійності. Тому слід докладніше розглянути основні механізми впливу на рівень визначення поточного технічного стану. В умовах ГЕС така задача є важливою за умови забезпечення рівня функціональної надійності обладнання.

3. 1. Фізичні основи прогнозування технічного стану устаткування

- Деталі й вузли устаткування при експлуатації зношуються та старіють, причому інтенсивність таких процесів залежить від багатьох чинників. Так, інтенсивність зносу, старіння ізоляційних конструкцій електричних машин залежить не тільки від тривалості роботи і властивостей використаних матеріалів, але й від механічних дій, температури, впливу зовнішнього середовища та т. і.

Не зважаючи на те, що на кожен окрему електричну машину або апарат впливає визначене, властиве тільки даній машині або апарату поєднання чинників, що обумовлюють ту або іншу швидкість втрати експлуатаційних властивостей, результати дії кожного чинника на втрату властивостей підкоряються певному закону. Так, вплив на швидкість процесів старіння ізоляції робочої температури можна виразити залежністю швидкості хімічних реакцій від температури по приведеному вище рівнянню Вант Гоффа – Арреніуса .

Механічна напруга, якій піддаються матеріали ізоляційної конструкції електроустаткування як в процесі виготовлення, так і при експлуатації, також призводить до старіння ізоляції. Зменшення терміну служби ізоляції під впливом механічної напруги й при зміні структури матеріалу підкоряється певному закону.

- Так, відповідно до формули Журкова довговічність, напруга матеріалу і температура ізоляційного матеріалу зв'язані залежністю:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma\sigma}{r\theta}} .$$

де τ – довговічність; τ_0 – постійна; σ – механічна напруга; θ – абсолютна температура; r – газова постійна; U_0 – енергія активації руйнування при відсутності механічних напруг; γ – постійна впливу структури на розподіл напруг в матеріалі.

Слід зазначити, що термін служби ізоляції може значно змінюватися не тільки під впливом механічної напруги і температури, але й під впливом інших чинників.

Таким чином, фізичні і хімічні процеси, що відбуваються в електричній ізоляції, підкоряються певним законам, що обумовлює можливість з певним ступенем точності наперед передбачати й прогнозувати на підставі даних відповідних вимірювань технічний стан ізоляції в майбутньому.

Багатьма дослідженнями доведено, що знос деталей в сполученнях машин і механізмів пропорційний роботі сил тертя, тобто добутку сил нормального тиску на коефіцієнт тертя й шлях дії сил тертя. У свою чергу кожний з множників теж залежить від ряду чинників.

Сила нормального тиску залежить в основному від навантаження машини або від режиму її роботи, коефіцієнт тертя – від стану поверхонь тертя та якості мастила, шлях дії сил тертя – в основному від тривалості роботи при заданих режимах. Це положення розповсюджується й на деталі механічної частини електричного устаткування.

Таким чином, можливо зробити обґрунтований висновок, що фізико-хімічні процеси зміни властивостей і розмірів деталей та вузлів механічної частини електричних машин і апаратів також підкоряються певним законам і їх технічний стан з деяким ступенем точності можливо прогнозувати.

Прогнозування технічного стану устаткування, тобто процес прогнозу зміни параметрів в майбутньому, є достатньо складним технічним завданням. Це пов'язано з тим, що на технічний стан навіть однотипних деталей і вузлів обладнання впливає поєднання достатньо великого числа вірогідних чинників, частину з яких досить важко врахувати.

За умовами технології виробництва деталі й вузли будь-якого обладнання виготовляються з певними допусками за розмірами,

хімічним і структурним складами матеріалів тощо. Це також має вплив на інтенсивність зносу або старіння деталей і вузлів. Крім того, на інтенсивність зносу деталей і вузлів устаткування істотно впливає організація й періодичність технічного обслуговування та поточного ремонту. Якщо технічне обслуговування й ремонти проводять нерегулярно або взагалі не проводять, швидкість зносу вузлів і деталей значно збільшується й знос швидко досягає своїх граничних значень. В результаті всі перераховані вище чинники впливають на достовірність прогнозування роботи устаткування.

Слід зазначити, що розроблені методи прогнозування не дають можливість передбачати раптові відмови, тобто відмови, що характеризуються стрибкоподібною зміною параметрів стану деталі або вузла обладнання до граничного значення. Прогнозувати з певним ступенем точності можливо відмови, що характеризуються поступовою зміною параметрів технічного стану й обумовлені зносом або старінням матеріалу деталей або вузлів.

Знос і старіння – це процеси, що характеризують зміну технічного стану устаткування в часі. Вони відображають зміни, що відбуваються в устаткуванні й призводять до погіршення його властивостей. Таке погіршення властивостей при експлуатації обумовлює наявність визначальної детермінованої складової в процесах зносу й старіння деталей та вузлів. Вплив великого числа різних чинників приводить до прискорення, уповільнення процесів зносу або старіння, тобто накладає на процес випадкову складову. Тому приймають, що процеси зносу і старіння деталей і вузлів в основному містять детерміновану й випадкову складові. Вплив кожної з цих складових для кожного конкретного випадку може бути переважаючим, що відбивається на характері вказаного процесу.

Основним завданням прогнозування є визначення залишкового ресурсу елементів електричних машин і апаратів. Завданнями прогнозування в процесі експлуатації устаткування є: скорочення трудомісткості й вартості робіт, що виконуються при поточних ремонтах, оскільки вони проводяться тільки при необхідності, тобто при повному вичерпанні ресурсу деталей і вузлів; визначення термінів регульовальних і ремонтних робіт, а при повному виробленні ресурсу – термінів заміни устаткування; визначення потрібного числа

запасних частин; скорочення термінів знаходження устаткування в ремонті (оскільки відомі елементи і вузли, що підлягають ремонту або заміні); встановлення термінів (періодичності) проведення діагностування; перевірка якості виконання регулювальних і ремонтних робіт.

Відповідно до ГОСТ 13377–75 «Надійність в техніці. Терміни і визначення» ресурс – це напрацювання об'єкту від початку експлуатації або його відновлення після ремонту до настання граничного стану, тобто коли подальша експлуатація має бути припинена виходячи з вимог техніки безпеки або економічних міркувань.

Зазвичай досягши граничного стану дана деталь або вузол електричної машини і апарату підлягають ремонту (відновленню) або списанню.

Якщо розглядати ресурс роботи електричної машини або апарату, то їх відмова або загроза відмови зазвичай настає з вини однієї-двох деталей або вузла, що пов'язане з нерівнопрочністю і з різною зносостійкістю деталей і вузлів електроустаткування. Конструкцією такого устаткування зазвичай передбачається нескладна заміна частини швидкозношуваних деталей, наприклад, щіток електричних машин, які замінюють при технічному обслуговуванні. Для заміни інших деталей і вузлів (наприклад, підшипників) устаткування підлягає розбиранню. Після заміни або ремонту деталей, що вичерпали ресурс роботи, електрична машина знов стає працездатною і має певний запас часу до наступної загрози втрати працездатності.

У техніці найчастіше при визначенні ресурсу користуються такими термінами, як доремонтний, міжремонтний, залишковий і використаний ресурс. Доремонтний ресурс характеризується напрацюванням нового обладнання від початку експлуатації до 1-го ремонту, а міжремонтний – напрацюванням між ремонтами. При прогнозуванні зазвичай визначається залишковий ресурс, тобто напрацювання устаткування від моменту діагностування (контролю) до граничного стану, обумовленого технічною документацією. Використаний ресурс переважно визначається напрацюванням електроустаткування після виготовлення або ремонту до моменту діагностування або контролю.

Контроль залишкового ресурсу устаткування дозволяє об'єктивно визначити момент необхідності ремонтної дії, що відповідає якнайповнішому використанню ресурсу деталями і вузлами.

Для орієнтовного порівняння технічного стану елементів машини, що діагностується, або апарату, які характеризуються різними діагностичними параметрами, можна користуватися поняттям коефіцієнта технічного ресурсу. За допомогою цього коефіцієнта оцінюють залишковий ресурс деталі, сполучення або вузла. Для параметрів, абсолютні значення яких збільшуються в процесі експлуатації устаткування, коефіцієнт технічного ресурсу обчислюється за формулою

$$k_{\text{ост}} = (P_{\Gamma} - P_{\text{з}}) / (P_{\Gamma} - P_{\text{н}}), \quad (3.1)$$

де P_{Γ} – граничне значення параметра; $P_{\text{н}}$ – номінальне значення параметра; $P_{\text{з}}$ – змірене значення параметра. Якщо в процесі експлуатації значення параметра зменшується, то коефіцієнт остаточного ресурсу визначається виразом

$$k_{\text{ост}} = (P_{\text{з}} - P_{\Gamma}) / (P_{\text{н}} - P_{\Gamma}). \quad (3.2)$$

Для нового елемента вузла або машини $k_{\text{ост}} = 1$, а для повністю вичерпавших свій ресурс $k_{\text{ост}} = 0$. З найбільшою точністю коефіцієнт ресурсу характеризує технічний стан об'єкта діагностування, коли вимірюваний діагностичний параметр змінюється в процесі експлуатації за лінійним законом.

3.2. Основні шляхи рішення задач прогнозування

Не дивлячись на множину підходів до рішення задач прогнозування, можливо виділити наступні основні шляхи отримання результатів прогнозу, об'єднуючі групи використаних на практиці методів прогнозування: коли результат прогнозу визначається в одній розмірності з контрольованими параметрами, тобто метою прогнозування зміни технічного стану об'єкту є набуття значення контрольованого параметра, що характеризує протікання процесу в часі; результат прогнозу визначається вірогідністю виходу або невиходу характеристик контрольованих параметрів за певні межі; в

результаті прогнозу контрольований об'єкт відносять до того або іншого класу технічного стану, який встановлюють наперед за критерієм працездатності або довговічності. Для кожного з перерахованих вище випадків зазвичай є характерний підхід до прогнозування, об'єднуючий свої методи з певним математичним апаратом.

Це три основні методи: аналітичного прогнозування, імовірнісного прогнозування і статистичної класифікації.

Метод аналітичного прогнозування застосовують для завдань, коли зміна контрольованого параметру інерційна в часі і всі зміни поступово накопичуються. Таку зміну контрольованого параметра Π можливо представити функцією $\Pi(t)$, як це показано на рис. 3. 1.

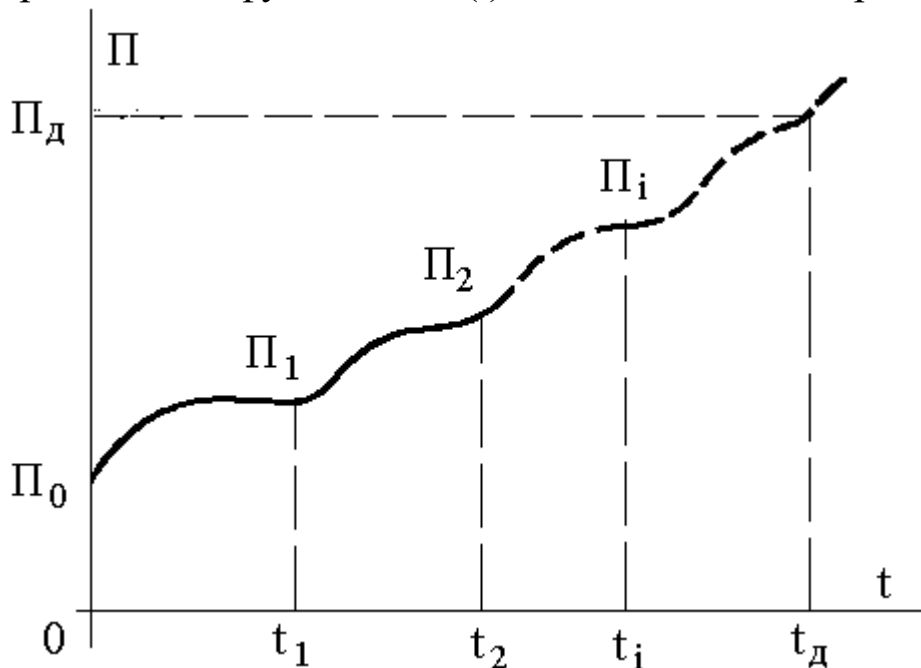


Рис. 3. 1. Графік визначення величин параметрів стану методом аналітичного прогнозування.

При цьому існують дані вимірювань значень функцій $\Pi(t_0)$, $\Pi(t_1)$ і $\Pi(t_2)$ відповідно в моменти часу t_0 , t_1 і t_2 . Задачею прогнозування є визначення методом аналітичного прогнозу по значенням функції $\Pi(t)$ в минулому й сучасному величини функції в майбутньому, в моменти часу t_i , а також визначення моменту, коли параметр досягне свого допустимого значення Π_d . В ідеальному випадку цю задачу

вирішують, коли зміну параметру в часі достатньо легко виразити аналітичною функцією.

Метод імовірнісного прогнозування застосовують для завдань, коли потрібно визначити вірогідність виходу або невиходу контрольованого діагностичного параметра Π за встановлені межі. Завдання формулюється таким чином. Є значення параметра Π в моменти часу t_0, t_1, t_2 , в яких стани прогнозованого елемента характеризуються функціями розподілу F_i , рис. 3. 2.

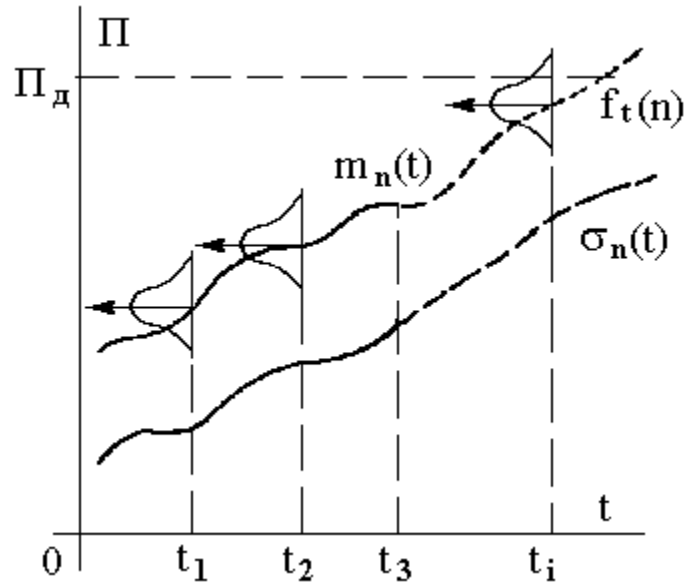


Рис. 3. 2. Графік визначення величин параметрів стану методами вірогіднісного прогнозування

По цих відомих значеннях необхідно визначити вірогідність збереження елементом працездатності в майбутньому. тобто що функція $\Pi(t)$ не вийде за своє допустиме значення Π_d . При цьому враховується щільність розподілу значень $f_{t_i}(n)$ з математичним очікуванням $m_n(t)$ і дисперсією $\sigma_n^2(t)$.

При рішенні задач прогнозування методами статистичної класифікації (розпізнавання образів) відомі значення параметра в певні моменти часу відносять до одного з класів, тобто до свого роду еталону (образу), а потім виходячи із закономірності зміни параметрів даного класу вирішують, як змінюватиметься даний параметр в майбутньому, При цьому розділення значень параметрів на класи може бути часовим (за часом або напрацюванням) або параметричним (по величинах контрольованих параметрів). Число і діапазон зміни

параметрів в кожному класі залежить від особливостей конструкції і умов роботи елемента устаткування, що діагностується. На рис. 3. 3 показаний приклад розмежування значень вимірюваних параметрів на класи.

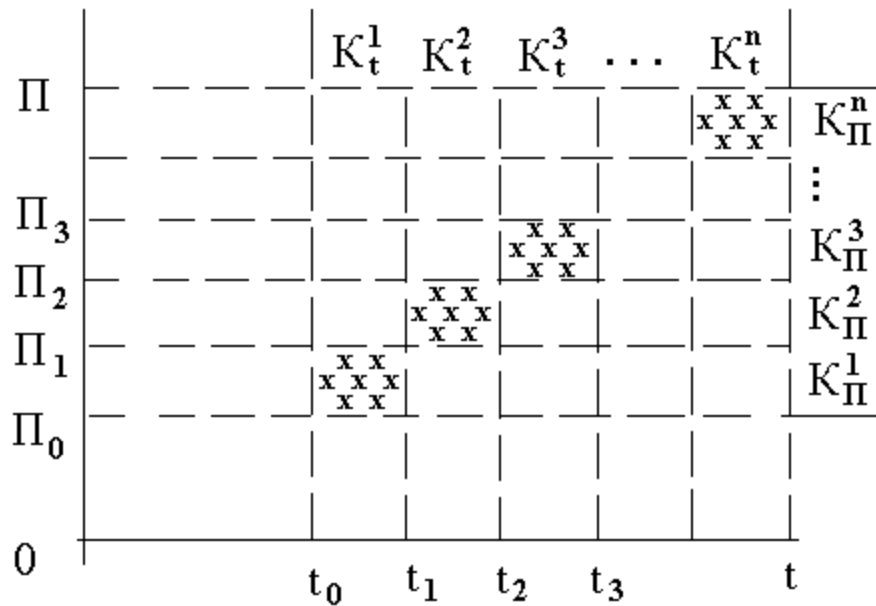


Рис. 3. 3. Приклад розмежування вимірюваних параметрів на класи при прогнозуванні методами статистичної класифікації

Таким чином розглянуто основні характерні підходи до прогнозування в різних ситуаціях, дозволяючи будувати прогнозні стохастичні моделі за різних практичних умов, об'єднуючи такі методи з певним математичним апаратом одержання необхідних інженерних рішень.

3. 3. Інженерні методи прогнозування при експлуатації устаткування

Існують різні методи, якими користуються при прогнозуванні технічного стану різного обладнання: радіоелектронної апаратури, автомобілів та інших машин і механізмів. Нижче наведено опис найбільш поширених методів прогнозування, які використовують переважно при прогнозуванні ресурсу роботи електричного устаткування. Ці методи не вимагають застосування складного

математичного апарату й доступні з використанням обчислювальної техніки.

Метод лінійного прогнозування

Зі всіх відомих методів метод лінійного прогнозування є найпростішим, оскільки в його основу покладено припущення, що в процесі експлуатації зовнішні дії на елемент, що діагностується, вузол, машину або апарат є незмінними, а залежність зміни величини діагностичного параметра від часу – лінійна. Для застосування методу необхідно мати дані про напрацювання об'єкту з початку експлуатації до моменту діагностування, а також про граничне і номінальне значення параметра.

Напрацювання об'єкту діагностування до настання граничного стану $t_{гст}$ визначають за формулою

$$t_{гст} = t \frac{k_{ост}}{1 - k_{ост}},$$

де t – напрацювання від початку експлуатації до моменту діагностування, г; $k_{ост}$ – коефіцієнт остаточного ресурсу, що визначається з співвідношення (3. 1) або (3. 2).

Метод зазвичай переважно застосовують для приблизного, орієнтовного визначення залишкового ресурсу деталей і вузлів.

Метод багатоступінчатого лінійного прогнозування

Метод базується на даних вимірювань, що проводяться при систематичних діагностуваннях та моніторингу через деякі проміжки часу. Визначення терміну безвідмовної роботи елементів або вузлів, що діагностуються по цьому методу, проводиться до наступного діагностування. Метод багатоступінчатого лінійного прогнозування враховує дійсну закономірність зношування або старіння об'єкту діагностування за даних конкретних умов експлуатації. Крім того, при прогнозуванні на період до наступного діагностування приймається, що об'єкт діагностування працюватиме в несприятливіших умовах, у зв'язку з чим ресурс безвідмовної роботи визначається по максимально можливій середній інтенсивності зміни параметра за період між двома останніми діагностуваннями. Після наступного діагностування знов встановлюється новий гарантований ресурс

безвідмовної роботи. Діагностування проводять таким чином до повного вичерпання ресурсу об'єкту. Таким методом надається низка вагомих переваг.

Метод багатоступінчатого лінійного прогнозування не вимагає даних про напрацювання і зміну величини параметрів з початку експлуатації електричної машини або апарату. В результаті лінійної апроксимації й екстраполяції зміни параметрів на деякий проміжок часу отримують величину періоду безвідмовної роботи завжди менше дійсного, тобто завжди резервується певний запас надійності результатів прогнозу.

• Гарантований ресурс безвідмовної роботи деталей, вузлів і сполучень, технічний стан яких характеризується параметрами, що мають лінійні або нелінійні залежності від часу роботи, визначається з виразу

$$t_{\text{ГАР}} = (\Pi_{\text{П}} - \Pi_3) / (\Pi_3 - \Pi_{3-1}) t_0 k_0, \quad (3.3)$$

де $t_{\text{ГАР}}$ – гарантований ресурс безвідмовної роботи, од. наробки; $\Pi_{\text{П}}$ – граничне значення параметра; Π_3, Π_{3-1} – змірена величина параметра відповідно за даним та попереднім діагностуванням; t_0 – період між даним й попереднім діагностуванням, од. наробки; k_0 – корегуючий коефіцієнт.

На рис. 3. 4 показано приклад багатоступеневого лінійного прогнозування зміни параметра технічного стану.

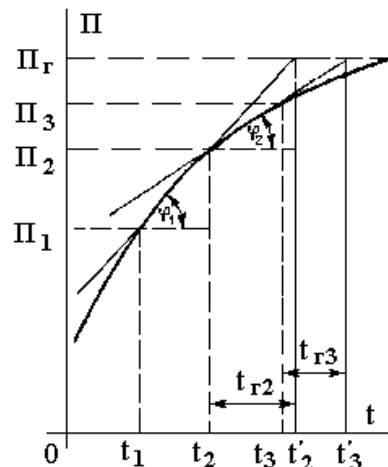


Рис. 3. 4. Приклад багатоступінчатого лінійного прогнозування гарантованого ресурсу при убуваючій інтенсивності зміни діагностичного параметру.

Якщо діагностування проводилося в моменти часу t_1, t_2, t_3 і при цьому набуті величини значень параметра відповідно Π_1, Π_2, Π_3 , то середня інтенсивність зміни параметра за відрізок часу між 1-м і 2-м, 2-м і 3-м діагностуваннями складає:

$$I_{\text{ср } 1-2} = (\Pi_2 - \Pi_1) / (t_2 - t_1);$$

$$I_{\text{ср } 2-3} = - (\Pi_3 - \Pi_2) / (t_3 - t_2).$$

Таким чином, після кожного діагностування корегують результат прогнозування з урахуванням середньої інтенсивності зміни параметра за час між останнім і попереднім діагностуванням.

При цьому передбачається, що за прогнозований період часу до наступного діагностування інтенсивність зміни параметра не може перевищити інтенсивності, яка була в попередньому періоді. Інакше закономірність зміни параметра повинна змінитися, тобто убуваюча інтенсивність має змінитися на зростаючу.

З рис. 3. 4 видно, що після 2-го діагностування гарантований ресурс безвідмовної роботи склав $t_{\text{гар}2} = t'_2 - t_2$, а після 3-го діагностування – $t_{\text{гар}3} = t'_3 - t_3$. Корегуючий коефіцієнт k_0 , що введений у вираз (3. 3) у зв'язку з тим, що діагностичні параметри для різних деталей, вузлів і типів електроустаткування можуть змінюватися як з убуваючою, так і зі зростаючою інтенсивністю. При убуваючій інтенсивності зміни діагностичного параметра при прогнозуванні корегування проводиться автоматично у бік зменшення гарантованого ресурсу безвідмовної роботи. В цьому випадку значення корегуючого коефіцієнту дорівнює одиниці.

Якщо діагностичний параметр змінюється за нелінійною залежністю, що збільшується зі зростаючою інтенсивністю, то корегуючий коефіцієнт визначається як відношення значень параметра при попередньому і даному діагностуванні, тобто

$$k_0 = \Pi_{\text{д-1}} / \Pi_{\text{д}}.$$

У випадках зменшення параметра при роботі об'єкту діагностування зі зростаючою інтенсивністю корегуючий коефіцієнт визначається за формулою

$$k_0 = (\Pi_{\text{поч}} + \Pi_{\text{д}} - \Pi_{\text{д-1}}) / \Pi_{\text{поч}},$$

де $\Pi_{\text{поч}}$ – початкове значення параметра.

Таким чином, для підвищення достовірності даних при прогнозуванні ресурсу устаткування за допомогою багатоступінчатого лінійного методу прогнозування необхідно заздалегідь знати загальну закономірність зміни діагностичних параметрів. Якщо загальна закономірність параметрів невідома, то розрахунок гарантованого ресурсу безвідмовної роботи ведеться з урахуванням корегуючого коефіцієнта обчисленого за формулою, закономірності, що відповідає випадку зі зростаючою інтенсивністю зміни параметра. При цьому гарантований ресурс роботи до наступного діагностування буде скорегований у бік зменшення.

• **Метод прогнозування за середньою статистичною зміною параметра**

Такий метод переважно застосовують за відсутності інформації про напрацювання елемента до моменту діагностування. Початковими даними при його застосуванні є функція середньої зміни параметра і середньоквадратичне відхилення. Для цього необхідно провести чимале число спостережень за однойменними елементами в різних умовах експлуатації. Математична обробка зібраних даних дозволяє визначити закономірність зміни параметра залежно від напрацювання й середню тривалість роботи об'єкту діагностування до моменту, коли параметр досягне свого граничного значення.

У зв'язку з тим, що при середньостатистичному прогнозуванні не враховуються особливості роботи кожного конкретного елемента електричної машини або апарату, цей метод прогнозування є достатньо наближеним. На рис. 3. 5 показано поле розсіювання значень параметра однотипних елементів в умовах експлуатації, яке обмежується кривими 2 і 3, а також крива залежності середнього значення параметра від напрацювання 1, обчислена методом найменших квадратів. З рисунка видно, що середній час t_{cp} виходу параметра за своє граничне значення значно відрізняється від часу виходу параметра за граничне значення за найсприятливіших умов $t_{мин}$ і за найсприятливіших умов $t_{макс}$.

Розсіювання значень параметра характеризується такими показниками, як коефіцієнт варіації, середньоквадратичне відхилення, дисперсія, стандартне відхилення й ін.

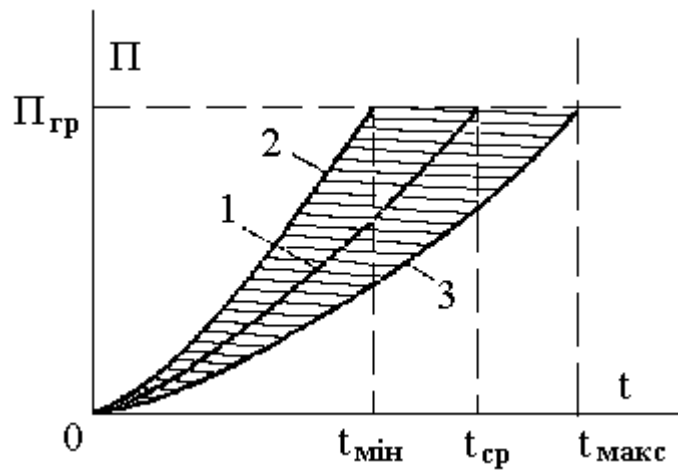


Рис. 3. 5. Поле розсіювання значень параметра в залежності від наробки: 1 – усереднена крива зміни параметра; 2, 3 – криві, обмеження зони розсіювання параметра.

Дослідженнями встановлено, що процес зміни параметрів деталей і вузлів машин і механізмів залежно від напрацювання можливо відобразити функцією

$$u(t) = V_C t^a, \quad (3.4)$$

де $u(t)$ – зміна параметра; V_C – коефіцієнт швидкості зміни параметра технічного стану; t – час роботи (напрацювання) діагностуємого елемента; a – показник ступеню функції зміни параметра.

Якщо зміна деяких параметрів виражається іншими функціями, то їх можна привести до функції вигляду (3. 4). Значення показника ступеню функції a з достатньою точністю вважається однаковою для однотипних елементів різних машин, а значення коефіцієнта V_C може відповідати тільки даному конкретному елементу. Встановлено, що значення показника a для такого параметра технічного стану, як радіальний зазор в підшипниках, дорівнює 1,5, а зносу посадочних місць в корпусних деталях – 1.

Як показано раніше, при досягненні параметром граничного значення настає відмова елемента. Зазвичай в умовах експлуатації перевірку стану елемента проводять при діагностуванні або при ремонті, тобто через певні періоди часу t_m , звані міжконтрольним або міжремонтним напрацюванням. При цьому вводиться поняття допустимого значення параметра. Допустимі значення параметрів

зазвичай встановлюють для діагностування, поточного ремонту і капітального ремонту електричних машин або апаратів. Якщо параметри стану елемента або вузла з напрацюванням збільшуються, то збільшення допустимого значення параметрів при заданому міжконтрольному напрацюванні призводить до підвищення числа відмов, але при цьому знижується витрата запасних частин. Якщо допустиме значення вказаних параметрів зменшити, то вірогідність відмов знижується, але витрата запасних частин збільшується. Оптимальним допустимим значенням параметра є значення, при якому витрати на технічне обслуговування і ремонт на одиницю напрацювання будуть мінімальними, але при цьому елемент зможе пропрацювати наступний міжконтрольний або міжремонтний період без відмови, тобто параметр не досягне свого граничного значення.

•Очевидно, що чим менше міжконтрольне або міжремонтне напрацювання, тобто чим частіше проводиться діагностування або ремонт, тим більших значень може досягати допустиме при діагностуванні значення параметра за умови збільшення параметра з напрацюванням. І навпаки, при зменшенні параметра з напрацюванням допустиме його значення зменшується. Якщо під час вимірювань значення параметра менше допустимого, то є гарантія безвідмовної роботи елемента до наступної перевірки. При прогнозуванні по осередненій статистичній зміні параметра визначається вірогідність, що за міжконтрольний період параметр не досягне граничного значення, тобто не відбудеться відмова елемента.

•Число необхідних діагностувань і допустиме значення параметрів пов'язані між собою наступною залежністю:

$$n = 1 / (1 - \sqrt[\alpha]{\frac{P_d}{P_n}}),$$

де n – число потрібних діагностувань; P_d – допустиме значення параметра.

Вірогідність відмови за термін служби елемента або сполучення при двох діагностуваннях буде мінімальною, якщо допустиме значення зміни параметра:

$$P_d = 0,5^\alpha P_n.$$

Найбільш вірогідний ресурс елемента або з'єднання можливо визначити за формулою

$$tp = \sqrt[n]{\frac{P_{II}}{P_d}} (n - 1) t_M,$$

де t_M – міжконтрольна наробка.

• Залежності вірогідності відмови і фактичного ресурсу апроксимуються виразами:

$$P^d_0 = Q (P_0); \quad (3. 5)$$

$$t^0 P^n_0 = t_{\Phi}^0 (P_0). \quad (3. 6)$$

де P_0 – допустима зміна параметра в долях межевого; t^0 – нормований середній ресурс сукупності однойменних елементів в одиницях міжконтрольної наробки t_M ; $Q (P_0)$ – вірогідність відмови елемента; $t_{\Phi}^0 (P_0)$ – фактичний ресурс елемента.

Оптимальна допустима зміна параметру визначається з виразу

$$P_{d, \text{опт}} = \sqrt[n]{\frac{n}{(d-n)(N-1)}},$$

де N – відношення середніх витрат на усунення відмов (A) до середніх витрат на виконання профілактичних операцій (C); d, n – показники ступеня рівнянь (3. 5) и (3. 6) обчислюються методом найменших квадратів за досить великим числом спостережень, т. ч. вони є середніми статистичними даними.

Метод прогнозування за реалізацією зміни параметра

Метод прогнозування по реалізації зміни параметра досить широко застосовується при діагностуванні машин і механізмів. Метод заснований на використанні екстраполяційної функції, визначуваної по зміні параметра конкретного елемента у минулому. Згідно стандарту зміну параметра можна виразити функцією вигляду

$$U(t) = V_C t^{\alpha + \Delta\Pi}, \quad (3. 7)$$

де $U (t)$ – зміна параметра, що дорівнює різниці значення параметра при діагностуванні й його номінального значення; $\Delta\Pi$ – показник зміни параметру технічного стану за період наробки.

Решта показників функції (3. 7) відповідає показникам функції (3. 4). Функція (3. 7) має універсальне застосування, а кожен її член має фізичний сенс.

При $\alpha = 1$ функція являє випадкову лінійну функцію, тобто швидкість зміни параметра є постійною величиною. При $\alpha > 1$ швидкість зміни параметра монотонно зростає, а при $0 < \alpha < 1$ – монотонно убиває. Крім того, до функції (3. 7) можуть бути приведені інші функції, що характеризують зміну параметра. Наприклад, експоненціальну функцію зміни параметра при $\alpha = 1$ можна привести до функції (3. 7) шляхом логарифмування, а ступеневу – шляхом піднесення до ступеня. Таке приведення значно спрощує процес обчислень при прогнозуванні. Зазвичай при визначенні залишкового ресурсу припускають, що показник ступеня функції a відомий. Його обчислюють раніше за статистичними даними зміни параметра і використовують при прогнозуванні, вважаючи, що для однойменних елементів він має постійне значення.

Коефіцієнт V_C фактично характеризуючий кут нахилу кривої залежності значення параметра від напрацювання до осі абсцис визначається в процесі прогнозування з урахуванням величини зміни параметра $U(t)$ даного елемента за певний відомий період часу напрацювання t . Залишковий ресурс елемента прогнозується від моменту діагностування t до граничної зміни параметра.

У зв'язку з тим, що функцію (3. 7) можливо досить широко використовувати при прогнозуванні ресурсу роботи деталей і вузлів устаткування, слід розглянути детальніше методику визначення показників цієї функції.

Якщо є дані про зміну параметра при його одноразовому вимірюванні й ця зміна відображається гладкою функцією, причому середнє квадратичне відхилення фактичної зміни параметра від функції $\sigma_Z < 0,05$, то для визначення показників використовують фактичні відхилення $u_i(t)$ параметрів 1-го елемента до моменту контролю:

$$u_i(t) = |П(t) - П_n|, \quad (3. 8)$$

де t – наробіток i -го елемента машини або вузла від початку експлуатації до моменту контрольного діагностування.

Показники $\Delta П$ і a функції (3. 7) визначаються таким чином. Дані вимірювань зміни параметра $u_i(t)$ записують в порядку збільшення напрацювання. Діапазон напрацювання розбивають на 6 – 8 інтервалів і для кожного інтервалу обчислюють середнє відхилення параметра u_1

($l = 1, 2 \dots, k$, де k – число інтервалів), а також середнє значення напрацювання. Набутих значень сполучають відрізками прямих і таким чином виходить ламана експериментальна крива 1 середньої зміни параметра елемента, як це показано на рис. 3. 6. Апроксимуючу функцію середньої зміни параметра характеризує крива 2.

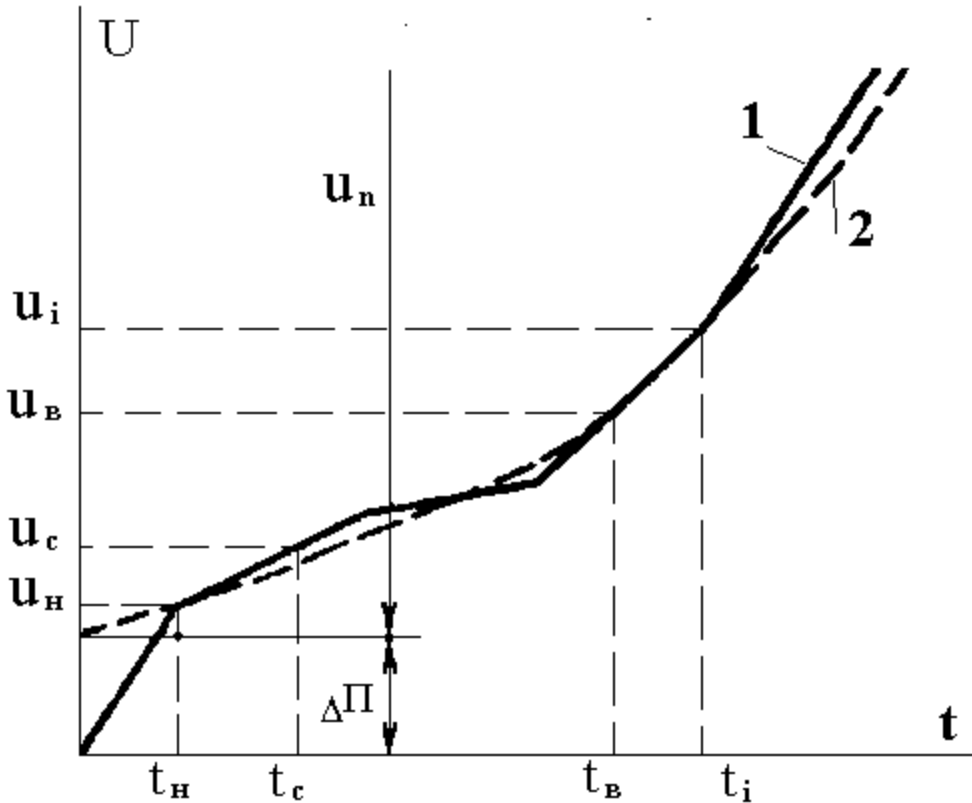


Рис. 3. 6. Побудова кривої середньої зміни параметра технічного стану.

Визначають точку максимального вигину кривої, що розділяє початковий період прироблення від періоду нормальної зміни параметра. Координати точки u_n, t_n позначають на осях графіку. Для визначення значення показника $\Delta\Pi$ на графіці обирають ще дві точки з координатами u_b, t_b і u_c, t_c . Координати u_b, t_b привласнюють точці перетину кривої 1 з верхньою межею третього або подальшого інтервалів напрацювання. Обчислюють координати точки t_c

$$t_c = \sqrt{t_n \cdot t_b}.$$

Після цього відкладають значення t на осі абсцис, проводять вертикальну пряму до перетину з кривою 1 і визначають координату цієї точки u_c на вісі ординат. Потім обчислюють $\Delta\Pi$ за формулою

$$\Delta\Pi = \frac{uv \cdot ub - (uc)^2}{ub + uc + 2uc}, \bullet$$

• Допускається знаходити величину $\Delta\Pi$ графічно по кривій 1. Показник ступеня α , характеризуючий зміну параметра, а також коефіцієнт V_C , відображаючий швидкість змінення параметру, обчислюють по точкам з координатами $u_{1l} = u_l$ — $\Delta\Pi$ й t_l по формулам:

$$\alpha = \frac{\sum_{l=2}^k (x_l - m_x)(y_l - m_y)}{\sum_{l=2}^k (x_l - m_x)^2}; \quad (3.9)$$

$$\ln V_C = m_y - \alpha m_x$$

де $x_l = \ln t$, $y_l = \ln u_{1l}$,

$$m_x = \frac{\sum_{l=2}^k x_l}{k-1}, \quad m_y = \frac{\sum_{l=2}^k y_l}{k-1}.$$

При визначенні значення α у разі відсутності періоду прироблення ($\Delta\Pi = 0$) враховують також точки в 1-му інтервалі напрацювання, тобто підсумовування починають від $l = 1$, а у вирази m_x і m_y замість $k - 1$ підставляють значення k .

У практиці прогнозування зазвичай зустрічається два випадки визначення залишкового ресурсу, що відрізняються початковими даними про параметр стану елемента, що діагностується. У 1-му випадку відомі напрацювання елемента від початку експлуатації і зміна параметра до моменту діагностування. У 2-му випадку напрацювання елементів невідоме, але є дані вимірювання параметрів при двох діагностуваннях і напрацюванні між цими діагностуваннями.

За відомими напрацюванням t і зміною параметра $u \{t\}$ до моменту діагностування (1-й випадок) залишковий ресурс елемента визначають за формулою

$$T_{\text{ЗАЛ}} = t \left(\alpha \sqrt{\frac{u_{\Pi}}{u(t)}} - 1 \right),$$

де $u(t)$ — обчислена зміна параметра до моменту діагностування; u_{Π} — гранична зміна параметра; t — наробка з початку експлуатації або проведення ремонту елемента.

Гранична зміна параметру

$$u_{\Pi} = \Pi_{\Pi} - \Pi_{\text{нач}},$$

де Π_{Π} – граничне значення параметра; $\Pi_{\text{нач}}$ – початкове значення параметра.

Часто після ремонту електричної машини або апарату експлуатаційному персоналу невідомо, які саме деталі й вузли були відремонтовані або замінені, у зв'язку з чим залишається невідомим напрацювання елемента, що діагностується (2-й випадок). Тоді прогнозування залишкового ресурсу проводять на підставі вимірювання величини параметра при двох діагностуваннях Π_1 і Π_2 і відомому напрацюванню t' між цими діагностуваннями. В цьому випадку залишковий ресурс визначають по формулі

$$T_{\text{зал}} = k_p t'_{\text{зал}}.$$

Значення k_p і t' обчислюють за виразами

$$k_p = \frac{1}{\sqrt[\alpha]{\frac{u''}{u'} - 1}} + 1;$$

$$t_{\text{ост}} = t' \left(\sqrt[\alpha]{\frac{u_{\Pi}}{u''}} - 1 \right), \quad (3.10)$$

де u' – зміна параметру, встановлена при 1-му діагностуванні ($u' = \Pi_1 - \Pi_{\text{Н}}$) при цьому береться абсолютна величина зміни; u'' – зміна параметру, встановлена при 2-му діагностуванні ($u'' = \Pi_2 - \Pi_{\text{Н}}$) також абсолютна величина зміни); t' – напрацювання між двома діагностуваннями.

Для спрощення процесу визначення остаточного ресурсу при експлуатації досить часто використовують декілько практичних номограм.

4 ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

Технології автоматизації процесів діагностики та моніторингу переважно оперують сигналами стану об'єктів. Це вимагає сталих уявлень про основні можливості виділення й обробки потрібної інформації, [26, 27].

У даному контексті основна увага приділена методам цифрової обробки сигналів. Цифрова обробка електричних сигналів (ЦОС) (нижче розглядаються тільки електричні сигнали, що не знижує спільності змісту, враховуючи різні датчики і перетворювачі) в даний час є крупним науково-технічним напрямом, пов'язаним з генерацією, передачею, прийомом, зберіганням і перетворенням інформації, що міститься в таких сигналах – електромагнітних коливаннях.

Технології ЦОС, засновані на таких процесорах, називають DSP-технологіями (від слів «Digital signal processing» або «digital signal processor»), що еквівалентно аббревіатурі ЦОС.

4. 1. Основні властивості й характеристики сигналів

Важливим чинником моніторингу є первинна інформація контрольованих об'єктів, що суттєво залежить від сигналів, що її відбивають. Тому властивості сигналів та можливості їх перетворень є важливою складовою організації ефективних процесів діагностики обладнання.

4. 1. 1. Класифікація й основні властивості сигналів

Як відмічено вище, електричний сигнал – це електромагнітне коливання, що несе в собі інформацію. Такі сигнали діляться на дві великі множини: детерміновані й стохастичні, випадкові. Детермінований сигнал можна передбачити у будь-який момент часу з вірогідністю 1; такі сигнали інформації не містять. Тільки випадкові сигнали несуть інформацію. До простих сигналів відносяться періодичні сигнали гармонійною і складнішою форм.

Важливе значення має ділення сигналів на два інші множини: аналогові і дискретні. Аналоговий (безперервний) сигнал $x(t) \in X$ має область визначення – інтервал T і область значень – континум. У дискретного сигналу область визначення – дискретна множина

значень аргументу t , а область значень може бути континуальною. Якщо дискретний сигнал квантується за рівнем, тобто представляється деяким числом із заданою кількістю розрядів, то він називається цифровим. Розрізняють сигнали одновимірні, тобто описувані функцією одного аргументу, – часу, багатовимірні, які є функціями двох та більш аргументів. Наприклад, яскравість зображення у фіксований момент часу – функція двох змінних, а рухомий образ описується функцією часу і трьох просторових координат. Сигнали можливо також класифікувати за призначенням, походженню, діапазону хвиль і т. п.

Для оцінки кількісних характеристик інформації сигналів служить поняття «ентропія», запропоноване К. Шенноном. Ентропія означає міру невизначеності ситуації (випадкової події, випадкової величини тощо) за умови, що загальне число результатів події кінцеве. Кількісно ентропія виражається числом

$$\varepsilon = -k \sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad (4.1)$$

де k – коефіцієнт, що враховує вибрану основу логарифма; p_i – вірогідність i -го результату; n – загальне число результатів.

Ентропія є досить зручною мірою, придатною для кількісної оцінки об'ємів інформаційних сигналів в кібернетиці, теорії інформації, теорії зв'язку, але не відображає їх змістовні складові. Тому важливим є аналіз їх фізичних характеристик.

До основних фізичних характеристик сигналу відносяться тривалість, потужність і спектр. Тривалість сигналу T_c пов'язана з кількістю відомостей, яка за інших рівних умов пропорційна тривалості. Миттєва потужність електричного сигналу пропорційна квадрату напруги або струму в одиничному опорі, тобто $u^2(t)$, $i^2(t)$.

Середня потужність може бути знайдена інтегруванням за часовим інтервалом. Зазвичай потужність сигналу оцінюють за рівнем її перевищення потужності перешкод

$$K_p = 10 \lg(P_c / P_n), \quad (4.2)$$

де K_p – рівень перевищення потужності P_c сигналу над потужністю перешкод P_n . Аналогічно (4.2) визначають й динамічний діапазон сигналу

$$D = 10 \lg (P_{c \max} / P_{c \min}). \quad (4.3)$$

Третій параметр сигналу – ширина спектру $P_{cп}$. Наступне співвідношення

$$V_3 = T_3 K_p P_{cп}, \quad (4.4)$$

називають об'ємом сигналу, що визначає необхідну місткість каналу передачі.

Первинні сигнали системи контролю надходять в аналоговій або цифровій формах, що вимагає врахування особливостей їх обробки.

4. 2. Обробка аналогових сигналів

Обробка аналогових сигналів становить важливу частину інформаційного забезпечення монітрінгу, що безпосередньо визначає характеристики його ефективності. Тому важливо розглянути технологічні особливості процесів обробки, що безпосередньо визначають показники якості.

4. 2. 1. Розкладання аналогового сигналу за системою ортогональних функцій

При аналізі сигналів використовують добре відомі положення, пов'язані з множинами й метричними просторами. Оскільки ряд цих положень корисний для розуміння завдань обробки дискретних сигналів, доцільно нагадати ці поняття спочатку для аналогових сигналів.

Розглянемо завдання зіставлення довільному сигналу з обмеженою енергією $x(t) \in L^2(T)$ (тут T – інтервал часу, $L^2(T)$ – лінійний простір функцій з інтегрованим квадратом) його чисельного уявлення. У загальному випадку сигнал може бути комплексним. Для цього уявлення необхідно вибрати деякий n -мірний підпростір $L^2(T)$. Хай $\{\varphi_i; i = 1 \dots, n\}$ – система лінійно незалежних функцій в $L^2(T)$, M_n – лінійний підпростір, натягнутий на ці функції. Тоді сигнал $x \in M_n$ може бути однозначно представлений у вигляді лінійної комбінації функцій $\{\varphi_i\}$:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i(t); x \in M_n, t \in T. \quad (4.5)$$

Множини чисел $a = \{a_1, a_2 \dots, a_n\}$ утворює шукане уявлення в C_n (простір комплексних чисел розмірності n), причому n вибирається компромісно з урахуванням точності й економічності уявлення.

Система функцій $\{\varphi_i; i = 1, 2 \dots, n\}$ називається ортогональною на інтервалі T , якщо

$$\left. \begin{aligned} \langle \varphi_i, \varphi_j \rangle &= \int \varphi_i(t) \varphi_j^*(t) dt = 0, \quad i \neq j \\ \langle \varphi_i, \varphi_i \rangle &= \|\varphi_i\|^2 \neq 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

У (4.6) через $\langle \cdot, \cdot \rangle$ позначений скалярний добуток функцій; $\|\cdot\|$ – норма функції; $*$ – комплексно зв'язана функція.

При нормі $\|\varphi_i\| = 1$ система функцій є ортонормованою, або ортонормальною.

Якщо коефіцієнти a_i визначаються за формулами

$$a_i = \frac{\int_T \varphi_i(t) \cdot \varphi^* j(t) dt}{\int_T \|\varphi\|^2 dt} = \frac{1}{\|\varphi\|^2} \int_T \varphi_i(t) \varphi^* j(t) dt, \quad (4.7)$$

то ряд

$$x(t) = \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i(t) \quad (4.8)$$

є узагальненим рядом Фур'є. Для нормованих функцій

$$a_i = \int \varphi_i(t) \varphi^* j(t) dt = \langle x, \varphi_i \rangle \quad (4.9)$$

та

$$x \sim x_n = \sum_{i=1}^n \langle x, \varphi_i \rangle \varphi_i, \quad (4.10)$$

де \sim – знак відношення еквівалентності.

Розглянемо середньоквадратичну помилку.

$$\Delta = \int_T \{x(t) - x_n(t)\}^2 dt = \int_T \left\{ x(t) - \sum_{i=1}^n \langle x, \varphi_i \rangle \varphi_i(t) \right\}^2 dt. \quad (4.11)$$

Диференціюючи (4.11) по a_i , – й прирівнюючи похідні нулю, отримуємо систему рівнянь, з якої знайдемо (4.9). Тобто коефіцієнти узагальненого ряду забезпечують $\min \Delta$, причому

$$\min \Delta = \left\| x - \sum_{i=1}^n \langle x, \varphi_i \rangle \varphi_i \right\|^2 \quad (4.12)$$

або

$$\min \Delta = \|\mathbf{x}\|^2 - \sum_i a_i^2 = \|\mathbf{x}\|^2 - \sum_i \langle \mathbf{x}, \varphi_i \rangle^2. \quad (4.13)$$

Так як $\min \Delta \geq 0$, квадрат норми

$$\|\mathbf{x}\|^2 \geq \sum_{i=1}^n \langle \mathbf{x}, \varphi_i \rangle^2. \quad (4.14)$$

Співвідношення (4.15) відоме як нерівність Бесселя, яка показує, що сума квадратів коефіцієнтів розкладання сигналу $\langle \mathbf{x}, \varphi_i \rangle$ обмежена для будь-якого $\mathbf{x}(t) \in L^2(T)$.

Неважко показати, що послідовність $\{x_n\}$ сходиться до \mathbf{x} , якщо $\{\varphi_i; i = 1, 2, \dots\}$ є повна ортонормальна система. Для такої системи нерівність Бесселя перетворюється в рівність

$$\sum_{i=1}^{\infty} \langle \mathbf{x}, \varphi_i \rangle^2 = \|\mathbf{x}\|^2, \quad \mathbf{x}(t) \in L^2(T). \quad (4.15)$$

Рівність Бесселя має енергетичний сенс, оскільки

$$\|\mathbf{x}\|^2 = \sum_{i=1}^{\infty} \langle \mathbf{x}, \varphi_i \rangle^2 = E, \quad (4.16)$$

де $\|\mathbf{x}\|^2$ – енергія сигналу на інтервалі T .

$$\|\mathbf{x}\|^2 = \left[\int_T |\mathbf{x}(t)|^2 dt \right]. \quad (4.17)$$

Середня потужність сигналу на інтервалі T

$$|\mathbf{x}(t)|^2 = \frac{E}{T} = \sum_{i=1}^{\infty} \langle \mathbf{x}, \varphi_i \rangle^2. \quad (4.18)$$

При розкладанні сигналу в ряд (4.8) (причому, може бути $n \rightarrow \infty$) корисно ввести поняття «Норми з вагою». При цьому скалярний добуток з вагою

$$\langle \varphi_i, \varphi_j \rangle_w = \int_T \varphi_i(t) \varphi_j(t) w(t) dt, \quad (4.19)$$

де $w(T)$ — ненегативна вагова функція; при $x = y$ отримаємо квадрат норми з вагою

$$\|\mathbf{x}(t)\|_w^2.$$

Введення вагової функції виправдовує себе, якщо з нею виходить краща міра погрішності наближення $\|\mathbf{X}\|_w \sim X_N$.

Вибір найбільш раціональної ортогональної системи функцій залежить від цілей, що переслідуються при розкладанні функції в ряд. Тут можливо виділити два напрями: точне розкладання на прості ортогональні функції й апроксимація сигналу, коли потрібно мінімізувати число членів ряду по заданій погрішності. При

гармонійному аналізі широко застосовують ряд Фур'є з експоненціальною або гармонійною базисною функцією φ_i для періодичних сигналів, коли $t \in (-\infty, \infty)$ і $w(t) = 1$. При цьому отримують дискретні спектри амплітуд і фаз сигналу (АЧХ і ФЧХ сигналу). Якщо у ряді Фур'є обмежити число членів N , то функція $x_N(t) \sim x(t)$ міститиме викиди й затухаючі коливання, що зветься явищем Гіббса. Це явище особливо важливе при розрахунку фільтрів, оскільки на практиці доводиться обмежувати ряд Фур'є за числом складових.

Окрім ряду Фур'є використовують розкладання сигналу за поліномами Лежандра, Чебишева, функціями Лагера, Лежандра, Чебишева, Уолша і ін. При цьому також може застосовуватися норма з вагою.

4. 2. 2. Перетворення Фур'є аналогового сигналу та його властивості

Для неперіодичного сигналу $x(t) \in L^2(T)$ гармонійний аналіз виконують за допомогою прямого перетворення Фур'є:

$$x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4. 20)$$

де $\omega = 2\pi f$ – кругова частота; f – циклічна частота.

При цьому інтеграл Фур'є

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (4. 21)$$

називають ще зворотним перетворенням Фур'є, Перетворення Фур'є існує, і зворотне перетворення дає $x(t)$, якщо виконується умова

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(\omega)| d\omega < \infty \quad (4. 22)$$

т. ч. функція $X(T) \in$ абсолютно інтегрована. Так як

$$x(\omega) = |x(\omega)| e^{j\psi\omega}, \quad (4. 23)$$

можливо виділити амплітудний спектр $|X(\omega)|$, або АЧХ і фазовий спектр $\psi(\omega)$ або ФЧХ. Неперіодичні сигнали мають суцільні спектри. Оператори перетворень Фур'є позначатимемо як $F[.]$ та $F^{-1}[.]$. Ці перетворення можливо представити в загальному вигляді як

$$x(t) = \int_T u(s) \cdot \varphi(s) ds, \quad t \in T; \quad (4. 24)$$

$$u(t) = \int_T \varphi(t, s) \cdot \theta(s) \cdot d, \quad s \in T, \quad (4.25)$$

де $s \in S$ – континуальна змінна; S – деякий інтервал дійсної осі частот.

В такому випадку інтегральні перетворення розглядають як перетворення з базисним ядром $\varphi(t, s)$ і зв'язаним базисним ядром $\theta(s, t)$. Якщо зв'язаний базис існує, то (4.24) і (4.25), що розглядаються спільно, є парою перетворень.

Для $T = (-\infty, \infty)$ та $S = (-\infty, \infty)$ базисні ядра

$$\varphi(t, s) = e^{j2\pi st}, \quad \theta(s, t) = e^{-j2\pi st} \quad (4.26)$$

породжують пару перетворень Фур'є. Ці ядра називають самозв'язаними, оскільки

$$\varphi(t, s) = \theta^*(s, t). \quad (4.27)$$

В якості прикладу знайдемо перетворення Фур'є періодичної послідовності $s(t)$ одиничних імпульсів (δ -функцій Дираку), показаних на рис. 4.1. Відзначимо, що функція $\delta(t)$ не є звичайною, а відноситься до класу розподілів Шварца або узагальнених функцій. У дужках на рис. 4.1 показана площа такої функції, прийнята за одиницю. Спочатку обмежимо $s(t)$ до $N+1$ імпульсів, рис. 4.2, позначивши обмежену послідовність через $s_N(t)$.

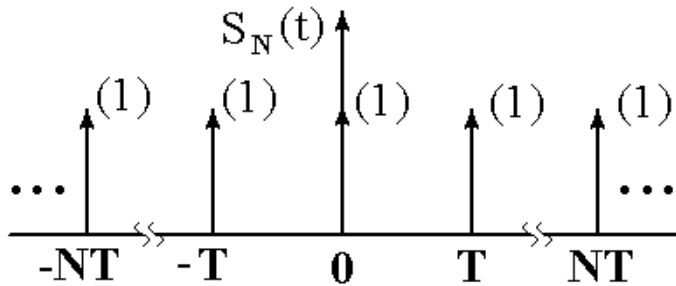


Рис. 4.1. Послідовність імпульсів

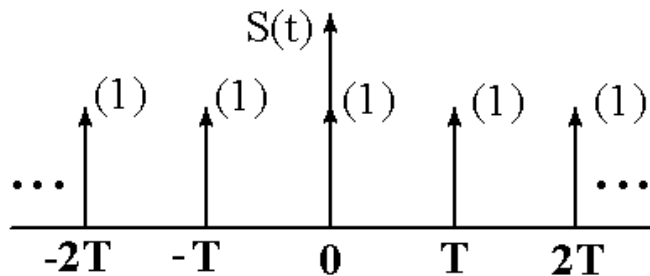


Рис. 4.2. Обмежена послідовність імпульсів

Перетворення Фур'є для даного випадку має вигляд

$$s_N(f) = F[s_N(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} s_N(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot dt = \left[\sum_{n=-N}^N e^{-j2\pi ft} \right] \cdot c = \\ = \sum_{n=-N}^N \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j2\pi ft} \cdot c \cdot dt = \sum_{n=-N}^N c \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j2\pi ft} \cdot dt. \quad (4.28)$$

Для інтегрування (4.28) використовується визначення δ -функції

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot g(t) \cdot dt = g(0). \quad (4.29)$$

яке досить суворо трактується в сенсі розподілів. Тоді вираз суми членів геометричної прогресії має вигляд

$$\sum_{n=-N}^N e^{-j2\pi ft} \cdot d = \frac{e^{-j2\pi f(-N)d} (1 - e^{-j2\pi f(2N+1)d})}{1 - e^{-j2\pi f d}} = \\ = \frac{\sin(2N+1)\pi f d}{\sin \pi f d}, \quad (4.30)$$

Графічне зображення (4.30) наведено на рис. 4.3 для випадку кінцевого $N = 3$.

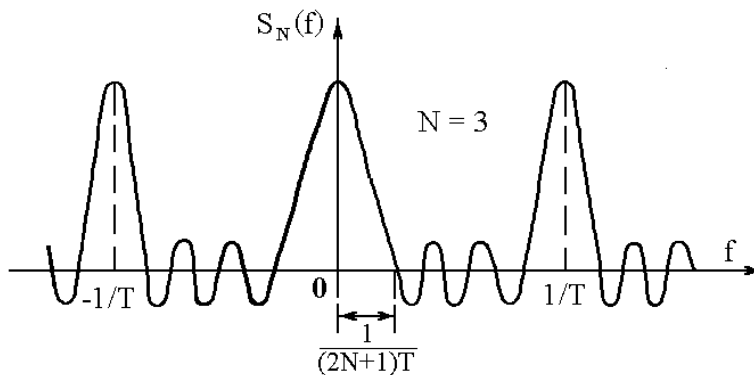


Рис. 4.3. Графік суми для $N = 3$.

Максимуми $s_N(f)$ розташовані на частотах, кратних $1/T$, а між ними знаходяться нульові значення на частотах, кратних $1/(2N+1)T$. При $N \rightarrow \infty$ функція $s_N(t) \rightarrow s(t)$. Для будь-якого N площа під кожною пелюсткою $s_N(f)$ дорівнює

$$\int_{-1/2T}^{1/2T} s_N(f) \cdot df = \int_{-1/2T}^{1/2T} \sum_{n=-N}^N e^{j2\pi ft} \cdot c \cdot df = \frac{1}{T} \quad (4.31)$$

Для $N \rightarrow \infty$ максимуми $s_N(f)$ зростають, коливання і тривалість пелюсток зменшуються. Таким чином своєрідний частокіл з імпульсів в часовій області (див. рис. 4.1) перетворюється в відповідний частокіл в частотній області, рис. 4.4, тобто

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT) \leftrightarrow \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f-\frac{n}{T}), \quad (4.32)$$

де двонаправлена стрілка позначає взаємну відповідність функції часу та її перетворення Фур'є. Цю відповідність можливо записати дещо по-іншому:

$$F[x(t)] = X(f); F^{-1}[X(f)] = x(t). \quad (4.33)$$

Як видно з рис. 4. 3, усікання ряду Фур'є до кінцевого числа членів $2N+1$ призводить до викидів в точках стрибків функції й коливань, що також можливо вважати явищем Гібса для послідовності сингулярних одиничних імпульсів.

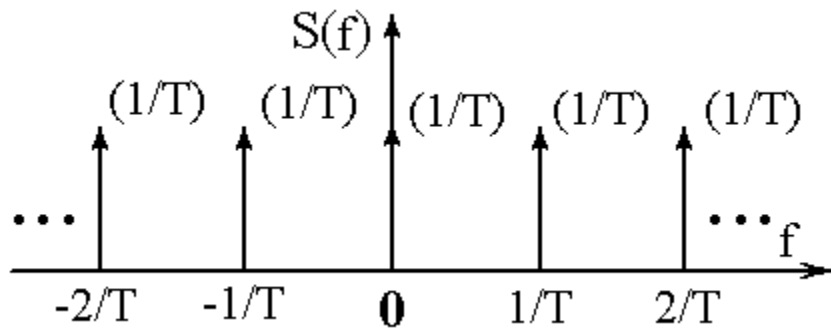


Рис. 4. 4. Функція в частотній області

Розглянемо основні властивості перетворень Фур'є аналогових сигналів. Доказ їх логічно витікає з визначення перетворень.

1. Лінійність. Якщо $x \leftrightarrow X$, то

$$ax_1(t) + bx_2(t) \leftrightarrow aX_1(\omega) + bX_2(\omega) \quad (4.34)$$

для всіх речовинних a і b .

2. Зрушення. Якщо $x \leftrightarrow X$, то

$$x(t - \tau) \leftrightarrow e^{j\omega\tau} X(\omega) \quad (4.35)$$

3. Множення на експоненту:

$$x(t) e^{-j\omega_0 t} \leftrightarrow X(\omega - \omega_0) \quad (4.36)$$

4. Множення на t :

$$t x(t) \leftrightarrow j \frac{d}{d\omega} F(\omega). \quad (4.37)$$

5. Інтегрування:

$$\int x(t) dt \leftrightarrow \frac{1}{j\omega} X(\omega). \quad (4.38)$$

6. Згортка функцій частоти

$$x_1(t) x_2(t) \leftrightarrow \int_{-\infty}^{\infty} X_1(\omega) X_2(\omega) d\omega \quad (4.39)$$

7. Згортка функцій часу

$$\int_{-\infty}^{\infty} x_1(t) x_2(t) dt \leftrightarrow X_1(\omega) X_2(\omega) \quad (4.40)$$

8. Теорема Парсеваля. Інтеграл

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) \cdot dt = E \quad (4.41)$$

фізично визначає енергію сигналу.

На підставі (4.39) при $x_1 = x_2$ отримаємо

$$Y(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) X(\omega) d\omega. \quad (4.42)$$

Якщо $\omega = 0$, то одержимо

$$Y(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)^2 d\omega. \quad (4.43)$$

Середня потужність за період періодичного сигналу відповідно до розкладання в ряд Фур'є визначається як

$$\|x\|^2 = \int_i a_i^2 \cdot \|a_i\|^2 d, \quad (4.44)$$

де $\|a_i\|^2 = T$ – період вхідної функції.

На основі (4.17) й (4.43) знаходимо

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)^2 d\omega. \quad (4.45)$$

Рівняння (4.45) називають теоремою Парсеваля, яка стверджує, що $X(\omega)$ може розглядатися як спектральна щільність енергії сигналу. При цьому норма сигналу (4.44), що визначає енергію сигналу, може бути виражена через відповідні складові АЧХ – енергію гармонік.

4.3. Математичний опис цифрових сигналів

Математичний опис цифрових сигналів теж є важливою й поширеною задачею в системах діагностики й моніторингу. Тому слід уважно розглянути найбільш поширені підходи до його реалізації. Слід зважати на те, що від коректності опису суттєво залежить достовірність результатів.

Основні співвідношення для спектрів

Спектри сигналів та їх спектральні характеристики несуть важливу узагальнену інформацію про технічний стан об'єктів діагностування та їх складових. Розглянемо основні підходи до реалізації зазначеного напрямку.

4.3.1. Теорема Котельникова

Якщо перетворення Фур'є функції $x(t)$ дорівнює нулю в деякій області частот, тобто

$$X(\omega) = 0 \text{ при } |\omega| > \omega_c,$$

то $x(t)$ може бути однозначно визначена своїми значеннями $x_n = x(n\pi/\omega_c)$, що утворюють послідовність рівно віддалених точок з відстанню π/ω_c між ними:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n \frac{\sin(\omega_c t - n\pi)}{\omega_c t - n\pi} \quad (4.46)$$

Слід зазначити, що початок координат $\omega = 0$ міститься в ненульовій частині початкового спектру.

Для доказу можливо використати зворотне перетворення Фур'є функції $X(\omega)$.

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

звідки

$$x_n = x\left(\frac{\pi \cdot n}{\omega_c}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} X(\omega) e^{jn\pi\omega/\omega_c} d\omega. \quad (4.47)$$

Так як $X(\omega) = 0$ при $|\omega| > \omega_c$ за умовою теореми, можливо побудувати періодичну функцію $\underline{X}(\omega)$ виду

$$\underline{X}(\omega) = X(\omega), \quad -\omega_c < \omega < \omega_c; \quad (4.48)$$

$$X(\omega + 2\omega_c) = \underline{X}(\omega). \quad (4.49)$$

Періодичну функцію (4.49) можливо розкласти у комплексний ряд Фур'є; після чого отримуємо

$$\underline{X}(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_k e^{jk2\pi\omega/\omega_c}, \quad (4.50)$$

де

$$X_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} X(\omega) e^{jk\omega/\omega_c} d\omega. \quad (4.51)$$

Значення функції

$$X_k = \frac{\pi}{\omega_c} \chi_k, \quad (4.52)$$

отже,

$$\underline{X}(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{\pi}{\omega_c} \chi_k e^{jk2\pi\omega/\omega_c}. \quad (4.53)$$

для всіх ω . Визначимо імпульс одиничної амплітуди $P_{\omega_c}(\omega)$ співвідношенням

$$P_{\omega_c}(\omega) = \begin{cases} 1 & |\omega| < \omega_c; \\ 0 & |\omega| > \omega_c. \end{cases} \quad (4.54)$$

При цьому

$$X(\omega) = P_{\omega_c}(\omega) \underline{X}(\omega) = P_{\omega_c}(\omega) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{\pi}{\omega_c} \chi_k e^{jk2\pi\omega/\omega_c}. \quad (4.55)$$

За визначенням зворотного перетворення Фур'є, відносно (4.55) з урахуванням (4.54), можливо знайти, що:

$$F^{-1} [P_{\omega_c}(\omega) e^{jk2\pi\omega/\omega_c}] = \frac{\omega_c}{\pi} \frac{\sin(\omega_c - \omega\tau)}{\omega_c - \omega\tau} \quad (4.56)$$

Підставляючи (4.56) в (4.53) і враховуючи (4.54), отримуємо рівність (4.46), що доводить теорему.

Крім чисто теоретичної якості теорема Котельникова, яку ще іноді називають теоремою відліків, або теоремою вибірок, має й низку важливих прикладних застосувань, зокрема, для розрахунку пристроїв в системах з імпульсною модуляцією, цифровою обробкою даних і т. ін.

4.3.2. Дискретне перетворення Фур'є

Для аналізу спектрів аналогових сигналів, розрахунку частотних характеристик і рішення інших задач, як показано вище, досить часто застосовують пряме й зворотне безперервні перетворення Фур'є. У разі дискретних сигналів при використанні машинних обчислень слід застосовувати дискретне перетворення Фур'є. Його особливості наступні.

Хай $g(t)$ – деяка аналогова функція, для якої існує пряме перетворення Фур'є :

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (4. 57)$$

Первинна функція може бути знайдена за допомогою зворотного перетворення Фур'є

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (4. 58)$$

Зазвичай функція $g(t)$ розглядається на деякому кінцевому інтервалі $0 < t < T$. Згідно теореми Котельникова спектр має вигляд

$$G(\omega) = 0 \text{ при } |\omega| > \omega_c \quad (4. 59)$$

і функція $g(t)$ може бути однозначно визначена вибіркою своїх значень в точках, відстоячих одна від одної на π/ω_c . Можливо довести, що перетворення Фур'є функції, побудованої за допомогою вибірок через кожні Δt , є періодичним в частотній області з періодом $2\pi / \Delta t$. Оскільки функцію $G(\omega)$ можна отримати з функції $\underline{G}(\omega)$, то функція $g(t)$ повністю визначається функцією вибірки $\underline{g}(t)$.

Припустимо, що задане N вибірок функції $g(t)$ і кожна вибірка зрушена по відношенню до сусідньої на Δt , з. Хай $t_k = k \Delta t$, де $k = 0, 1, 2 \dots, N-1$. Для простоти припустимо також, що $N = 2^\gamma$, де γ — ціле число. Вважаємо, що є N вибірок функції $G(\omega)$, кожна вибірка зрушена по відношенню до сусідньої на $\Delta\omega$ рад/с і $\omega_n = n \Delta\omega$, де $n = 0, 1 \dots, N-1$, При записі n проведено зрушення цього індексу з $[-N/2, N/2]$ на $[0, N-1]$. Це не обмежує загальність, оскільки зміна меж підсумовування відповідає зрушенню частоти; при цьому 0 відповідно переходить в $N/2$.

Вважаємо тепер $\Delta\omega = 2\pi / T$, оскільки $\Delta t = T / N$, то

$$\omega_n = n \Delta\omega = 2\pi n / T; \quad (4. 60)$$

$$t_k = k \Delta t = kT / N; \quad (4. 61)$$

$$\omega_n t_k = 2\pi nk / N \quad (4. 62)$$

Позначимо через $G(n) = G(\omega_n)$ й $g(k) = g(t_k)$. Враховучи (4. 60) – (4. 62) й позначення, з співвідношень (4. 57) і (4. 58) одержимо:

$$G(n) = \Delta t \sum_{k \in \Theta} X(k) e^{-j2\pi n k \Delta t}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1; \quad (4.63)$$

$$g(k) = \frac{\Delta \omega}{2} \sum_{n \in \Theta} X(n) e^{j2\pi n k \Delta t}, \quad 0, 1, \dots, N-1. \quad (4.64)$$

Вирази (4.63) й (4.64) являють пряме й зворотнє дискретні перетворення Фур'є (ДПФ).

Розглянемо основні властивості ДПФ.

1. Лінійність. Якщо $x \leftrightarrow X$, то

$$ax_1 + bx_2 \leftrightarrow aX_1 + bX_2 \quad (4.65)$$

для всіх речовинних a и b .

2. Зсув. Якщо $x \leftrightarrow X$, то

$$x(n-m) \leftrightarrow e^{-j\omega m} X(\omega). \quad (4.66)$$

3. Множення на експоненту:

$$x(n)e^{-j\theta n} \leftrightarrow X(\omega + \theta_n). \quad (4.67)$$

4. Множення двох послідовностей:

$$c(n) x(n) \leftrightarrow \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(\omega) C(\omega - \theta) d\omega \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(\omega) C(\omega) d\omega. \quad (4.68)$$

У правій частині (4.68) записана згортка функцій в частотній області й відмічена її комутативність.

5. Диференціювання:

$$-jn x(n) \leftrightarrow \frac{\partial X(\omega)}{\partial \omega}. \quad (4.69)$$

6. Зеркальне відображення:

$$x(-n) = X(-\omega). \quad (4.70)$$

7. Комплексне сполучення:

$$x^*(-n) = X^*(-\omega). \quad (4.71)$$

8. Речовинна й уявна частини:

$$\text{Re}[x(n)] \leftrightarrow \frac{1}{2} (X(\omega) + X^*(-\omega)); \quad (4.72)$$

$$\text{Im}[x(n)] \leftrightarrow \frac{1}{2} (X(\omega) - X^*(-\omega)) \quad (4.73)$$

9. Теорема Парсеваля. Хай

$$x(n) \leftrightarrow X(\omega); \quad w(n) \leftrightarrow W(\omega).$$

Тоді

$$\sum_n x(n)w^*(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(\omega)W^*(\omega) d\omega. \quad (4.74)$$

У разі $w(n) = x(n)$ з (4. 74) отримуємо рівність енергії суми добутків відліків сигналу і інтеграла від щільності енергії за період $-\pi < \omega < \pi$.

Всі властивості легко доводяться виходячи з визначення ДПФ.

4. 3. 3. Швидке перетворення Фур'є (ШПФ).

Неважко переконатися, що за допомогою ДПФ обчислюються частотні спектри сигналів за вибірками в часовій області. Крім того, вирішується й зворотне завдання – за частотними вибірками обчислюються часові. Проте об'єм обчислень досить великий. Дійсно, для знаходження прямого ДПФ $G(n)$ потрібно виконати N операцій множення комплексних чисел (4. 63). Для визначення всієї частотної вибірки довжиною N потрібний N^2 таких операцій. Аналогічна ситуація має місце із зворотним перетворенням. Виникає питання: чи можливо зменшити загальний об'єм обчислень в порівнянні з безпосереднім застосуванням виразів (4. 63) і (4. 64).

Припустимо, що число N дорівнює твору двох цілих чисел N_1 , і N_2 , тобто $N = N_1 N_2$. Тоді виразимо n і k в рівності (4. 63) і (4. 64) через N_1 і N_2 :

$$n = n_1 N_2 + n_0, \text{ где } \begin{cases} n_0 = 0, 1, \dots, N_2 - 1 \\ n_1 = 0, 1, \dots, N_1 - 1 \end{cases} \quad (4. 75)$$

$$k = k_1 N_2 + k_0, \text{ где } \begin{cases} k_0 = 0, 1, \dots, N_2 - 1 \\ k_1 = 0, 1, \dots, N_1 - 1 \end{cases} \quad (4. 76)$$

Тоді (4. 63) можливо переписати у вигляді

$$G(n) = \Delta t \sum_{k_0=0}^{N_2-1} \sum_{k_1=0}^{N_1-1} g(k_1 N_2 + k_0) e^{-j 2 \pi n (k_1 N_2 + k_0) / N}, \quad (4. 77)$$

де

$$g(k_0, k_1) = g(k) = g(k_1 N_2 + k_0). \quad (4. 78)$$

Експоненту в виразі (4. 77) легко перетворити до виду

$$e^{-j 2 \pi n (k_1 N_2 + k_0) / N} = e^{-j 2 \pi n k_0 / N} = e^{-j 2 \pi n_1 k_1 n_0 N_1 / N}. \quad (4. 79)$$

В результаті одержимо

$$G(n) = G(n_1, n_0) = \Delta t \sum_{k_0=0}^{N_2-1} \sum_{k_1=0}^{N_1-1} g(k_1 N_2 + k_0) e^{-j 2 \pi n_1 k_1 n_0 N_1 / N}, \quad (4. 80)$$

де

$$g_1(k_0, n_0) = \sum_{k_1=0}^{N_1} \sum_{k_2=0}^{N_2} \dots \sum_{k_{\gamma-1}=0}^{N_{\gamma-1}} g_1(k_0, k_1) \dots g_1(k_{\gamma-1}, n_0). \quad (4.81)$$

Визначимо число операцій, потрібних для обчислення $G(n)$ за формулами (4.80) і (4.81). У рівнянні (4.81) для кожного $g(k_0, k_1)$ потрібно виконати N_2 множень, а число всіх значень $g_1(k_0, n_0)$ складає N . Таким чином, для обчислення всієї множини $g(k_0, n^0)$ потрібні $N N_2$ операцій множення. З (4.80) витікає, що для обчислення множини $G(n)$, число елементів якої N , необхідно виконати (з урахуванням витрат обчислень на $g(k_0, n_0)$) $N(N_1 + N_2)$ операцій множення. Наприклад, якщо $N = 10000$, $N_1 = N_2 = 100$, добуток $N(N_1 + N_2) = 2 \cdot 10^6$; проте $N_2 = 10^8$, що є значно більше.

Такий процес можливо продовжити, розкладаючи N на більше число співмножників. Хай $N = N_1 \cdot N_2 \cdot \dots \cdot N_j$; тоді аналогічно попередньому можливо показати, що замість N_2 множень потрібно виконати $M = N(N_1 + N_2 + \dots + N_j)$ операцій множення. Якщо прийняти $N_1 = N_2 = \dots = N_j = 2$, то $N = 2^\gamma$ і $\gamma = \log_2 N$. В цьому випадку число операцій множення

$$M = \gamma \cdot 2 \cdot N = 2 \cdot N \log_2 N. \quad (4.82)$$

Для великого числа N такий процес обчислень істотно зменшується в порівнянні з безпосереднім обчисленням за (4.63). Виграш в об'ємі обчислень складає

$$N^2/M = N^2 / (2N \log_2 N) = N / (2 \log_2 N).$$

Все, що викладено стосовно прямого ДПФ, справедливо і для зворотного ДПФ. Якщо ДПФ виконується із застосуванням розглянутої методики зменшення кількості обчислювальних операцій, то саме такі ДПФ називають швидкими перетвореннями Фур'є (ШПФ). Таке перетворення досить широко застосовується при спектральному аналізі різних сигналів. Проте від застосування формул (4.63) і (4.64) з урахуванням $N_1 = N_2 = \dots = N_j$ до отримання результатів необхідно ще реалізувати алгоритми обчислень і відповідні програми.

4. 4. Аналіз в просторі станів

Аналіз в просторі станів дозволяє виділяти, розглядати й використовувати саме потрібну інформаційну складову системи технічної діагностики.

4. 4. 1. Рівняння стану цифрових систем

У загальному випадку довільна цифрова лінійна система порядку n описується різницеvim рівнянням n -го порядку:

$$a_n y(k+n) + a_{n-1} y(k+n-1) + \dots + a_1 y(k+1) + a_0 y(k) = b_m v(k+m) + b_{m-1} v(k+m-1) + \dots + b_1 v(k+1) + b_0 v(k),$$

де $v(k)$, $y(k)$ – відліки вхідного й вихідного сигналів; $a_0, a_1, a_n, \dots, b_0, b_1, b_m$ – коефіцієнти рівняння.

Замість цього рівняння частіше використовують систему n різницеvim рівнянь стану першого порядку; при цьому вважається, що система може мати декілька входів і виходів й в загальному випадку бути неінваріантною до зміщення в часі. Рівняння стану мають вигляд

$$x(k+1) = A_1(k) x(k) + B_1(k) v(k) \quad (4. 83)$$

і рівняння вхід-стан-вихід

$$y(k) = A_2(k) x(k) + B_2(k) v(k), \quad (4. 84)$$

де $\{v(k)\}$ – вхідна послідовність векторів; $\{y(k)\}$ – вихідна послідовність; $\{x(k)\}$ – послідовність векторів стану; A_1, B_1, A_2, B_2 – матричні коефіцієнти.

Якщо матричні коефіцієнти залежать від k , то система не стаціонарна; якщо вони постійні, то система стаціонарна і рівняння стану приймають вигляд:

$$x(k+1) = A_1 x(k) + B_1 v(k); \quad (4. 85)$$

$$y(k) = A_2 x(k) + B_2 v(k). \quad (4. 86)$$

Розглянемо однорідне нестаціонарне рівняння

$$x(k+1) = A_1(k) x(k). \quad (4. 87)$$

Якщо відомий початковий стан $x(0)$, то

$$X(1) = A_1(0) x_1 = A_1(1) A_1(0) x(0), \quad (4.88)$$

або в загальному випадку

$$x(k) = \prod_{i=0}^{k-1} A_1(i) x(0). \quad (4.89)$$

Визначимо дискретну перехідну матрицю стану за допомогою співвідношень

$$x(k) = \Phi(k, m) x(m), \quad (4.90)$$

$$\Phi(k, k) = 1, \quad (4.91)$$

де $\Phi(k, k)$ – перехідна матриця стану; 1 – одинична матриця.

З визначення перехідної матриці стану маємо

$$x(k) = \Phi(k, 0) x(0). \quad (4.92)$$

Порівнюючи (4.87) й (4.92), знаходимо

$$\Phi(k, 0) = \prod_{i=0}^{k-1} A_1(i), \quad k > 0. \quad (4.93)$$

Якщо $A_1(k)$ – постійна матриця, то

$$\Phi(k, 0) = \Phi(k) = A_1^k. \quad (4.94)$$

Вирази (4.93) і (4.94) визначають перехідну матрицю стану $\Phi(k, 0)$ або в загальному випадку $\Phi(k, m)$.

Можливо також довести, що перехідна матриця стану задовольняє умовам:

$$\begin{aligned} \Phi(k_2, k_2) \Phi(k_2, k_1) &= \Phi(k_3, k_1); \\ \Phi(k_1, k_2) &= (\Phi(k_2, k_1))^{-1}. \end{aligned} \quad (4.95)$$

У стаціонарному випадку для обчислення перехідної матриці стану можливо використовувати відомі теореми, наприклад теорему Келі – Гамільтона.

Приклад. Знайти $\Phi(k)$ для системи з дискретним часом, що описується рівнянням

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -4 & -5 \end{bmatrix} x(k)$$

Відповідно до теореми Келі – Гамільтона визначається матричний поліном

$$\Phi(k) = A_1^k = a_0 1 + a_1 A_1, \quad (4.96)$$

де a_0 і a_1 – невідомі коефіцієнти.

Власні значення матриці A_1^k дорівнюють

$$\lambda_1 = -1; \lambda_2 = -4.$$

Отже, власні значення матриці A_1^k дорівнюють
 $(\lambda_1)^k = (-1)^k; (\lambda_2)^k = (-4)^k.$

Тому

$$\begin{aligned} (\lambda_1)^k &= (-1)^k = a_0 + a_1 \lambda_1 = a_0 - a_1; \\ (\lambda_2)^k &= (-4)^k = a_0 + a_1 \lambda_2 = a_0 - 4a_1. \end{aligned}$$

Звідки знаходимо

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{4}{3}(-1)^k - \frac{1}{3}(-4)^k; \\ a_1 &= \frac{1}{3}(-1)^k - \frac{1}{3}(-4)^k. \end{aligned}$$

Отже, перехідна матриця станів

$$\Phi(k) = \begin{bmatrix} \frac{4}{3}(-1)^k - \frac{1}{3}(-4)^k & \frac{1}{3}(-1)^k - \frac{1}{3}(-4)^k \\ \frac{4}{3}(-1)^k - \frac{4}{3}(-4)^k & \frac{1}{3}(-1)^k - \frac{4}{3}(-4)^k \end{bmatrix}$$

Найдемо повне рішення дискретних рівнянь стану:

$$\begin{aligned} x(1) &= A_1(0) x(0) + B_1(0) v(0) \\ x(2) &= A_1(1) x(1) + B_1(1) v(1) = A_1(1) A_1(0) x(0) + A_1(1) B_1(0) v(0) + \\ & B_1(1) v(1), \end{aligned}$$

звідки видно, що

$$x(k) = \prod_{i=0}^{k-1} A_1(i) x(0) + \sum_{i=0}^{k-1} \left[\prod_{j=0}^{k-1} A_1(j) \right] B_1(i) v(i), \quad k = 1, 2, \dots \quad (4.97)$$

За визначенням перехідної матриці станів одержимо

$$x(k) = \Phi(k) x(0) + \sum_{i=0}^{k-1} \Phi(k-i-1) B_1(i) v(i) \quad (4.98)$$

й вихідне рівняння

$$\begin{aligned} y(k) &= A_2(k) \Phi(k) x(0) + \sum_{i=0}^{k-1} \Phi(k-i-1) A_2(k-i) \\ & \times B_1(i) v(i) + B_2(k) v(k). \quad (4.99) \end{aligned}$$

Якщо система стаціонарна, то ці рівняння приймають вигляд:

$$x(k) = \Phi(k) x(0) + \sum_{i=0}^{k-1} \Phi(k-i-1) B_1(i) v(i); \quad (4.100)$$

$$y(k) = A_2 \Phi(k) x(0) + A_2 \sum_{i=0}^{k-1} \Phi(k-i-1) B_1 v(i) + B_2 v(k). \quad (4.101)$$

Розглянемо лінійну стаціонарну систему дискретного часу, для якої $B_2 = 0$ і $x(0) = 0$. Рівняння для вихідний змінної матиме вигляд

$$y(k) = \sum_{i=0}^{k-1} A_2^{k-i-1} B_1 v(i). \quad (4.102)$$

Позначимо

$$H(k) = A_2^{k-1} B_1 v(i), \quad (4.103)$$

то (4.102) можливо записати як

$$y(k) = \sum_{i=0}^{k-1} H(k-i) v(i) \quad (4.104)$$

або при $j = k-i$

$$y(k) = \sum_{j=0}^{k-1} H(j) v(k-j). \quad (4.105)$$

Вираз (4.105) називають сумою згортки, або коротше згорточною системи. За властивостями вона аналогічна інтегралу згортки системи з безперервним часом. Коефіцієнт $H(k-i)$ в (4.104) визначає вагу вхідної функції $v(i)$ при $i = 0, 1, \dots, k-1$ у утворенні вихідного сигналу $y(k)$ в момент k . Тому можливо говорити про послідовність $\{H(k)\}$ як вагову послідовність системи. На відміну від введених раніше скалярних функцій $h(k)$ і згортки тут використано аналогічні матричні функції, що відображають декілька входів і виходів.

4.4.2. Частотні характеристики цифрової системи

Розглянемо систему з одним входом та виходом. Хай вхідна послідовність сигналу $v(k)$ має вигляд

$$v(k) = e^{j\omega k}, \quad -\infty < k < \infty. \quad (4.106)$$

Маючи імпульсну характеристику, можливо знайти вихідний сигнал з допомогою згортки:

$$y(k) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} H(k-l) v(l) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} H(l) e^{j\omega(k-l)}. \quad (4.107)$$

Або (4.107) можливо записати у вигляді

$$y(k) = e^{j\omega k} \sum_{l=-\infty}^{\infty} H(l) e^{-j\omega l} = H(e^{j\omega}) v(k), \quad (4.108)$$

де $H(e^{j\omega})$ – комплексна передаточна функція цифрової системи:

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) e^{-j\omega k}. \quad (4.109)$$

Модуль наведеної функції $|H(e^{j\omega})|$ визначає амплітудно-частотну характеристику (АЧХ), а аргумент $\arg H(e^{j\omega})$ – фазочастотну характеристику (ФЧХ).

Приклад. Обчислити частотні характеристики системи, різницеве рівняння якої має вигляд

$$y(k) = ay(k-1) + v(k), \quad |a| < 1$$

з початковою умовою $y(-1) = 0$.

Знаходимо імпульсну характеристику системи $h(k)$.

Якщо $v(k) = \delta(k)$, то

$$y(k) = ay(k-1) + \delta(k).$$

З цього співвідношення одержимо

$$y(0) = ay(-1) + \delta(0),$$

$$y(k) = ay(k-1), \quad k \geq 1,$$

або

$$y(1) = a; \quad y(2) = a^2; \quad \dots, \quad y(k) = a^k.$$

За визначенням

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) e^{-j\omega k} = \sum_{k=0}^{\infty} a^k e^{-j\omega k} = \sum_{k=0}^{\infty} (ae^{j\omega})^k.$$

Цей вираз – сума членів геометричної прогресії, тому

$$H(e^{j\omega}) = \frac{1}{1 - ae^{-j\omega}} = \frac{1}{1 - a \cos \omega + ja \sin \omega}.$$

Звідки одержимо АЧХ

$$|H(e^{j\omega})| = (1 + a^2 - 2a \cos \omega)^{1/2}$$

й ФЧХ

$$\arg H(e^{j\omega}) = - \arctg \left(\frac{a \sin \omega}{1 - a \cos \omega} \right).$$

Функція $H(e^{j\omega})$ – періодична функція частоти з періодом 2π . Це обумовлено тим, що вхідна послідовність з частотою $\omega + 2m\pi$, $m = \pm 1, \pm 2, \dots$ не відрізняється від вхідної послідовності з частотою ω . Унаслідок періодичності функції $H(e^{j\omega})$ рівняння (4.109) можна розглядати як розкладання цієї функції в ряд Фур'є, при чому коефіцієнти розкладання представляють відліки імпульсної характеристики $h(k)$. Ці коефіцієнти відображаються через $H(e^{j\omega})$ таким чином:

$$h(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(e^{j\omega}) e^{j\omega k} d\omega. \quad (4. 110)$$

Рівняння (4. 109) і (4. 110) визначають пару перетворень Фур'є. Вони справедливі для довільної послідовності сигналів, наприклад, для вхідної послідовності імпульсів

$$v(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} V(e^{j\omega}) e^{j\omega k} d\omega, \quad (4. 111)$$

де

$$V(e^{j\omega}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} v(k) e^{-j\omega k}. \quad (4. 112)$$

Оскільки реакцією системи на послідовність (4. 106) є згідно (4. 109) добуток $H(e^{j\omega}) e^{j\omega k}$, то реакцію на довільну послідовність (4. 111) з урахуванням лінійності системи можливо записати у вигляді

$$y(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(e^{j\omega}) V(e^{j\omega}) e^{j\omega k} d\omega, \quad (4. 113)$$

де

$$Y(e^{j\omega}) = H(e^{j\omega}) V(e^{j\omega}). \quad (4. 114)$$

З (4. 114) витікає властивість дискретних систем, аналогічна властивості безперервних систем: згортці в часовій області (4. 107) відповідає множення функцій (4. 114) в частотній області.

У ряді випадків спектральний склад послідовності $h(k)$ виражається в одиницях частоти, пов'язаної з інтервалом дискретизації T . В цьому випадку рівність (4. 109) і (4. 110) перетворюються до вигляду:

$$H(e^{j\omega T}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) e^{j\omega k T}. \quad (4. 115)$$

$$h(kT) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(e^{j\omega T}) e^{j\omega k T} d\omega. \quad (4. 116)$$

Функція $H(e^{j\omega T})$ періодична за частотою з періодом $2\pi/T$.

Частотні характеристики дискретної системи (наприклад фільтру) зазвичай співпадають (можливо з точністю до постійного множника) з характеристиками деякої аналогової системи. Тому дискретну систему можливо реалізувати шляхом дискретизації її імпульсної характеристики. Це повністю аналогічно процесу дискретизації аналогового сигналу, розглянутому раніше. Аналогічно, якщо $h(t)$ –

імпульсна характеристика аналогової системи, то її також можливо помножити на модулюючу функцію

$$m(t) = T \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT).$$

Далі отримуємо перетворення Фур'є дискретизованої функції і співвідношення

$$h^*(t) \leftrightarrow H(\omega - k\omega_T), \quad (4. 117)$$

де $h^*(t)$ – дискретизована імпульсна функція, а $H(\omega - k\omega_T)$ – передаточна функція такої системи.

В правій частині (4. 117) записана періодична функція с періодом по частоті $\omega_T = 2\pi/T$, яка повторює передаточну функцію $H(\omega)$ аналогової системи, т. ч.

$$H(e^{j\omega T}) = H(\omega - k\omega_T) \quad (4. 118)$$

Частотні характеристики відповідних цифрових і аналогових систем співпадають в діапазоні частот $|\omega| \leq \pi / T$, коли $H(\omega) \approx 0$ для $|\omega| > \pi / T$. Однак дискретизація призводить до того, що частотні характеристики цифрових систем є періодичними, з періодом $2\pi / T$ повторюють характеристики аналогових систем. Можливо довести, що якщо передаточні функції цифрової й аналогової систем пов'язані співвідношенням (4. 118), то імпульсні характеристики цих систем однакові в дискретних точках $t = kT$.

4. 5. Z – перетворення

Для алгебраїзації лінійних диференціальних рівнянь досить часто застосовують перетворення Лапласа, що суттєво полегшує рішення таких рівнянь. Таку ж саму роль відіграє й z–перетворення стосовно різницевого рівнянь.

4. 5. 1. Основні визначення й властивості

Якщо $x(t)$ – аналоговий сигнал, то його вибірки знаходяться за допомогою модулюючої функції

$$m(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT).$$

Тут множник T опущений, оскільки він впливає тільки на масштаб змінних. При цьому

$$x^*(t) = m(t) x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) \delta(t-k) \quad (4.119)$$

для $x(t) \neq 0$ при $k \geq 0$ і $k < 0$. Дво- і одностороннє перетворення Лапласа мають вигляд:

$$x_{II}^*(p) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) e^{-kpT} \quad (4.120)$$

$$x_{I}^*(p) = \sum_{k=0}^{\infty} x(k) e^{-kpT} \quad (4.121)$$

Оскільки у рівностях (4.120) і (4.121) присутній множник e^{pT} , тому зручно ввести нову комплексну змінну

$$z = e^{pT}. \quad (4.122)$$

Тоді перетворення Лапласа матимуть вигляд

$$x_{II}^*(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) z^{-k}; \quad (4.123)$$

$$x_{I}^*(z) = \sum_{k=0}^{\infty} x(k) z^{-k} \quad (4.124)$$

Ці рівняння відповідно визначають дво- і одностороннє z -перетворення послідовностей:

$$\{x(k)\} = \{\dots, x(-2), x(-1), 0, x(1), x(2), \dots\};$$

$$\{x(k)\} = \{0, x(1), x(2), \dots\},$$

Змінну z^{-1} можливо розглядати як оператор затримки сигналу на час T , так як в перетворенні Лапласа множник e^{pT} відповідає затримці.

Слід розглянути деякі властивості статичних рядів від комплексної змінної z . Хай комплексна функція є аналітичною в крузі S_0 з центром z_0 і радіусом r_0 . Тоді в кожній точці z цього круга ряд Тейлора

$$f(z) = f(z_0) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{f^{(k)}(z_0)}{k!} (z-z_0)^k \quad (4.125)$$

сходиться до $f(z)$. Максимальний радіус круга, в середині якого функція є аналітичною, співпадає з відстанню від z_0 до ближньої особливої точки, – полюсу. Коло максимального радіусу називається колом збіжності ряду.

Хай S_1 і S_2 – концентричні кола з радіусами r_1 і r_2 ($r_1 > r_2$) і центром в точці z_0 . Якщо $f(z)$ є аналітичною функцією на колах S_1 і S_2

і в кільці між ними, то в кожній точці z з цієї області $f(z)$ можна розкласти в ряд Лорана, що сходиться в околиці точки z_0 :

$$f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k (z-z_0)^k + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_k}{(z-z_0)^k}, \quad (4.126)$$

де

$$a_k = \frac{1}{2\pi i} \int_C \frac{f(z) dz}{(z-z_0)^{k+1}}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

$$b_k = -\frac{1}{2\pi i} \int_C f(z) (z-z_0)^{k-1} dz, \quad (k = 1, 2, \dots)$$

Ряд Тейлора є окремим випадком ряду Лорана, якщо все $b_k = 0$. Це має місце, якщо функція $f(z)$ є аналітичною в крузі S_2 .

В якості шляху інтегрування можливо узяти будь-яку замкнуту криву в кільці. Тоді ряд Лорана можна записати у вигляді

$$f(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_k (z-z_0)^k, \quad r_2 > |z-z_0| > r_1,$$

де

$$A_k = \frac{1}{2\pi i} \int_C \frac{f(z) dz}{(z-z_0)^{k+1}}, \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

Таким чином, одностороннє z -перетворення є головною частиною ряду Лорана

$$f_I(z) = f(0) + f(1)z^{-1} + f(2)z^{-2} + \dots \quad (4.127)$$

у околиці точки $z = 0$ плюс $f(0)$. Воно сходиться в зовнішній частині деякого кола з центром на початку координат.

Двостороннє z -перетворення також визначає ряд Лорана в околиці точки $z = 0$ і сходиться в кільці. Нижче розглядатимемо одностороннє z -перетворення і не писатимемо індекс I . Наприклад, послідовність $1, a, a^2, a^3, \dots$ має одностороннє z -перетворення

$$F(z) \approx 1 + a + a^2 + a^3 \dots \approx \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cdot z^{-k}.$$

Застосовуючи формулу суми геометричної прогресії, маємо

$$F(z) = 1/(1 - az^{-1})$$

при $|z| > |a|$. Оскільки ряд сходиться при всіх z , для яких $|z| > |a|$, радіус абсолютної збіжності дорівнює $|a|$. Властивості z -перетворення, аналогічні властивостям перетворення Лапласа, надані нижче.

Властивості одностороннього z -перетворення:

I. Лінійність:

$$ax(k) + by(k) \leftrightarrow aX(z) + bY(z).$$

2. Зсув:

$$x(k+1) \leftrightarrow z(X(z) - x(0)).$$

3. Затримка:

$$x(n-N) \text{ u } (k-N) \leftrightarrow z^{-N} X(z),$$

де $u(\cdot)$ – дискретна одинична сходинка.

4. Множення на a^k :

$$a^k x(k) \leftrightarrow X(a^{-1}z)$$

5. Множення на k :

$$k x(k) \leftrightarrow -z(dX(z)/dz).$$

6. Згортка:

$$x(k) \text{ u } (k) * h(k) \text{ u } (k) = \sum_{n=0}^k x(n)h(k-n) \leftrightarrow X(z)H(z).$$

7. Зрушення:

$$x(k-1) \leftrightarrow z^{-1} X(z) + x(-1) + x(-1+1)z^{-1} \dots + x_l(-1)z^{-(l+1)}.$$

8. Випереджаюче зрушення:

$$x(k+m) = z^m X(z) - x(0)z^m - x(1)z^{m-1} - \dots - x^{m-1}z,$$

при $m=1 \Rightarrow z X(z) - x(0)z$.

Зворотнє z -перетворення визначається як

$$f(k) = \frac{1}{2\pi j} \oint_C F(z) z^{k-1} dz, \quad (4.128)$$

де C — коло радіусу, більшого ніж радіус абсолютної збіжності. У середині цього кола містяться всі особливості функції $z^{k-1} F(z)$. Інтеграл (4.128) найлегше обчислюється за допомогою теореми про вирахування:

$$f(k) = \sum \text{Res} z^{k-1} F(z)$$

4.5.2. Передаточна функція в z -області

Розглянемо різницеве рівняння порядку n :

$$\sum_{k=0}^n b_k \cdot y(k-i) = \sum_{k=0}^m a_k \cdot v(k-i). \quad (4.129)$$

Застосовуючи z -перетворення за нульових початкових умов, отримуємо

$$\sum_{k=0}^n b_k \cdot z^{-1} Y(z) = \sum_{k=0}^m a_k \cdot z^{-1} V(z).$$

Звідки передавальна функція цифрової системи на комплексній z -області має вигляд

$$H(z) = \frac{Y(z)}{V(z)} = \frac{\sum_i a_i z^{-i}}{\sum_i b_i z^{-i}}, \quad (4.130)$$

або

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}}{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}} \quad (4.131)$$

Таким чином, разом з передавальною функцією в частотній області $H(e^{j\omega})$ цифрову систему можливо зобразити в z -області. При цьому

$$H(z) \Big|_{z=e^{j\omega}} = H(e^{j\omega}). \quad (4.132)$$

Розглянемо умову стійкості цифрової системи в z -області. Хай система описується рівнянням (4.131) при $m < n$. Розкладемо поліноми в чисельнику і знаменнику на співмножники першого порядку:

$$H(z) = H_0 \frac{\prod_{i=1}^m (z - z_{0i})}{\prod_{i=1}^n (z - z_i)}, \quad (4.133)$$

де H_0 – постійний множник; z_{0i} і z_i – відповідно нулі й полюси системи.

Тепер розкладемо (4.133) на прості дроби:

$$H(z) = d_0 + \frac{d_1}{1 - z_1 z^{-1}} + \frac{d_2}{1 - z_2 z^{-1}} + \dots + \frac{d_n}{1 - z_n z^{-1}}, \quad (4.134)$$

де $d_0 = H_0$ при $n = m$; $d_0 = 0$ при $n > m$.

$$d_i = [(1 - z_i z) H(z)]_{z=z_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Імпульсна характеристика, відповідна (4.134),

$$h(k) = Z^{-1} [H(z)], \quad (4.135)$$

де Z^{-1} — оператор зворотного z -перетворення, або

$$h(k) = Z^{-1} [d_0] + \sum_{i=1}^n d_i z_i^k, \quad (4.136)$$

де

$$\sum_{i=1}^n d_i z_i^k = d_i z_i^k. \quad (4.137)$$

Отже, імпульсна характеристика при простих полюсах

$$h(k) = d_0 \delta(k) + [d_1 z_1^k + d_2 z_2^k + \dots + d_n z_n^k] l(k). \quad (4. 138)$$

Якщо $|z_i| < 1$, $i = 1, 2, \dots, n$, то $\sum_{k=-\infty}^{\infty} |h(k)| < \infty$, що означає стійкість системи, якщо всі полюси розташовані усередині круга одиничного радіусу в площині z .

Різницеві рівняння можна вирішувати за допомогою z -перетворення. Знайдемо передавальну функцію стаціонарної системи, застосовуючи z -перетворення до рівнянь стану, тобто різницеvim рівнянням першого порядку. В цьому випадку з (4. 98) і (4. 99) витікає:

$$x(k + 1) = A_1 x(k) + B_1 v(k); \quad (4. 139)$$

$$y(k) = A_2 x(k) + B_2 v(k). \quad (4. 140)$$

Застосовуючи z -перетворення до (4. 139) і (4. 140), одержимо:

$$zX(z) - z x(0) = A_1 X(z) + B_1 v(z); \quad (4. 141)$$

$$Y(z) = A_2 X(z) + B_2 V(z). \quad (4. 142)$$

При нульових початкових умовах

$$X(z) = (z1 - A_1)^{-1} B_1 V(z), \quad (4. 143)$$

$$Y(z) = [A_1(z1 - A_1)^{-1} B_1 + B_2] V(z). \quad (4. 144)$$

Матрична передаточна функція

$$H(z) = A_1(z1 - A_1)^{-1} B_1 + B_2. \quad (4. 145)$$

Для системи з одним входом і одним виходом (4. 145) є z -перетворення імпульсної характеристики

Приклад. Для системи, що описується різницеvim рівняннями

$$x_1(k + 1) = x_2(k), \quad x_2(k + 1) = -b_1 x_2(k) - b_2 x_1(k) + v(k)$$

й вихідним рівнянням

$$y(k) = (a_2 - a_0 b_2) x_1(k) + (a_1 - a_0 b_1) x_2(k) + a_0 v(k)$$

знайти передавальну функцію $H(z)$.

Для вирішення по заданих рівняннях складаємо матричні коефіцієнти:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b_2 & -b_1 \end{bmatrix}; B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Передаточна функція (4. 145) прийме вигляд

$$A_2 = |a_2 - a_0 b_2 a_1 - a_0 b_1|; B_2 = a_0.$$

Слід зазначити, що інформаційне забезпечення має надто важливе значення для діагностики обладнання. Особливу увагу приділяють його достовірності.

Формування відповідної інформаційної складової системи моніторингу є в своїй основі об'єктнозорієнтованим й має надавати максимально достовірну інформацію про технічний стан контрольованого обладнання. Тому зазначений процес може проходити ряд рівнів вдосконалення, переважно за наступною схемою, рис. 4. 5.

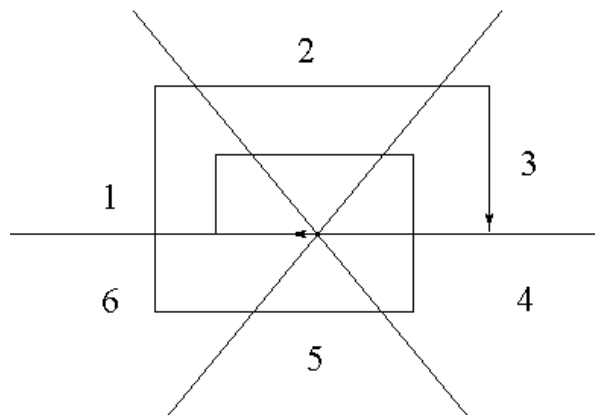


Рис. 4. 5. Модель формування інформаційної складової моніторингу: 1 – формування завдань; 2 – системний рівень; 3 – деталізація; 4 – тестування; 5 – оцінка адекватності; 6 – апаратна, програмна й інформаційна реалізація.

Показана спіральна конструкція відображає можливості корегування системи на основі досвіду практичного використання й підвищення її ефективності.

Таким чином розглянуто основні теоретичні компоненти, складові, особливості діагностування обладнання й технологічних ланок, базис побудови діючих систем моніторингу споруд та енергетичних перетворювачів ГЕС.

5. ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГЕС

Система контролю й моніторингу ГЕС зорієнтована на забезпечення надійності роботи встановленого енергетичного обладнання та його мобільності, що витікає з системної ролі гідроенергетики.

Основними об'єктами контролю та управління в гідроенергетиці є ГЕС або ГАЕС, що складаються зі споруд та окремих гідроагрегатів, рис. 5. 1.

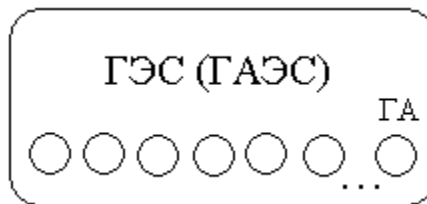


Рис. 5. 1. Загальна структура об'єкту контролю

Споруди переважно зорієнтовані на формування потрібних гідроенергетичних характеристик поточного забезпечення енергетичних перетворювачів у вигляді гідроагрегатів. Вони в своєму складі мають елементи, що потребують догляду за станом. Так, відносно гребель важливими перш за все є такі, що забезпечують їх функціональну надійність: контроль основних діючих, в тому числі й гідростатичних навантажень, гідрологічних, напружених станів, геологічної основи, аналіз зміни епюри фільтраційного протитиску основних конструктивних елементів тощо. Все це визначає необхідні обсяги потрібного оснащення та наявність відповідних методик й організації досліджень.

За сучасними уявленнями, оскільки ризик аварій ніколи не може бути повністю виключений, система контролю повинна бути максимально пристосована до того, щоб ефективно виконувати свої функції не тільки при нормальній роботі споруд, але і в надзвичайних умовах. При цьому має бути досить повно і точно визначений початковий стан споруд. Однак у ряді випадків ще залишається практично невизначеним сучасний напружений стан дамб і відсутній ефективний контроль за його змінами. Невідомо, як проявляється

арочний ефект у водозливній дамбі і як він впливає на її напружений стан, а також чи не має місця концентрація напруги над зонами тектонічного дроблення скельного масиву основи й зонами різких змін відміток підшови дамби.

Загальний контроль і управління ГЕС реалізується системою Централог. Вона, у свою чергу має декілька рівнів ієрархії.

Гідроагрегат, будучи базовим гідроенергетичним перетворювачем енергії, у свою чергу також є основним об'єктом управління, рис. 5. 2.

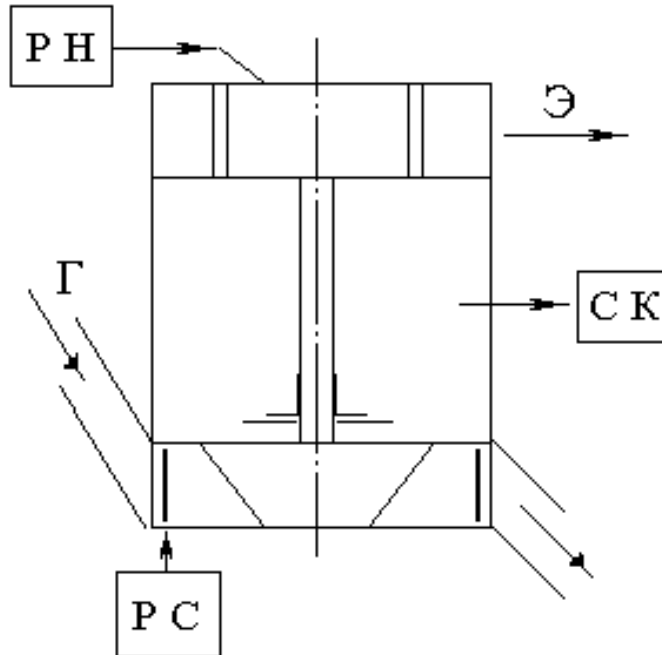


Рис. 5. 2. Агрегатний рівень управління

Система управління і контролю гідроагрегату (ГА) включає регулятор напруги (РН), регулятор швидкості (РС) і системи контролю (СК) стану обладнання.

Системи управління ГА індивідуальні і утворюють початковий рівень ієрархії управління. Наступний рівень відноситься до ГЕС або ГАЕС. Існує також каскадний рівень керування і рівень компетенції центрального диспетчерського управління (ЦДУ) енергетичної системи, рис. 5. 3.

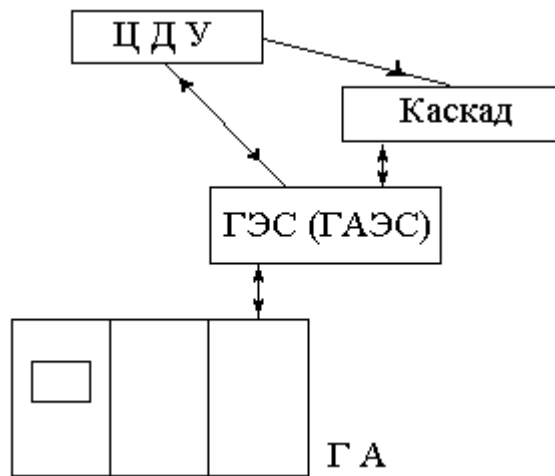


Рис. 5. 3. Ієрархія управління гідроенергетичними об'єктами.

На рівні базовому контроль і управління збудженням гідрогенератора реалізується системою UNITROL.

Загальна структура системи контролю й моніторингу ГЕС наведена в додатках.

5. 1. Система контролю і управління ГЕС

Сучасні системи управління гідроенергетичними об'єктами за можливостями самої системи, виходячи з показань різних приладів, контролюючих рівні верхнього і нижнього б'єфів, а так само витрат води через агрегат, здатні встановлювати по можливості найбільш економічний режим, як для агрегату, так і для водосховища.

Для забезпечення якнайповнішого контролю агрегату необхідно щоб система контролю й моніторингу гідроагрегату відповідали за функціональними можливостями. Інакше при роботі вимірювальних органів можуть траплятися і накопичуватися поточні помилки, які спричиняють похибки, відповідні рішення, відмови й неправильну роботу органів управління: зупинки, зміни швидкості і т. п.

Системи управління, що встановлені на станціях Дніпровського каскаду, при моніторингу гідроенергетичного обладнання працюють, не аналізуючи причин що викликали, наприклад, зупинку агрегату, що не додає їм функціональної гнучкості та призводить до втрат.

Сучасна автоматична система технічної діагностики, ґрунтуючись на даних отриманих в реальних умовах та на даних отриманих за результатами моделювання ситуацій, здатна виявити розвиток майбутньої аварії на початковій її стадії, що безумовно надає суттєві

переваги. Основне завдання при розробці такої системи отримати потрібні залежності, наприклад температури холодного повітря системи охолодження гідрогенератора від внутрішнього стану охолоджувача, тобто – виявити дефекти й причини, що викликали їх.

Використання такої системи має дозволяти суттєво збільшити термін служби основного енергетичного обладнання, зменшити вірогідність безпричинних зупинок агрегатів тим самим, зменшуючи собівартість електроенергії, дозволити наблизитися до нової інтелектуальної системи управління нового покоління.

5. 2. Ієрархія управління ГЕС

На Дніпровській ГЕС використовується система станційного управління Централог. Система Централог – призначена для автоматизованого управління станцією за участю оператора, задаючого різні режими роботи. Система централізовано виконує функцію управління, моніторингу і передачі даних системним диспетчерським центрам. Об'єктами моніторингу і управління є гідроагрегати ГЕС–1 і ГЕС–2, ВРП 154/330 кВ й власні потреби станції.

Система Централог, має можливості передачі даних про стан обладнання й устаткування, режими роботи й основні параметри гідроагрегатів і підстанцій відповідно в регіональний, національний та центральний диспетчерські центри РДЦ, НДЦ і ЦДЦ енергетичної системи.

Система Централог дозволяє управляти роботою гідроагрегатів ГЕС–1 в груповому автоматичному режимі, а також управляти станцією з рівня диспетчерського центру.

У функції системи Централог входить архівація даних про поточні, нештатні й аварійні події, що відбулися, а також основних показників режимів роботи станції. На сьогоднішній день користуватися моніторингом системи Централог, на Дніпровській станції, можливо переважно з головного пульта управління. Оперативний персонал машинних залів не має можливості отримання оперативної інформації з системи, що дещо обмежує ефективність взаємодії.

Функція переглядання архівних даних про ситуації, що відбулися, також не доступна ні кому, окрім персоналу, що знаходиться на головному щиті управління, хоча в систему Централог вбудована можливість передачі цих даних по локальній мережі через браузер.

Система Централог, має всього по одному каналу зв'язки зі всіма диспетчерськими центрами, що теж є не допустимим при автоматичному регулюванні режимами роботи гідроагрегатів з диспетчерського центру. Потрібно розширити поточні можливості моніторингу системи Централог, а також підвищити надійність каналів зв'язку зі всіма диспетчерськими центрами.

Рішення такої задачі дозволяє підвищити функціональність даної системи, а також надійність роботи з диспетчерськими центрами.

За будовою, система станційного моніторингу й керування Централог має декілька інформаційних і функціональних рівнів, рис. 5. 4.

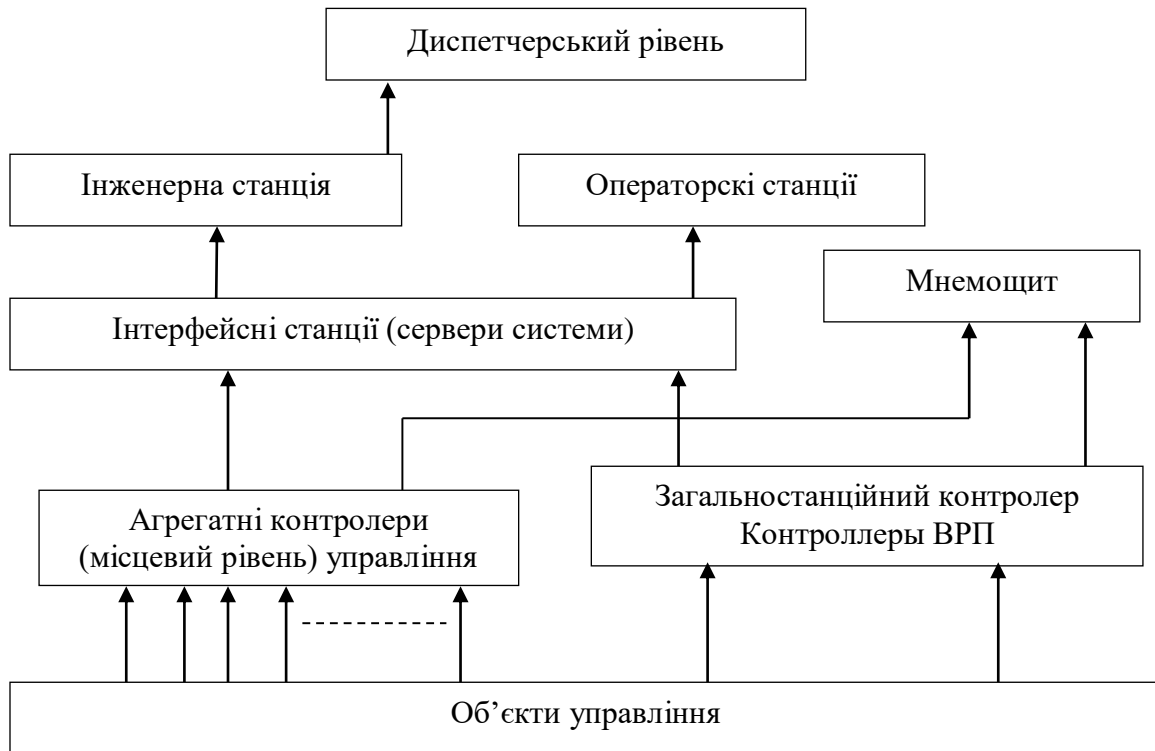


Рис. 5. 4. Ієрархія управління ГЕС

Вказані інформаційні і функціональні рівні визначають відповідні архітектурні особливості реалізації системи моніторингу і

управління за окремими напрямками. Цьому також в повній мірі сприяють й системні особливості апаратної архітектури.

5. 3. Особливості архітектури Централог

Апаратна архітектура системи Централог включає серію робочих станцій оператора CVS, інженерні станції CCC (конфігураційний центр) і пристрої інтерфейсу CIS (що виконують роль сервера обміну даних). CIS і інші станції CVS зв'язані мережею контролю CONTRONET, виконаною за стандартом Ethernet. Станція оператора CVS виконує функції людино – машинного інтерфейсу. Кожна станція CVS оснащена клавіатурою, маніпулятором й може забезпечувати до трьох кольорових моніторів.

Інженерні станції CCC фактично є головним інструментом конфігураційних, експлуатаційних і архівних функцій системи. Кожна станція CCC оснащена клавіатурою, маніпулятором і кольоровим монітором. Також в її архітектуру входять пристрої для роботи з дисками, CD-ROM, накопичувачами на оптомагнітних дисках і стримерах. До станції також можливі підключення модемних пристроїв, для передачі даних у віддалені диспетчерські центри. Станції CCC можуть виконувати функції станцій оператора CVS.

До функцій інтерфейсних станцій CIS переважно входить забезпечення інтерфейсного управління мережею F900 і системою Alspa P320, все це коректує система Real Time DataBase (RTDB), що формується при завантаженні станції шляхом прочитування поточної бази даних з інженерної станції CCC.

Принтери системи Централог, підключені до периферійного сервера або мережі CONTRONET, мають функції друку екранних областей станції оператора CVS.

На Дніпровській ГЕС інтерфейсні станції CIS підключені до подвійної оптоволоконної мережі F900. Така можливість використана для того, щоб збільшити функціональну надійність в межах єдиної мережі загального управління й системи контролю. Дві здвосні мережі F900 приходять на кожную станцію CIS незалежно одна від одної, тому при втраті зв'язку за однією з мереж зв'язок з контроллерами не припиняється.

Робочі станції мають наступні характеристики й можливості:

- високоякісна графіка;
- операційна система UNIX;
- програмне забезпечення POSIX, MOTIF;
- графічна оболонка XWINDOW (X11);
- RISC технологія, що надає відмінного виконання рішень;
- повністю інтегровані апаратні елементи.

Все це надає доступ до обширної кількості програмних продуктів (баз даних менеджерів, графічного генератора інтерфейсу DATAVIEWS і т. п.).

Сервери системи Централог мають наступні характеристики й можливості:

- операційна система UNIX;
- програмне забезпечення POSIX, xpg4 СТАНДАРТИ X/OPEN;
- RISC технологія 64 що забезпечує достатню архітектурну потужність комп'ютерів.

Мережа CONTRONET Ethernet створена на основі наступних стандартів:

- Міжнародні Стандарти Organization OSI моделювання;
- ISO 8802.2 і стандарти ISO 8802.3 (Ethernet);
- стандарт Internet з TCP (управляючий Протокол Передачі), UDP (Протокол Дейтаграми Користувача) і IP (Протокол Internet).

Ці протоколи визнані в якості де-факто стандартів і використовуються по всьому світу. Основним фізичним середовищем локальної мережі є Ethernet. На вищих рівнях інформаційного забезпечення використовуються мережі CONTRONET і F 900.

Архітектура системи Централог представлена на рис. 5. 5.

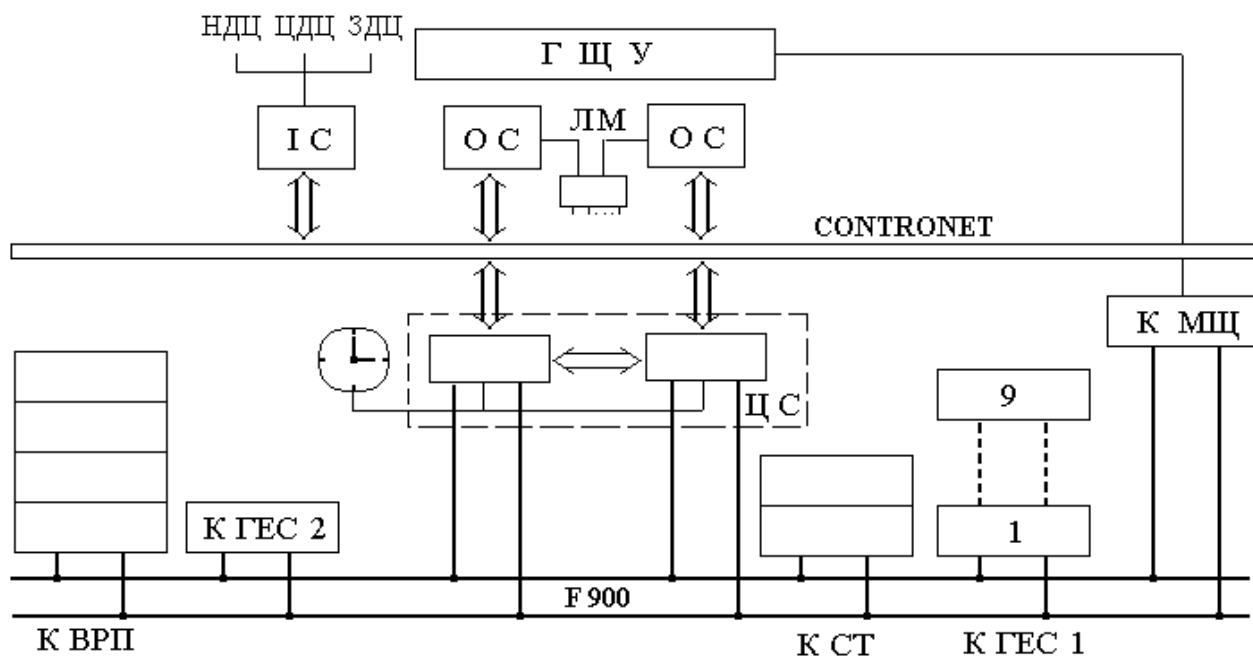


Рис. 5. 5 Принципова архітектурна побудова системи Централог: ГЩУ – головний щит управління; К МЩ – контролер мнемощита; ЦС – центральні сервери ГЕС; ІС – інженерна станція; ОС – робочі станції операторів; НДЦ ЦДЦ, ЗДЦ – зовнішні лінії зв'язку з диспетчерськими центрами; ЛМ – локальна мережа; К СТ – станційні контролери; К ВРП – контролери ВРП; К ГЕС 1 – контролери ГЕС–1, К ГЕС 2 – контролери ГЕС –2.

Таким чином забезпечується побудова станційного рівня системи моніторингу й керування ГЕС. Він переважно зорієнтований на оперування з досить узагальненими даними щодо енергетичного обладнання, оскільки стан кожного гідроагрегату досить детально контролюваний на агрегатному рівні.

6. СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГІДРОАГРЕГАТУ

Системи контролю гідроагрегату функціонально є безпосередньо наближеними до кожного енергетичного перетворювача ГЕС. Вони забезпечують не тільки дію основних його елементів але й інформацію про їх функціональний стан. Спрямовані переважно на критичні режимні аспекти забезпечення. Охоплюють контроль температури, електричні характеристики мережі, моніторинг механічний, що спрямований на контроль вібрацій та геометрії основних робочих вузлів.

6. 1. Система контролю температури

Система контролю температури призначена для контролю теплових режимів основних вузлів і елементів гідроагрегату, що безпосередньо впливають на надійність його роботи.

Температурний контроль гідроагрегатів здійснюється з допомогою: дискретних датчиків (термосигналізаторів) типа ТКП–160, табл. 6. 1, аналогових датчиків (термоопорів) типа ТСМ–50 (53), ТСП–100 (9), табл. 6. 2.

Дискретні датчики температури підключені до додаткового контролера системи управління. При підвищенні температури контрольованих точок гідроагрегата до уставки сигналізації, в контролер надходить відповідний сигнал, включається звукова сигналізація й з'являється розшифровка на сенсорному екрані в “Переліку сигналізацій”.

При підвищенні температури до аварійно-високої до контролеру надходить відповідний сигнал, гідроагрегат відключається від мережі по схемі нормального останову за роботою сигналізації.

Аналогові датчики за трипровідною схемою підключені до термоконтролера EUROTERM CHESSELL Model 4000R, який виконує автоматичний контроль температур сегментів підп'ятника і підшипників агрегату й їх охолоджуючих середовищ (масла), заліза й міді статора та їх охолоджуючих середовищ (повітря), а також масла головних трансформаторів.

Таблиця 6. 1 Дискретні датчики термоконтролю

№ п-п	Місце встановлення	Тип	Г1-Г3	Г4	Г5-Г8	Г9
			Кількість датчиків			
1.	Підп'ятник: сегменти масло	ТКП-160	2	1	2	1
			1	1	1	
2.	Верхній направляючий підшипник		2	1	2	2
3.	Нижній направляючий підшипник		2	1	2	2
4.	Турбінний підшипник: сегменти масло		1	2	2	2
			1	1	1	1
5.	Горяче повітря статора	2	2	2	2	
6.	Масло трансформатора	3	3	3	1	

Живлення термоконтролера CHESSELL ≈ 220 В здійснюється через автомат панелі щита управління. Термоконтролер CHESSELL обробляє дані аналогових датчиків, що надходять по контрольованих каналах, і паралельно видає їх в котролер управління ALSPA C80-35. По досягненні температур уставок формуються команди “сигнал” або “відключення”, які передаються по мережі MODBUS. Команда “відключення” дублюється дискретним сигналом, що надходить в контролер управління.

На екрані дисплея температурного контролера за допомогою відповідних кнопок головного меню можливо набути значень технологічних параметрів всіх контрольованих каналів в режимі автоматичного або ручного прочитування, а також інформацію про канали, за якими вимірювана температура досягла граничних значень, і про спрацьовування сигналізації. Загальний стан температур в контрольованих точках агрегатів і трансформаторів відображається на сенсорному екрані контролера управління.

Черговому персоналу (операторові) при вимірюванні температури по каналах, при визначенні каналів, по яких йде інформація про досягнення критичної температури, й необхідність квіттування аварійного сигналу після усунення причин, що викликали його спрацьовування, досить скористатися однією – першою сторінкою операторного меню, яке з'являється на екрані дисплея.

Таблиця 6. 2. Аналогові датчики термоконтролю

№ п-п	Місце встановлення	Тип	Г1 – Г3	Г4	Г5 – Г8	Г9
			Кількість датчиків			
Підд'ятник						
1.	Сегменти	Pt 100		9		
		Cu 50			8	8
		Cu 53	8			
2.	Масло гаряче	Cu 50			1	1
		Pt 100	1	1		
3.	Масло холодне	Pt 100	1			
		Cu 50			1	1
Верхній направляючий підшипник						
4.	Сегменти	Cu 50			2	2
		Cu 53	2	2		
5.	Масло	Cu 53	1	1		
Нижній направляючий підшипник						
6.	Сегменти	Cu 50			2	2
		Cu 53	2	2		
7.	Масло	Cu 50				
		Cu 53	1	1		
Турбінний підшипник						
8.	Сегменти	Cu 50		2	2	2
9.	Масло	Cu 50		1	1	1
Статор						
10.	Гаряче повітря	Cu 50	2	2	2	2
11.	Холодне повітря	Cu 50	10	10	12	12
12.	Мідь	Cu 53		6	6	6
		Cu 9	6			
13.	Залізо	Cu 53		6	6	6
		Cu 9	6			
Масло трансформатора						
14.	Фаза А, В, С	Cu 9	3			
		Cu 53		3	3	

При спрацьовуванні аварійної сигналізації спалахує аварійне табло з червоним миготливим світлом зліва і включається звуковий сигнал за яким черговий персонал визначає в якому або в яких каналах температура досягла свого граничного значення – значення уставки.

Таким чином реалізується відповідальне завдання моніторингу теплового стану гідроагрегату за найбільш уразливими його елементами.

6. 2. Аналізатор характеристик мережі

Аналізатор мережі PECA – 301 дозволяє вимірювати досить широкий набір різних величин, за списком до 90 параметрів.

6. 2. 1. Призначення й основні характеристики

Аналізатор сигналів електричних мереж PECA–301 фірми ARDETEM призначений для вимірювання:

- лінійних напруг (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA});
- струмів по фазах (I_A , I_B , I_C);
- потужності активної й реактивної;
- енергії активної й реактивної, виданої та одержаної;
- частоти в мережі;
- $\cos \varphi$;
- інших величин.

Основні технічні дані PECA – 301

PECA–301 – являє собою вимірювальний прилад з цифровою індикацією вимірів. Виконаний за стандартами захисту IP 20 и IP 40. Індикатори 3 x \pm 20 000 точок індикації величин. Цифри високої чіткості, розміром 15 мм.

Входи й характеристики приладу

По напрузі: $U_n = 150V$ або $500V$ змінного струму.

За струмом: $I_n = 1A$ або $5A$.

Можливості вимірювань: $1,5 I_n : 1,2 U_n$.

Перевантаження:

- тривале $750 V$, $2 I_n$;

- короткочасне (протягом 10 с) $1000 V$, $10 I_n$.

Споживана потужність: $< 0,2 VA$ за входами напруги при вхідному опорі 1 МОм.

Напруга ізоляції: $2 kV$, $50 Hz / 1 min$.

Частоти: $50/60 Hz$, або інші за замовленням.

Тип мережі: однофазна, 3-фазна.

Можливості вимірювання

Число параметрів: 90.

Точність: 0,5 для U, I и P (0,2 за замовленням);
1,0 для енергії (0,5 за замовленням).

Метод вимірювання: швидке й одночасне використання трьох напруг та трьох струмів з цифровою обробкою в 32 розрядному процесорі.

Цикл оновлення дисплею: двічі за секунду.

Цифрова фільтрація енергії:

- 5 програмованих рівней інтеграції;
- запам'ятовування кожні 5 хв., читання в 8 розрядному вигляді.

Цикл часу:

- 325 mS для 3- фазної незбалансованої мережі;
- 180 mS для 3-фазної збалансованої мережі.

6. 2. 2. Будова й склад аналізатора

Пристрій PECA-301 є програмовним приладом з цифровою індикацією вимірювань. Конструктивно виконаний в полікарбонатному корпусі розміром 144 × 96 × 170 мм. Прилад розміщений на передній панелі шафи 1 під операторським інтерфейсом термоконтролера.

Живлення PECA-301 здійснюється від блоку живлення змінною напругою 220 В.

Зовнішній вигляд інформаційної панелі приладу наведено на рис. 6. 1.

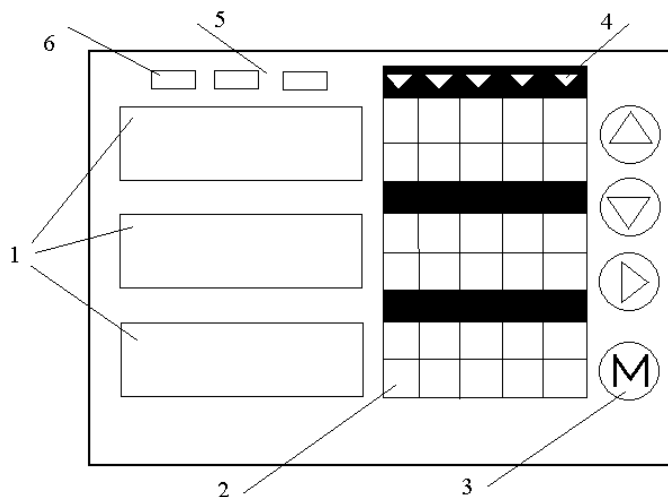


Рис. 6. 1 Аналізатор сигналів електричних мереж: 1 – значковий дисплеї, 2 – панель параметрів й розмірностей, 3 – клавіатура програмування, 4 – індикація сторінок, 5 – контроль прийому, передачі, 6 – контроль стану вимірювань.

Інформаційна панель PECA-301 має 3 рядки 4-х розрядних дисплеїв, заповнених семисегментними світлодіодними індикаторами

розміром 15 мм. Індикатори висококонтрастні, червоного кольору. На цих трьох рядках відображаються одночасно 3 вимірюваних параметра.

Поряд з дисплеями розташовано 5 стовпців з позначеннями вимірюваних параметрів. Над кожним стовпцем розташований трикутник індикатора з вершиною, направленою вниз. Цей трикутник-індикатор підсвічує червоним кольором коли на трьох дисплеях одночасно відображаються параметри даного стовпця. Таким чином на дисплеях можливо отримати відображення 5 сторінок вимірювань за 3 параметрами, тобто 15 параметрів.





Над дисплеєм розташовано три індикатори з наступними назвами:

Контроль помилок

T_x – передача

R_x – прийом

Праворуч від стовпців з вимірюваними параметрами розташовано чотири кнопки клавіатури програмування з наступними функціями:


-  8 розрядна візуалізація параметрів енергії;
-  Гармоніки й номер відображуваного параметра;
-  Скролінг або листання сторінок;
-  основне (голове) меню, прийом й візуалізація помилок.

Використовується для входу в головне меню, а також для прямих вимірювань. Забороняється постійно натискати на цю кнопку.

6. 2. 3. Порядок використання приладу


Прилад РЕСА-301 використовується для вимірювання напруги, фазних струмів гідрогенератора, частоти, $\cos \varphi$, активної й реактивної потужності, споживаної та видаваної активної й реактивної енергії.

Вимірювання напруги генератора


Для вимірювання лінійної напруги генератора U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} необхідно за допомогою кнопки  обрати перший стовпець

параметрів. При цьому над першим стовпцем параметрів має підсвічуватися червоним світлом індикаторний трикутник. У цьому стовпці по вертикалі записано у верхніх клітках найменування вимірюваних параметрів U_{TR} , U_{RS} , U_{ST} , що відповідає U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} . У нижній клітинці вказані одиниці вимірювання kV. На цифрових дисплеях зчитуються відповідні значення напруги.


Вимірювання фазних струмів генератора

Для вимірювання фазних струмів у фазах необхідно за допомогою кнопки  перевести індикацію на другий стовпець параметрів. При цьому вимірюватимуться I_R , I_T , I_S відповідно I_A , I_B , I_C . Одиниця вимірювання для всіх значень – А (ампер). На цифрових дисплеях зчитуються відповідні значення струмів.


Вимірювання $\cos \varphi$, частоти F і фазної напруги U

Для вимірювання перерахованих величин необхідно за допомогою кнопки  перевести індикацію на третій стовпець. При цьому вимірюватимуться на першому зверху дисплеї $\cos \varphi$, на другому – частота генератора в герцах, на третьому U_R – напруга фази А (U_A) в кіловольтах. На цифрових дисплеях зчитуємо відповідні значення перелічених параметрів.

Вимірювання активної (P), реактивної потужності (Q) і споживаної активній енергії ($E_A \text{ in}$)

Для вимірювання названих параметрів необхідно за допомогою кнопки  перевести індикацію на четвертий стовпець параметрів. При цьому відобразатимуться на першому зверху цифровому дисплеї активна потужність генератора P в мегаватах (MW), на другому – реактивна потужність Q в мегаварах (MVar), на третьому – споживана генератором активна енергія E_{Ain} в мегаватт/годинах (MW/h). На цифрових дисплеях зчитуються відповідні значення перелічених параметрів.

Вимірювання видаваної активної енергії (E_{Aout}), споживаної реактивної енергії ($E_r in$) і видаваної реактивної енергії ($E_r out$).

Для вимірювання названих параметрів необхідно за допомогою кнопки  перейти на п'ятий стовпець параметрів. При цьому відобразатимуться на першому зверху цифровому дисплеї видавана активна енергія E_{Aout} в мегават/годинах (MW/h), на другому – споживана реактивна енергія $E_r in$ в мегавар/год (Mvar/h), на третьому – видавана реактивна енергія $E_r out$ в мегавар/год. На цифрових дисплеях зчитуються відповідні значення перелічених параметрів.

6.3. Система механічного моніторингу гідроагрегату

Система механічного моніторингу гідроагрегату має забезпечувати й підтверджувати його технічний стан, готовність, працездатність, основні ресурсні й робочі характеристики, ефективність та функціональну надійність.

Основні теоретичні засади

Величини вібраційних характеристик елементів гідроагрегату визначають можливість тривалої і надійної роботи гідроагрегату. Вони є одними з основних якісних показників його конструкції, технології виготовлення й виконання монтажних робіт тощо.

Підвищена вібрація гідроагрегату може призвести до аварійного його стану, зниженню ККД і додатковим втратам енергії. Тому у випадках, коли вібрація гідроагрегату перевищує допустимі величини, мають бути встановлені й усунені причини підвищеної вібрації. Причини підвищеної вібрації гідроагрегату залежно від джерела збурюючої сили можуть бути розподілені на 3 основні види: механічні, гідравлічні й електричні.

До механічних причин відносяться:

- 1) небаланс ротора генератора і робочого колеса турбіни;
- 2) неправильні стан і положення вісі валу гідроагрегату;
- 3) неполадки у підшипникових вузлах;
- 4) послаблені кріплення опорних деталей гідроагрегату або недостатня їх жорсткість;

5) зачіплення деталей гідроагрегату, що обертаються, об нерухомі.

Гідравлічні причини:

- 1) гідравлічний небаланс робочого колеса;
- 2) невірне положення робочого колеса для РО турбіни щодо направляючого апарату за висотою;
- 3) невірно встановлена комбінаторна залежність для ПЛ турбін;
- 4) робота турбіни в режимі кавітації.

Електричні причини вібрації агрегату полягають в нерівномірності тяжіння ротора до статора. Електромагнітний небаланс, що викликається в основному:

- 1) нерівномірністю повітряного зазору генератора, збудника і підзбудника;
- 2) овальністю форми ротора генератора;
- 3) замкненням витків обмотки полюсів ротора.

Вібрації гідроагрегату вимірюються в наступних місцях:

- 1) у вертикальних агрегатів на нижній і верхній хрестовинах в двох горизонтальних взаємоперпендикулярних і вертикальному напрямі, а турбінного підшипника тільки в горизонтальному і вертикальному положеннях розташованих в одній вертикальній площині;
- 2) у горизонтальних агрегатів на всіх опорних підшипниках у вертикальному, осьовому і поперечному напрямках;
- 3) у генераторів на полицях статора
- 4) у всіх гідроагрегатів на підлозі машинної будівлі, перекриттях відсисаючої труби і в інших найбільш схильних до вібрації місцях.

Визначення причин підвищеної вібрації особливо якщо вони не виражені ясно, є досить складним завданням. У цих випадках необхідно визначити джерело збурюючої сили, встановити і усунути причини вібрації.

Контроль вібраційного стану гідроагрегату дозволяє виявляти підвищені вібрації і встановлювати причини їх появи, визначити характер і місцезнаходження діагностованих дефектів, прогнозувати їх розвиток, уточнювати термін і об'єми оглядів, випробувань і ремонтів, уточнювати робочу область гідроагрегату. Основна мета контролю вібраційного стану гідроагрегату – виявлення його

дефектів, запобігання їх розвитку і підвищення надійності експлуатації шляхом своєчасного виводу генератора на профілактику для огляду, випробування і ремонту. Залежно від постійних завдань можливо розрізняти наступні види вібраційного контролю:

- 1) перевірка рівня вібрації (перше завдання діагностики);
- 2) визначення механічних характеристик;
- 3) визначення місця, вигляду і ступеня розвитку дефекту (друге завдання діагностики);
- 4) характер розвитку дефекту;
- 5) уточнення режимів роботи генератора.

Розглянуті торетичні моменти дозволяють розробити й впровадити відповідні та необхідні технологічні підходи.

Основи технології моніторингу

1. Відомо, що з точки зору вібраційного, гідрогенератор може знаходитися в одному з трьох можливих станів:

- 1) справному (відмінному або доброму);
- 2) працездатному (задовільному);
- 3) несправному (незадовільному або неприпустимому).

Справний стан має місце, коли параметри вібрації генератора повністю відповідають початковим або проектним значенням.

Працездатний стан виникає при підвищених параметрах вібрації в порівнянні з початковими або проектними значеннями, але при цьому ще не потрібне відключення генератора для профілактики (огляду, випробування або ремонту).

Несправний стан виникає при таких підвищених параметрах вібрації, які вимагають відключення генератора при першій нагоді (незадовільний стан або негайно-неприпустимий стан – для огляду, ремонту, випробування).

Таким чином мета перевірки рівня вібрації полягає у визначенні одного з трьох дискретних вібраційних станів випробовуваного генератора і його оцінки виходячи прийнятих норм. Перевірка і оцінка проводиться на основі результатів періодичних вимірювань параметрів вібрації, здійснюваних для нормованих режимів і умов роботи генератора.

2) Визначення механічних характеристик конструктивних вузлів генераторів вимагає проведення спеціальних режимів роботи агрегату. Передбачається, що за час випробувань параметри генератора залишаються незмінними, а умови заданими і незмінними для кожної серії вимірювань. Зазвичай при цих випробуваннях генератор знаходиться в нестационарному або квазістационарному режимі, а параметри силових дій є заданими функціями часу.

Наприклад, при незмінній амплітуді F_m гармонійної функції збурення

$$Z(t) = F_m \cdot \sin 2\pi (Dn/60) t$$

і частоті обертання n , що змінюється, визначаються амплітудно-частотні характеристики. При незмінній частоті обертання $n = \text{const}$, по змінній амплітуді збурення F_m знімаються амплітудні характеристики. Визначення механічних характеристик є обов'язковою частиною об'єму вібраційного контролю приємоздатних, післяаварійних і інших спеціальних видів випробувань генератора.

3) Встановлення вигляду, місця й ступеня розвитку дефекту. Якщо параметри вібрації мають підвищені значення (генератор знаходиться в незадовільному або неприпустимому стані) виникає завдання встановлення вигляду і місця виникнення дефекту, а також визначення ступеня його розвитку. При цьому необхідна постійність параметрів силових збурень і визначень умов. Вихідна напруга датчика визначається тільки параметрами конструктивних вузлів генератора, а вібрації можуть бути ознаками дефектів. Зіставлення ознак дефектів генератора, що діагностується, з відомими ознаками типових дефектів даного класу генераторів надає можливість отримання вірного діагнозу. Для виявлення ознак дефектів необхідне зіставлення параметрів вібрації, що виникає при різних режимах роботи генератора. Слід зважати, що 1 дюйм = 25,4 мм.

4) Прогностика розвитку дефектів.

Прогноз розвитку дефектів ґрунтується на результатах вивчення, аналізу і узагальнення історії роботи конкретного генератора. З цією метою використовуються результати періодичних оглядів і вимірювань вібрації, а також акти ремонтів і аналізу пошкоджень конструктивних вузлів генератора. Вимірювання вібрацій проводиться при одних і тих же режимах роботи генератора в

моменти часу при постійності силових збурень за певних умов. Моменти часу обираються виходячи закона будови і уточнюються в процесі експлуатації. Виявляючи закон зміни вібраційного стану досліджуваного вузла генератора, порівнюючи його з апіорі відомим законом зміни вібраційного стану типового вузла даного класу генераторів, вирішують задачу прогнозування. Визначення закономірності старіння конструктивних вузлів активних матеріалів генератора навіть в першому наближенні зазвичай є досить складним і трудомістким завданням, пов'язаним зокрема з дослідженнями втомної міцності конструктивних вузлів і матеріалів, тому в практиці експлуатації рішення про необхідність і терміни виведення генератора на профілактику приймають на підставі даних про його передісторію з урахуванням ситуації на ГЕС і в енергосистемі. Досить часто виникає необхідність прискореного прогнозу стабільності конструктивних вузлів генератора. З цією метою досліджуваний генератор піддається короткочасним силовим діям, значно більшим, ніж нормальні, наприклад, шляхом здійснення раптових КЗ, скидань навантаження, асинхронних режимів і інше. Зіставлення результатів вимірювань вібрації й деформації, амплітудних і амплітудно–частотних характеристик, випробування обмоток підвищеною напругою, випробувань сталі сердечника статора, а також інших випробувань і оглядів конструктивних вузлів гідрогенератора до і після аномальних режимів дозволяє оцінити їх стабільність. Вимірювання вібрації до і після аномальних режимів проводиться при постійності умов, незмінному навколишньому середовищі і постійній швидкості обертання.

5) Уточнення режимів роботи генератора.

У випадках застосування спеціальних режимів роботи генератора, наприклад, самосинхронізації, АПВ (автоматичне повторне включення), асинхронних і інших, часто виникає необхідність оцінки можливості, області й умов їх застосування. Визначення рівня і параметрів вібрації, що виникають при таких режимах, сприяє рішенню поставленої задачі. Якщо відсутні норми на вібрації, що виникають при досліджуваних режимах, користуються методом зіставлення. Вказані вібрації порівнюються з вібраціями, отриманими при проведенні добре вивчених в експлуатації режимів. Наприклад,

таких як скидання навантажень, синхронізація, холостий хід із збудженням та інші. При проведенні таких випробувань напруги на виході вібродатчиків і силові дії відповідні досліджуваному і добре вивченому режиму. Часто виникає необхідність визначення ступеня обмеження нормальних режимів роботи генератора. З цією метою вібрації вимірюються при різних значеннях навантажень в сталих режимах. Результати вимірювань зіставляються з гранично допустимими значеннями вібрації й на цій підставі встановлюється тривало допустима потужність генератора аж до моменту його зупинки на профілактику.

Змінні складові збурень за різних режимів роботи гідрогенератора

Змінні складові збурень за різних робочих режимів являють собою важливу основу вібраційних впливів й мають враховуватися в розробці технологічної основи вібродіагностики.

Загальні відомості

Вібрації генератора викликаються змінними складовими збурень, величина і характер яких залежать від конструкції, параметрів гідрогенератора й турбіни, їх експлуатаційного стану та режиму роботи. При всіх режимах роботи гідроагрегату виникають гідравлічні й механічні сили та моменти. У режимах роботи із збудженим генератором додатково виникають сили магнітного тяжіння між статором і ротором генератора, а в режимах, при яких в обмотках статора генератора з'являються струми, виникає електромагнітний момент та електродинамічні сили. Спектр частот збурень, що викликають істотні вібрації, охоплює діапазон від 1 до 200 Гц. Проте, для виявлення ранніх стадій розвитку дефектів може виявитися ефективним контроль віброакустичних коливань в області вищих частот.

Збурення можуть містити й постійні складові, які мають враховуватися при оцінці міцності вузлів машини. Експлуатаційний контроль і діагностика вібраційного стану гідрогенератора проводяться в більшості випадків при сталих і квазістаціонарних режимах. Сталі режими гідроагрегату характеризуються незмінними

гідросиловими параметрами турбіни (H і Q), електричними параметрами навантаження генератора (активною, реактивною потужністю) і частотою обертання валопроводу.

Холостий хід без збудження

У цьому режимі ЕРС генератора дорівнює нулю, а частота обертання агрегату постійна, вібрації виникають із-за гідравлічних збурень в турбіні й частинах агрегату, що механічно обертаються. Водяний потік, що надходить на лопаті робочого колеса турбіни створює момент обертання, що передається на вал агрегату. При цьому разом з постійною складовою моменту обертання утворюються змінні. Причинами змінних гідродинамічних сил є передусім нерівномірний розподіл швидкостей потоку води, вихорові утворення в камері робочого колеса турбіни тощо. Змінні дії потоку води на лопаті робочого колеса турбіни викликають коливання з лопатевою частотою:

$$F_z = (n \cdot Z) / 60,$$

де Z – число лопатей робочого колеса;
 n – число обертів.

Якщо вихорові утворення потоку води, виникаючі за лопатками направляючого апарату турбіни, досягають лопатей робочого колеса, то виникають коливання з частотою лопатки

$$f_w = (n \cdot S) / 60,$$

де S – число лопаток направляючого апарату.

Гідродинамічні процеси в камері робочого колеса турбіни мають нерегулярний характер, а змінні складові гідродинамічних сил не є гармонійними. Тому вказані вище частоти коливань, що породжуються цими силами, слід розглядати як основні умовні частоти складових кожного з вказаних видів коливань.

Головними причинами виникнення механічних збурень є відцентрові сили за невірноваженості мас, що обертаються, сили пружності валопроводів внаслідок порушення геометрії валів, з'єднань муфт опор, а також сили тертя. Відцентрова сила

неврівноваженості мас, що обертаються, може бути визначена згідно формули:

$$F = m \cdot W = m \cdot \omega^2 \cdot e,$$

де m – нерівноважена маса;

W – прискорення ;

ω – кутова частота обертання;

e – відстань центру нерівноваженої маси від осі обертання.

Вектор цієї сили обертається зі зворотною частотою $n/60$.

Сили пружності валопроводів при порушенні їх геометрії можуть мати змінні складові з частотами $f_{об}$ і $2f_{об}$. Зусилля, що виникають унаслідок нерівності поверхні диска п'яти агрегату, можуть мати складову з частотою

$$f_d = (k \cdot n)/60,$$

де k – число сегментів п'яти.

Вказані вище сили і коливання, що викликаються ними, мають зазвичай гармонійний або полігармонічний характер. Змінні сили тертя можуть виникати за зміни коефіцієнта тертя в опорах і викликають автоколивання з частотою власних коливань системи "опора–вал" і мають випадковий характер.

Причини й рівні динамічних збурень, що виникають в гідроагрегаті, за механічних і гідравлічних процесів в режимі холостого ходу незбудженого генератора наведено в табл. 6. 3.

Таблиця 6. 3. Основні джерела та рівні збурень

Збурення і причини їх виникнення	Визначення рівня
1 Гідравлічні збурення (вихороутворення і нерівномірності поля швидкостей води) 1. 1 У спіральній камері й лопатях р. к. 1. 2 У кільці статора на н. а.	1.1 $(n \cdot Z)/60$, Гц 1.2 $(n \cdot S)/60$
2 Механічні збурення (неврівноваженість обертових мас й пружність валів) 2. 1 Неперпендикулярність осі валу п'яти й фланців. 2. 2 Неперпендикулярність маточини п'яти і вісі.	2.1 $n/60$ 2.2 $n/60$

2. 3 Неспіввісність валів генератора і турбіни	2.3 $n/60$
2. 4 Неспіввісність валу й вкладишів направляючих підшипників.	2.4 $n/60$ й $2n/60$
2. 5 Нерівність поверхні диска п'яти.	2.5 $(k \cdot n)/60$
2. 6 Еліптичність шийок валу.	2.6 $n/60$, $2n/60$
2. 7 Сили тертя.	2.7 Власні частоти даного вузла

Динамічні збурення можуть викликати коливання не тільки валопроводу гідроагрегату, але і хрестовин статора генератора, збудника, допоміжного генератора, а також опор і фундаменту генератора й турбіни. Рівні амплітуди коливань цих конструктивних вузлів залежить від динамічних коефіцієнтів.

В умовах близьких до резонансних амплітуди коливань можуть досягти неприпустимо великих значень.

Холостий хід зі збудженням

У цьому режимі n постійне і E (ЕРС) – const, а електромагнітний момент генератора за умови зневаги вентиляційними втратами і втратами в сталі статора дорівнює нулю. У режимі холостого ходу збудженого генератора окрім гідравлічних і механічних сил виникають сили взаємного тяжіння статора і ротора. Істотні вібрації сердечника з полюсною частотою можуть виникати тільки при низьких просторових кратностях власних форм його коливань. Основними причинами виникнення підвищених вібрацій сердечника статора гідрогенератора є порушення симетрії магнітних потоків робочого зазору гідрогенератора й порушення монолітності сердечника за ослаблення стикових з'єднань його секторів.

Паралельна робота

При включенні гідрогенератора на навантаження в ньому виникає електромагнітний момент і електродинамічні сили. Електромагнітний момент при симетричному навантаженні не залежить від часу і визначається значенням кута між векторами ЕРС E і U . Електромагнітний момент може мати коливання із-за навантаження генератора і моменту обертання турбіни. Ці коливання мають випадковий характер й досить малі в порівнянні з середнім значенням електромагнітного моменту. Електромагнітний момент прикладений як до ротора, так і до сердечника статора. У першому випадку він

врівноважує момент турбіни, в другому закручує статор і врівноважується пружними силами статора.

У обмотках статора навантаженого генератора виникають електродинамічні сили, найбільшими з яких є:

1) Радіальні сили, обумовлені взаємодією струмів в провідниках пазових частин обмоток і впливом феромагнітних мас сердечника статора. Ці сили пропорційні квадрату струму в стрижнях і мають максимальне значення для верхнього стрижня пазу.

2) Радіальні і тангенціальні сили в лобових частинах обмотки, зумовлені взаємодією струмів в стрижнях і пропорційні квадрату струму.

Крім того лобові частини сприймають додаткові сили в результаті взаємодії обмоток статора і ротора й впливу навколишніх феромагнітних мас: нажимних плит, щитів, сталі статора, валу ротора тощо.

У сталих режимах електродинамічні сили в обмотках мають подвоєну частоту струму. У несталих режимах за рахунок аперіодичної складової струму статора виникає аперіодична складова електродинамічної сили з частотою струму, яка досить швидко затухає. Разом з електродинамічними силами на лобові частини обмотки мають істотну дію інерційні сили сердечника статора:

$$F = k \cdot m \cdot A \omega^2,$$

де m – еквівалентна маса сердечника;

A – амплітуда коливання сердечника;

ω – кутова частота коливання сердечника;

k – коефіцієнт, залежний від розмірності.

Особливо великий вплив інерційних сил виникає в тих випадках, коли частота власних коливань лобових частин обмотки співпадає з вібрацією сердечника. При цьому саме лобові частини є антивібратором і амплітуда їх коливань може бути значно більше амплітуди коливань сердечника.

Паралельна робота з несиметричним навантаженням

При несиметричному навантаженні в робочому зазорі гідрогенератора виникає несиметричне магнітне поле, яке може бути

представлене сумою систем симетричних полів прямої й зворотної послідовності.

Поле прямої послідовності обертається теж з синхронною швидкістю ω_0 , але убік протилежний обертанню ротора, тому перетинає його з подвійною синхронною швидкістю $2\omega_0$. В результаті цього в обмотці ротора наводиться однофазний струм з частотою $2\omega_0$. Пульсуюче поле цього струму можливо розкласти на дві складові, що обертаються в протилежних напрямках із швидкістю $2\omega_0$ кожна. Те з полів, яке обертається убік протилежний обертанню ротора є реакцією на поле статора, викликане струмами зворотної послідовності зі швидкістю $2\omega_0$. Поле яке обертається в напрямку ротора перетинає статор з частотою $3\omega_0$ і викликає в ньому струм прямої послідовності з частотою $3\omega_0$. З урахуванням того, що є поява струмів прямої послідовності з частотою $3\omega_0$, можливо продовжити наведені міркування й показати, що в сталому несиметричному режимі навантаження в статорі генератора з'являється не обмежений ряд непарних гармонік струмів прямої і зворотної послідовності.

Найбільш істотною електромагнітною складовою є гармоніка з частотою $2\omega_0$ (100 Гц). Вже наступна гармоніка з частотою $4\omega_0$ (200 Гц) має зневажливо малу амплітуду.

Турбулентність

Турбулентний характер руху рідини в робочій зоні проточного тракту може мати суттєвий вплив не тільки на вібраційні характеристики турбіни, а й гідроагрегату в цілому. Таке становище в своїй основі може мати декілько причин.

Однією з вагомих технічних причин коливань робочого потоку є нестійкості лопаток направляючого апарату. Рівняння руху лопатки НА має наступний вигляд:

$$J \ddot{\alpha} + C \dot{\alpha} + K_0 \alpha = M g,$$

де α – кут атаки лопатки, J – момент інерції, C – в'язке тертя, K_0 – крутильна жорсткість кріплення лопатки, $M g$ – постійний

гідравлічний момент потоку води, M – збурюючий момент пульсацій потоку.

Існують також істотні постійні часу ПІД-регулятора швидкості турбіни. Вони теж мають вагомий внесок до коливальної складової роботи агрегату, девіацію й втрати потужності, а також істотно знижують загальний рівень його ефективності.

Крім того, причиною турбулентних пульсацій потоку є нестійкість перебігу рідини проточного тракту. При деяких критичних параметрах потоку, визначуваних переважно числом Рейнольдса, випадкові хвилі збурень в рідині не затухають, а посилюються. При цьому відбувається якісна зміна структури потоку. Із стаціонарного, ламінарного руху, потік переходить до турбулентного. Частки рідини більш не рухаються по своїх стабільних траєкторіях, лінії струму динамічно змінюються у просторі та часі, потік стохастично пульсує і переміщується.

При перехідних процесах, нерозрахункових режимах і інших нештатних ситуаціях у відсмоктуючій трубі за певних умов можливе також виникнення вихорового, або кавітаційного джгута, рис. 6. 2.

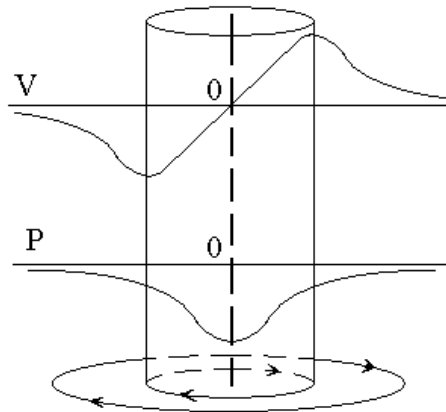


Рис. 6. 2. Загальна схема формування вихорового джгута

Цілком імовірно, що в гідротурбіні відбувається унікальне поєднання різнорідних факторів, що ніде більш не зустрічається, у тому числі й перерахованих, механізмів нестійкості. Течія

відбувається не тільки при великих числах Рейнольдса, але і на податливій, вібруючій поверхні, в умовах замкнутих об'ємів у вигляді довгих водоводів, які можуть служити своєрідними резонаторами хвиль збурення.

Втрати на тертя в таких водоводах достатньо малі. Добротність водовода, як коливальної системи, досить велика і складає декілька сотень. Тому в них може існувати система стоячих хвиль. За певних умов ці хвилі можуть збуджуватися при роботі гідроагрегату, і накопичувати чималу енергію. Тоді в системі водовод – гідроагрегат можуть виникати автоколивання.

Враховуючи те, що на власні форми коливання відчутно впливає імпеданс водяного стовпа, залежний від швидкості звуку в відсмоктуючій трубі, можливо пояснити, чому впускання повітря під робоче колесо часто зменшує на практиці вібрацію й кавітацію в проточній частині.

У натурних турбін в деяких робочих зонах з'являються пульсації тиску в проточній частині, знижується ККД. Виникають кавітація і гідроудари. Спостерігається також значне гойдання потужності гідроагрегату. В результаті цього явища зменшується регульовальний діапазон, гідроагрегат не може вийти на проектну потужність. А іноді це приводить до поломок і аварійних ситуацій.

Крім того, гідрогенератор в енергосистемі поводить як гармонійний осцилятор. У частотному діапазоні 0,5 – 3 Гц у нього фактично існує пологий низькодобротний резонанс. Це означає, що гідроагрегат досить чутливий до коливань обертаючого моменту, залежних від пульсацій тиску у водоводі у вказаному частотному діапазоні. При цьому коливання моменту призводять до коливань кута навантаження гідрогенератора в енергосистемі з амплітудою

$$\theta_0 \approx \frac{M_z}{D} \sqrt{\frac{J}{km_z}}$$

Таким чином існуючі нестабільності гідромеханічного тракту позначаються на роботі і ефективності гідроагрегату в цілому.

Ефект кавітації

Явище кавітації в гідротурбіні виникають при падінні тиску потоку води нижче за тиск паротворення. Останнє призводить до появи локальних порожнеч, міхурів та розриву умови безперервності потоку. Пори води потрапляючи в простір підвищеного тиску, конденсуються і в результаті цього виникають гідравлічні удари. Пониження тиску потоку води в турбіні може виникнути при відключенні номінального робочого режиму роботи турбіни. При зменшенні відкриття направляючого апарату турбіни тиск потоку знижується, що може призвести до кавітації. Часто кавітація виникає й при роботі агрегатів ГЕС, коли тиск води вище номінального розрахункового. Узагальнена схема й характеристика кавітаційного процесу наведена на рис. 6. 3.

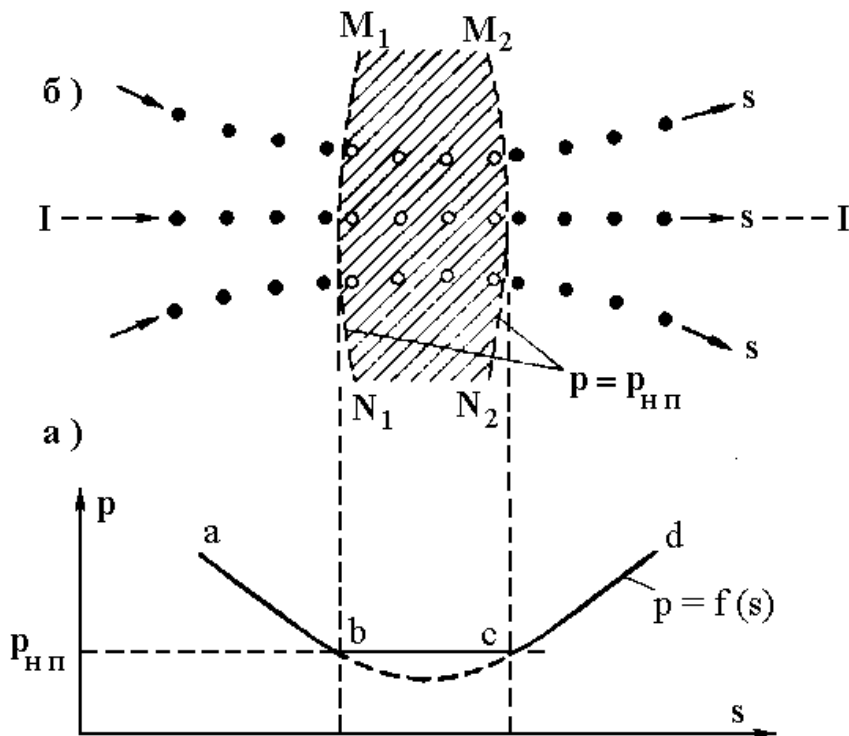


Рис. 6. 3. Кавітаційний процес: а) характеристика кавітаційного процесу; б) загальна схема.

Найбільш активно кавітаційний процес проходить на відріжку b c , при тому в точках b та c – мають місце фазові переходи суцільних середовищ.

Кавітація супроводжується підвищеними вібраціями й шумами, що мають характер нестационарного випадкового процесу. Вібрації кавітаційного походження мають досить широкий спектр від долей Гц до ультразвукових частот. Низькочастотна складова цих вібрацій може розповсюджуватися через валопровід, опори й хрестовини агрегату аж до конструкцій ротора, статора гідрогенератора та його збудника. Кавітація здатна призвести також до підвищеного зносу лопаток і механічного пошкодження гідротурбіни.

Таким чином розглянуто основні передумови виникнення змінних складових збурень за різних режимів роботи гідрогенератора важливі для організації об'єктивного вібраційного контролю.

Причини підвищених вібрацій гідрогенераторів

Підвищені вібрації гідрогенераторів виникають як при збільшенні змінних діючих збурень або наближенні їх частот до значень власних коливань конструктивних вузлів гідрогенератора, так і при зміні експлуатаційного стану і параметрів останніх, найчастіше із-за зменшення їх жорсткості.

Основними причинами підвищення вібрацій сталевих конструкцій генератора є:

- аномальний розподіл і структурні форми магнітного поля в немагнітному зазорі генератора;

- зниження тиску пресування й стиковки сердечника статора;

- ослаблення кріплень корпусу статора на фундаменті;

- неурівноваженість і розцентровка ротора генератора і турбіни;

- спотворення лінії валопроводу гідроагрегату;

- інші несправності гідроагрегату.

Підвищені вібрації обмоток статора можуть виникати як за послаблень їх кріплень і змін механічних властивостей ізоляції, так і внаслідок підвищеної вібрації сердечника статора. Підвищена вібрація

і конструктивні деформації конструкційних вузлів можуть викликати їх пошкодження.

Найбільші експлуатаційні пошкодження, що часто зустрічаються в практиці:

1) тріщини й злами листів активної сталі в зубцевій зоні сердечника статора;

2) стирання лакового покриття листів активної сталі сердечника;

3) злами стяжних шпильок сердечника;

4) тріщини й обриви зварних швів вузлів кріплень сердечника до полиць корпусу і злом призм сердечника;

5) тріщини й злами ластівкових хвостів призм сердечника і прилеглих до них конструкцій.

Наведений перелік надає реальну можливість створення досить ефективної системи вібраційного моніторингу гідроагрегату.

Система вібродіагностики гідроагрегату

Вібраційний стан гідроагрегата, як зазначено, має велике практичне значення в забезпеченні його функціональної надійності. Важливою передумовою створення адекватної системи вібромоніторингу є її достовірне інформаційне забезпечення, яке великою мірою залежить від визначення контрольованих точок гідроагрегату. Таке розташування точок діагностики гідроагрегату за умови максимальної їх інформативності наведено на рис. 6. 4.

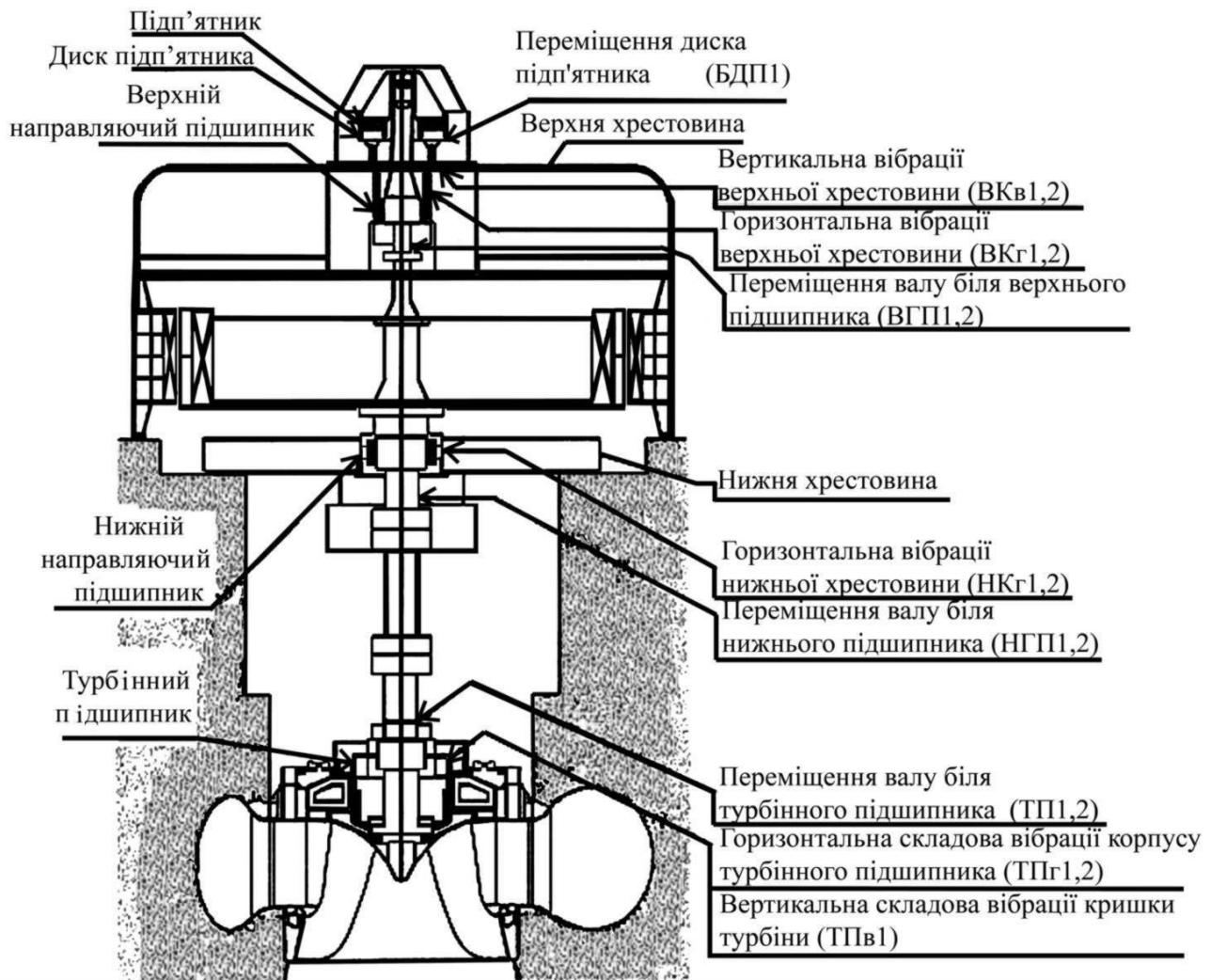


Рис. 6. 4. Розташування точок діагностики гідроагрегату
Обробку сигналів реалізує система серії 3300 фірми BENTLY NEVADA.

Система вібродіагностики призначена для вібраційного контролю під'ятника, верхнього і нижнього генераторного підшипників, турбінного підшипника, корпусу статора, спинки сердечника статора, верхньої і нижньої хрестовин, корпусу турбінного підшипника.

Зазначений підхід дозволить забезпечити потрібний рівень функціональності системи вібромоніторингу.

Побудова системи вібродіагностики гідроагрегатів.

Система вібродіагностики серії 3300 є стаціонарною системою вібродіагностики й складається з двох рівнів: станційного та агрегатного.

Структурна схема системи вібродіагностики показана на рис. 6. 5:

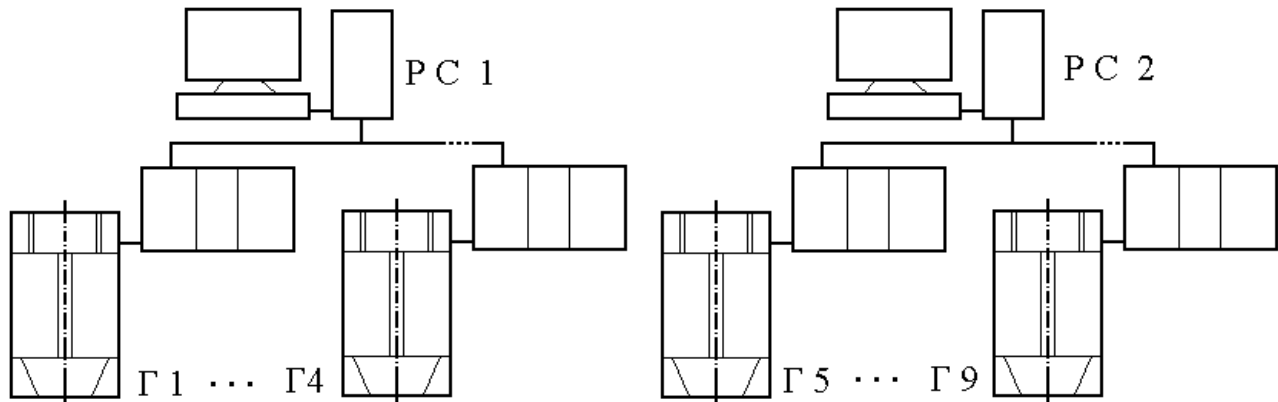


Рис. 6. 5. Структурна схема реалізації системи вібродіагностики гідроагрегатів ГЕС.

Основне функціональне призначення рівнів діагностики:

- нижній агрегатний рівень, включає датчики, встановлені в контрольованих точках гідроагрегатів Г1 ... Г9 в системі вібромоніторингу для кожного гідроагрегату, виконує обробку і відображення сигналів від датчиків. Система вібромоніторингу включає й набір моніторів. Система вібромоніторингу має можливість самотестування для визначення функціонального стану датчиків і вимірювальних трактів, що дозволяє реалізувати захист від неточних вимірювань. Зібрана інформація передається на верхній рівень за протоколом RS 485 і в агрегатний контролер за протоколом Modicon Modbus. Система вібромоніторингу фізично знаходиться в шафі ЗАР агрегатного контролера;

- верхній рівень відповідно поділено на той, що включає станцію № 1 з центральним комп'ютером для гідроагрегатів Г1 ... Г4, та станцію № 2 з центральним комп'ютером для гідроагрегатів Г5 ... Г9 з програмами DATA MANAGER 2000. DATA MANAGER 2000 є спеціалізованим пакетом програм, призначених для збору, зберігання, обробки й відображення даних. На центральних комп'ютерах встановлено операційну систему класу Windows NT. Знаходиться верхній рівень на головному щиті управління.

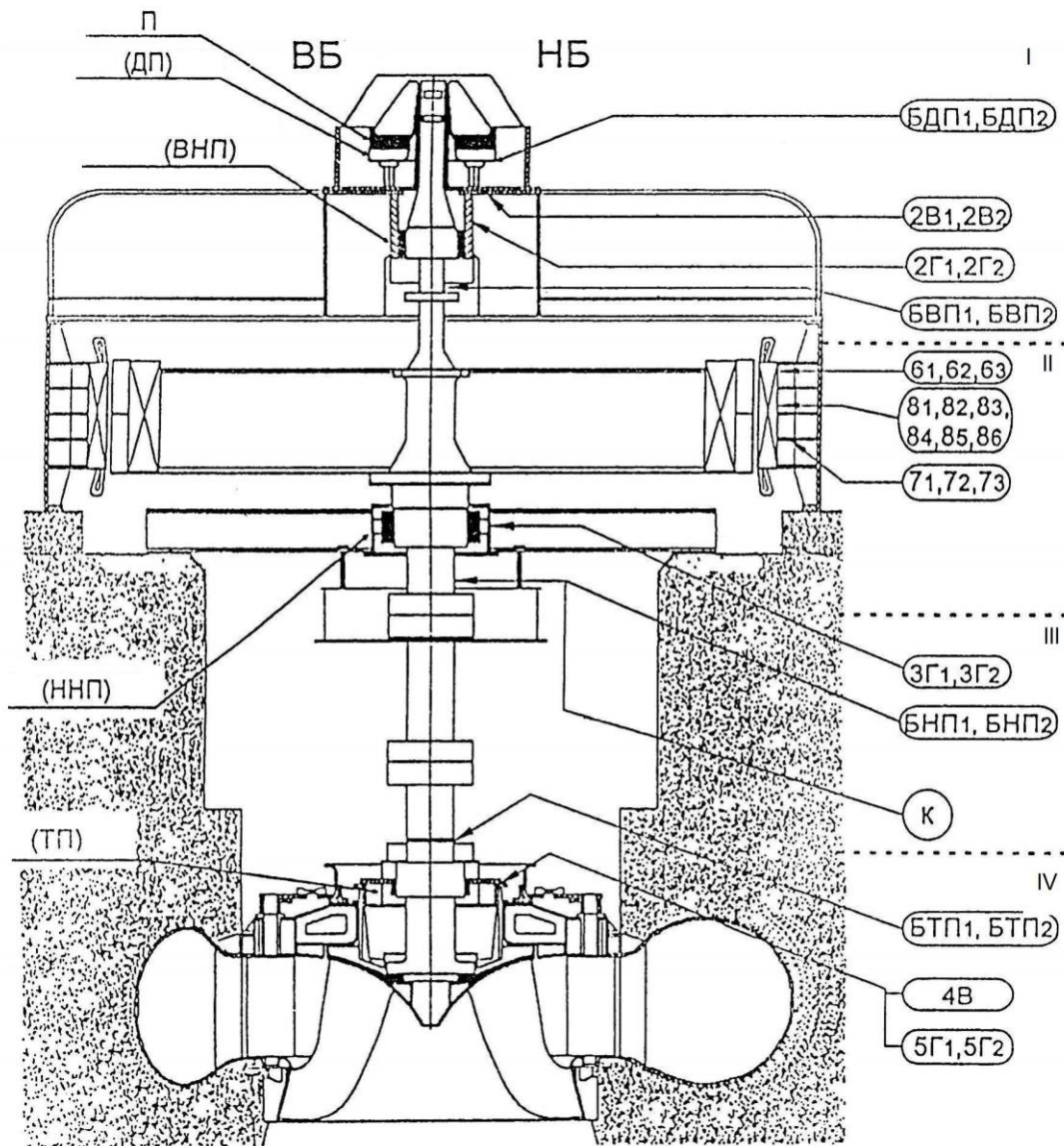


Рис. 6. 6. Розташування датчиків системи вібродіагностики
 Визначення числа й місць монтажу датчиків, рис. 6. 6 виконане виходячи з таких наступних умов:

- контролювання переміщення валів гідроагрегатів на всіх трьох підшипниках;
- число датчиків й розташування залежить від характеру контрольованих величин;
- оскільки переміщення валу не є однонаправленим, тому контролювати переміщення валу необхідно двома токовихоронними датчиками відносного переміщення (Proximity Transducer System) в одній площині під кутом 90°. Таке розташування датчиків дозволяє визначати як переміщення валу (змінну складову) так і усереднене положення осі валу (постійна складова сигналу датчика, відповідає

усередненому значенню зазору) в зазорі підшипника. Положення вісі валу – важливий показник стану підшипника і характеру діючих на нього зусиль;

- використання для опорного сигналу датчику Keyphaser, що фактично є датчиком переміщення (Proximity Transducer System), що генерує імпульс напруги при кожному оберті валу за рахунок виточки на валу. Цей імпульс використовується для вимірювання швидкості обертання, зрушення фаз тощо. Інформація про кут зрушення фаз необхідна для визначення й усунення дисбалансу ротора, неспівісної, нестабільності в підшипнику, тріщин валу, дисбалансових резонансів та інших поширених дефектів. Сигнал цього датчика необхідний також для повноцінної роботи програми DATA MANAGER 2000;

- контролю переміщення диска під'ятника за двома датчиками переміщення (Proximity Transducer System), розташованими під кутом 90° один від одного;

- контролю вібрації, віброшвидкості датчиками Velociti CT на верхній хрестовині, нижній хрестовині, кришці турбіни і корпусі турбінного підшипника;

- контролю низькочастотної вібрації спинки сердечника статора і корпусу статора датчиками Velociti CT;

- контролю вібрації частотою 100 Гц спинки сердечника статора датчиками Accelerometer;

- встановлення датчиків переміщення й вібрації в напрямках нижній б'єф і лівий берег.

За наведеними умовами реалізовано розподіл датчиків системи вібродіагностики в межах гідроагрегату, структурна схема якого наведена на рис. 6. 7.

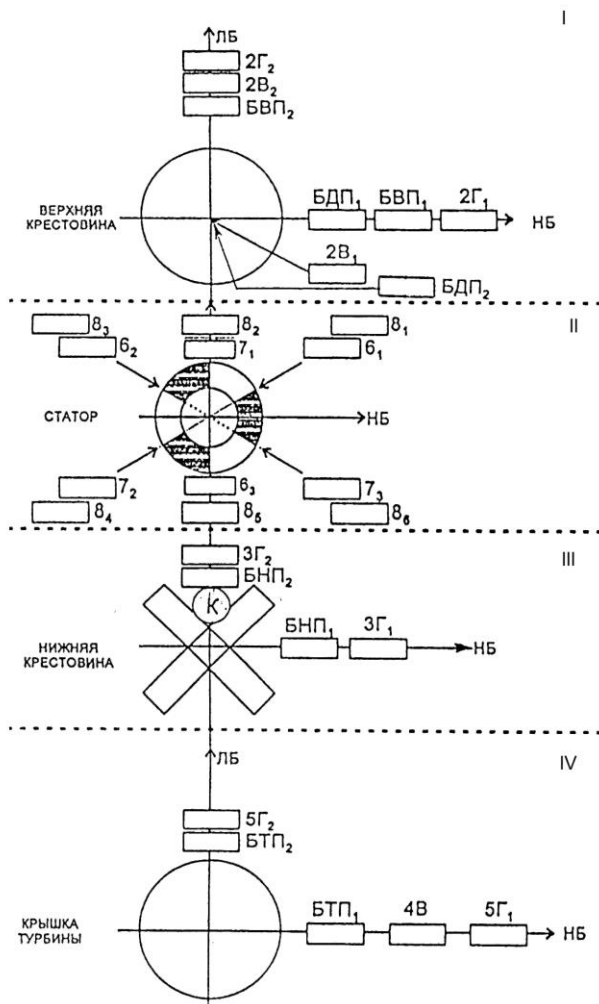


Рис. 6. 7. Структурна схема розподілу датчиків системи вібродіагностики

Розподіл й положення датчиків системи діагностики мають забезпечувати достатній рівень інформаційної адекватності сигналів.

Конфігурація системи вібродіагностики нижнього рівня.

Відповідно до обраних датчиків виконана конфігурація системи вібромоніторингу нижнього рівня, табл. 6. 4, табл. 6. 5. Система вібромоніторингу гідроагрегату нижнього рівня складається з двох шасі розташованих в шафі 3AR агрегатного контролера. Живлення системи вібромоніторингу здійснюється змінним струмом напругою 220 В від автомата “000JD” розташованого в шафі 1AR.

Таблиця 6. 4. Конфігурація моніторингу системи вібродіагностики гідроагрегатів Г1–Г3, Г6, Г7

	SLOT	Монітор	Позначення параметрів	Датчики	Параметр
RACK 1	1	3300/12	Блок живлення		
	2	3300/03	Системний монітор		
	3	3300/20	BDP1, BDP2	БДП ₁ , БДП ₂	Переміщення диска підпятника
	4	3300/16	BWP1, BWP2	БВП ₁ , БВП ₂	Переміщення валу біля верхнього підшипника
	5	3300/16	BNP1, BNP2	БНП ₁ , БНП ₂	Переміщення валу біля нижнього підшипника
	6	3300/16	BTP1, BTP2	БТП ₁ , БТП ₂	Переміщення валу біля турбінного підшипника
	7	3300/55	W2W1, W2W2	2В ₁ , 2В ₂	Вертикальна вібрація верхньої хрестовини
	8	3300/55	W4WS	4В	Вертикальна вібрація кришки турбіни
	9	3300/55	G2G1, G2G2	2Г ₁ , 2Г ₂	Горизонтальна вібрація верхньої хрестовини
RACK 2	1	3300/12	Блок живлення		
	2	3300/03	Системний монітор		
	3	3300/55	G3G1, G3G2	3Г ₁ , 3Г ₂	Горизонтальна вібрація нижньої хрестовини
	4	3300/55	G5G1, G5G2	5Г ₁ , 5Г ₂	Горизонтальна вібрація корпусу турбінного підшипника

	5	3300/55	N6-1, N6-2	б ₁ , б ₂	Низькочастотна вібрація спинки статора
	6	3300/55	N6-3 N7-1	б ₃ 7 ₁	Низькочастотна вібрація спинки статора. Низькочастотна вібрація корпусу статора
	7	3300/55	N7-2, N7-3	7 ₂ , 7 ₃	Низькочастотна вібрація корпусу статора
	8	3300/25	N8-1, N8-2	8 ₁ , 8 ₂	100 Гц вібрація спинки статора
	9	3300/25	N8-3, N8-4	8 ₃ , 8 ₄	100 Гц вібрація спинки статора
	10	3300/25	N8-5, N8-6	8 ₅ , 8 ₆	100 Гц вібрація спинки статора

Таблиця 6. 5. Конфігурація моніторингу системи вібродіагностики гідроагрегатів Г4, Г5, Г8, Г9

	SLOT	Монітор	Позначення параметрів	Датчики	Параметр
RACK 1	1	3300/12	Блок живлення		
	2	3300/03	Системний монітор		
	3	3300/20	BDP1, BDP2	БДП ₁ , БДП ₂	Переміщення диска підпятника
	4	3300/16	BWP1, BWP2	БВП ₁ , БВП ₂	Переміщення вала біля верхнього підшипника
	5	3300/16	BNP1, BNP2	БНП ₁ , БНП ₂	Переміщення вала біля нижнього підшипника
	6	3300/16	ВТР1, ВТР2	БТП ₁ , БТП ₂	Переміщення вала біля турбінного підшипника
	7	3300/55	W2W1, W2W2	2В ₁ , 2В ₂	Вертикальна вібрація верхньої хрестовини
	8	3300/55	W4WS	4В	Вертикальна вібрація кришки турбіни

	9	3300/55	G2G1, G2G2	2Г ₁ , 2Г ₂	Горизонтальна вібрація верхньої хрестовини
RACK 2	1	3300/12	Блок живлення		
	2	3300/03	Системний монітор		
	3	3300/55	G3G1,G 3G2	3Г ₁ , 3Г ₂	Горизонтальна вібрація нижньої хрестовини
	4	3300/55	G5G1, G5G2	5Г ₁ , 5Г ₂	Горизонтальна вібрація корпусу турбінного підшипника

Опитування, обробка сигналів датчиків вібромоніторингу й формування відповідних сигналів реалізується моніторами системи.

Монітори

У шасі знаходяться наступні елементи:

- Блок живлення.
- Системний монітор.
- Двохканальні монітори.

Системний монітор

Системний монітор забезпечує обробку і передачу інформації до станцій, а також в нім знаходяться всі конфігуративні уставки системи. Цей монітор має такі наступні функції:

Придушення при включенні – ця функція дозволяє кожному монітору подавляти спрацьовування тривожної сигналізації при включенні системи в мережу або при виході напруги живлення за допустимі межі. При включенні функція придушення активна протягом 2 сек.

Придушення шасі – при активізації даної функції шляхом замикання зовнішніх контактів всі монітори шасі переходять в стан "BYPASS" (Пропуск), відключаються ланцюги сигналізації, обнуляються індикатори і розмикається системне ОК реле. Контактні роз'єми активізації функції "Придушення шасі" розташовані на модулі підключення живлення (МПЖ) на зворотному боці шасі.

Напруга живлення – сім індикаторів позаду передньої панелі системного монітора сигналізують про стан напруги живлення. Є наступні контрольовані напруги: +VRH, +VRL, +7.5V +5V, REF, – 7.5V і –VT. Загальний зелений індикатор "SUPPLIES OK" (Норма

живлення) розташований на передній панелі системного монітора. Якщо індикатор світиться, то всі ланцюги живлення функціонують нормально.

Функція скидання системи – запускається натисненням кнопки RESET (Скидання) на передній панелі або замиканням зовнішніх контактів, підключених до роз'ємів на модулі підключення живлення розташованому на зворотному боці стійки.

ОК (Норма) реле – основне призначення цього реле забезпечити реакцію на стан вимірювальних каналів, підключених до шасі. ОК реле підключене до ОК схеми кожного монітора в шасі й безперервно контролює стан вимірювальних каналів, пов'язаних з моніторами. Якщо є несправність, пов'язана з датчиком або кабелем, індикатор ОК на передній панелі відповідного монітора згасне й буде поданий управляючий сигнал на ОК реле системного монітора. Оскільки реле є таким, що нормально живить, воно може застосовуватися для індикації перебоїв або втрати живлення. Зміна стану реле відбувається або після подачі сигналу "INHIBIT" (Придушення при включенні) або за наявності сигналу NOT ОК (Не норма) з будь-якого монітора шасі.

Двохканальні монітори

Двохканальний монітор – проводить опит датчиків і обробляє данні відповідно до його конфігурації, також на цих моніторах є шкала, яка відградуйована відповідно до інтервалів, які він обробляє.

Двохканальні монітори мають наступні функції:

Вимірювання радіальної вібрації (монітор 3300/16) – динамічний рух валу в площині, перпендикулярній вісі валу. Двохканальний монітор вібрації відображає значення вібрації по двох каналах (канал А і канал В).

Осьове положення (монітор 3300/20) – усереднене положення ротора або зміна положення в осьовому напрямі по відношенню до певної поверхні. Двохканальний монітор осьових переміщень забезпечує безперервне вимірювання осьового положення по двох каналах (А і В). Нормальний напрям осьових переміщень може бути як до поверхні датчика, так і від неї.

Напруга величини зазору – величина зазору вимірюється як негативна напруга постійного струму, прямо пропорційна відстані

між поверхнею датчика і контрольованою поверхнею. Величина зазору відображається на індикаторі передньої панелі після натиснення кнопки GAP (Зазор).

Двохканальне вимірювання прискорення (монітор 3300/25) – двохканальний монітор прискорення забезпечує безперервний моніторинг по двох незалежних каналах з датчиками прискорення на вході. Акселерометри зазвичай застосовуються для вимірювання високих частот. Монітор має можливість фільтрації сигналу (фільтр високих і низьких частот, смуговий фільтр) з програмуванням виділення частотних складових або діапазонів.

Двохканальне вимірювання швидкості (монітор 3300/55) – двохканальний монітор швидкості забезпечує безперервний моніторинг по двох незалежних каналах з датчиками швидкості на вході.

ОК – якщо вихідна напруга знаходиться в допустимих межах, датчик вважається в нормальному стані ОК.

Сигналізація – якщо рівень сигналу перевищить попередньо встановлені значення ALERT (Тривога) або DANGER (Небезпека) за перебігом певного часу затримки, спалахує індикатор Тривога або Небезпека і відбувається спрацьовування відповідних контактів реле Тривога або Небезпека.

Спрацював першим – для режимів Тривога і Небезпека існують самостійні схеми першого спрацьовування. Монітор з опцією перше спрацьовування позначається миганням індикатора тривоги того з каналів, який першим увійшов до стану тривоги.

BYPASS (Пропуск) – функція придушення спрацьовування, включається уручну при проведенні робіт по технічному обслуговуванню машини.

Самотестування – монітор має три рівні внутрішніх тестів:

- При включенні – виконується автоматично кожного разу при подачі живлення на систему. Виконується серія основних тестів і перевірок датчиків.

- Циклічний тест виконується автоматично під час роботи монітора. Помилки, виявлені під час роботи переривають роботу монітора, код помилки відображається на дисплеї. Якщо помилка носить не постійний характер, монітор відновить свою роботу, а код

помилки запам'ятовується до виконання тесту викликаного користувачем. Про наявність помилок, що запам'ятовані, сигналізує мигання індикатора ОК з частотою 5 Гц.

- Викликаний користувачем тест виконує аналогічний тесту при включенні перевірки і дозволяє читати і стирати помилки, що запам'ятовані під час виконання циклічного тесту. Запам'ятовані помилки відображаються миганням індикації ОК з частотою 5 Гц і індикацією номера коду помилки на дисплеї.

Якщо рівень вхідного сигналу в каналі поза межами ОК, спостерігаються наступні події:

- індикатор ОК каналу гасне;
- індикатор BYPASS каналу спалахує;
- канал відключається;
- знімається живлення з системного ОК реле.

Якщо рівень вхідного сигналу в каналі повертається в межі ОК протягом 30 секунд, індикатор ОК каналу починає мигати з частотою 1 Гц, сигналізуючи про відновлення стану ОК, індикатор BYPASS гасне, монітор підключається до системи. Після натиснення кнопки RESET на передній панелі системного монітора припиняють мигати індикатори ОК. В нормальному стані індикатор ОК має світитися постійно.

Особливості роботи з програмним забезпеченням DATA MANAGER 2000 по контролю рівней биття валу й вібрації гідроагрегатів.

Розглянемо основні програмні операції.

Запуск програми Dm2000Display:

Вибрати з меню програми:

Start → Programs → Startup → Dm2000Display

Натиснути на клавішу “Enter”

Вибрати з меню файла:


File → Open Station →

→ Dmstation 1 – для зняття показань г/а Г1÷Г4

→ Dmstation 2 – для зняття показань г/а Г5÷Г9

Натиснути на кнопку “Ok”

Обрати з меню необхідний г/а й натиснути на клавішу “Enter”

Обрати вид  Bar Graph й натиснути на клавішу “Enter”
Зняти показання (3 сторінки):

Таблиця 6. 6. Набір контрольованих параметрів

БВП ₁	→	BWP1	4B →W4WS	7 ₁ →N7-1
БВП ₂	→	BWP2	2Г ₁ →G2G1	7 ₂ →N7-2
БНП ₁	→	BNP1	2Г ₂ →G2G2	7 ₃ →N7-3
БНП ₂	→	BNP2	3Г ₁ →G3G1	8 ₁ →S8-1
БТП ₁	→	BTP1	3Г ₂ →G3G1	8 ₂ →S8-2
БТП ₂	→	BTP2	6 ₁ →N6-1	8 ₃ →S8-3
2В ₁	→	W2W1	6 ₂ →N6-2	8 ₄ →S8-4
2В ₂	→	W2W2	6 ₃ →N6-3	8 ₅ →S8-5
				8 ₆ →S8-6

Для зняття показань БДП₁ (BDP₁), БДП₂ (BDP₂) :

Відкрити правою кнопкою миші вид  Trend

В вікні Current Point обрати: BDP₁ (BDP₂)

В вікні Source обрати: 1day

Натиснути на клавішу “Enter”

Встановити вертикальний маркер в кінець графіку (вправо).

Зняти max и min значення для поточного часу. Обчислити биття диска під'ятника.

Приклад:

Таблиця 6. 7. Набір варіантів значень

Значення	1 вариант	2 вариант	3 вариант
max	0,040	0,020	-0,020
min	0,020	-0,010	-0,010
Биение диска	0,020	0,030	0,010

Операції закриття програми:

Обрати з меню файла:

File → Close station

Натиснути на клавішу “Enter”

Натиснути на кнопку ”Yes”

Можливість швидкого входу в потрібний програмний режим надають вбудовані панелі мнемонічних зображень основних

програмних режимів. Перелік та вигляд мнемонічних зображень основних програмних режимів наведено на рис. 6. 8.

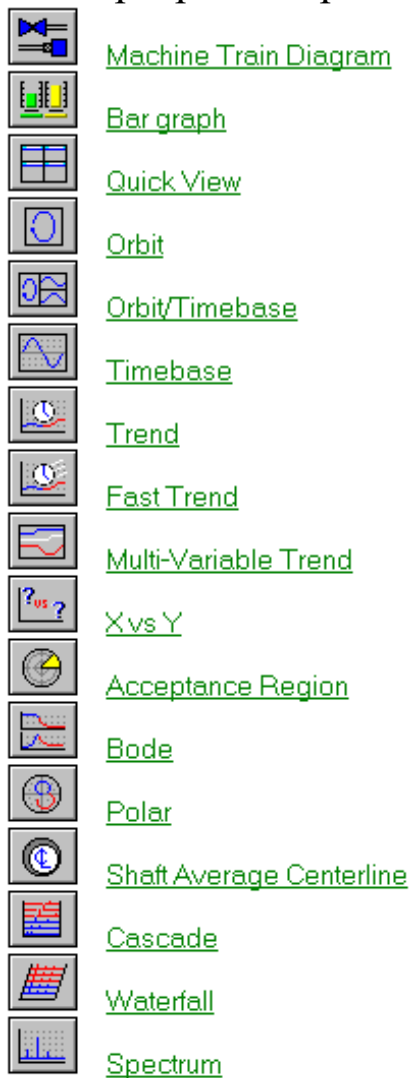
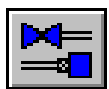
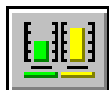


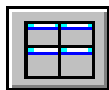
Рис. 6. 8. Мнемонічні зображення основних програмних режимів:



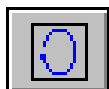
Вигляд гідроагрегата. Відображає вигляд гідроагрегата, биття валів та вібрацію.



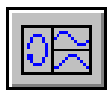
Графічна панель. Графічне зображення поточного биття валів та вібрації.



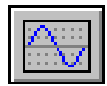
Швидкий перегляд. Вивід 4 заданих видів з переліку.



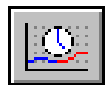
Орбіта. Вивід траєкторії руху валу в обраному підшипнику.



Орбіта /Часові характеристики. Вивід траєкторії руху валу в обраному підшипнику та сигналів датчиків.



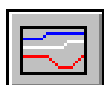
Часові характеристики. Вивід сигналу обраного датчика за попередні вісім обертів валу до запиту.



Тренд. Вивід зміни сигналу обраного датчика за визначений інтервал часу: 1 день, 7 днів, 30 днів.



Швидкий тренд. Вивід зміни сигналу обраного датчика за 10 сек.



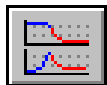
Мультитренд. Вивід зміни сигналів декількох обраних датчиків.



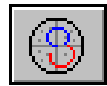
X з Y. Графічна залежність між двома обраними параметрами.



Область допустимих значень. Графічне відображення відхилень від встановлених значень обраного параметру за 1 день, 7 днів, 30 днів.



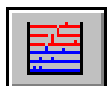
Діаграми Бодє. Вивід АЧХ та ФЧХ обраного датчика.



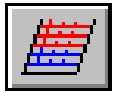
Діаграми Бодє в полярних координатах. Вивід АЧХ та ФЧХ обраного датчика в полярних координатах.



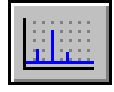
Середнє положення вісі валу. Вивід середнього положення вісі валу для обраного підшипника.



Каскадна діаграма. Вивід каскадної діаграми обраного датчика.



Водопадаюча діаграма. Вивід водопадаючої діаграми обраного датчика.



Спектр. Вивід діаграми спектру розкладення сигналу обраного датчика в ряд Фур'є за частотою до 250 Гц та зворотною до (16 ×).

Зазначена програмна система за наявних потреб та відповідних технічних ресурсів дозволяє скласти й формувати потрібну робочу конфігурацію системи моніторингу, табл. 6. 8.

Таблиця 6. 8. Конфігурація системи моніторингу

	SLOT	Монитор	Датчики	Параметр
RACK 1	3	3300/20	БДП ₁ , БДП ₂	Переміщення диска підпятника
	4	3300/16	БВП ₁ , БВП ₂	Переміщення вала біля верхнього підшипника
	5	3300/16	БНП ₁ , БНП ₂	Переміщення вала біля нижнього підшипника
	6	3300/16	БТП ₁ , БТП ₂	Переміщення вала біля турбінного підшипника
	7	3300/55	2В ₁ , 2В ₂	Вертикальна вібрація верхньої хрестовини
	8	3300/55	4В	Вертикальна вібрація кришки турбіни
	9	3300/55	2Г ₁ , 2Г ₂	Горизонтальна вібрація верхньої хрестовини
RACK 2	3	3300/55	3Г ₁ , 3Г ₂	Горизонтальна вібрація нижньої хрестовини
	4	3300/55	5Г ₁ , 5Г ₂	Горизонтальна вібрація корпусу турбінного підшипника
	5	3300/55	б ₁ , б ₂	Низькочастотна вібрація спинки статора
	6	3300/55	б ₃ , 7 ₁	Низькочастотна вібрація спинки статора. Низькочастотна вібрація корпусу статора

	7	3300/55	$7_2, 7_3$	Низькочастотна вібрація корпусу статора
	8	3300/25	$8_1, 8_2$	100 Гц вібрація спинки статора
	9	3300/25	$8_3, 8_4$	100 Гц вібрація спинки статора
	10	3300/25	$8_5, 8_6$	100 Гц вібрація спинки статора

Наведена таблиця відповідає варіантам практичній реалізації діючої системи механічного моніторингу гідроагрегата. Вона охоплює механічну та вібраційну частину характеристик агрегата. Крім того є ще щонайменше одна, безпосередньо пов'язана з механічними система, надто важлива з точки зору енергетичних преретворень, що теж вимагає моніторингу. Це робочий зазор гідрогенератора.

6. 4. Моніторинг робочого зазору гідрогенератора

Порушення симетрії повітряного зазору між ротором і статором гідрогенераторів має системні наслідки. Крім погіршення суто електричних характеристик генераторів, воно викликає збільшення биття валу, підвищення температури сегментів направляючих підшипників, а також появу низькочастотної вібрації сердечника статора і хрестовин, що також може бути причиною пошкоджень і відмов в роботі.

Існуючі в даний час практичні й керівні матеріали за визначення нерівномірності повітряного зазору, не дають можливості об'єктивно оцінити ступінь асиметрії форм ротора, статора й її вплив на стан генератора. Так РД 34. 31. 305-96 «Методичні вказівки за визначенням форм ротора і статора гідрогенераторів й оцінки симетрії повітряного зазору» вимагають: періодичний контроль форм ротора і статора гідрогенераторів і оцінку симетрії повітряного зазору проводити при кожному капітальному ремонті, але не рідше, ніж 1 раз в 5 років, а також у разі виникнення при подачі збудження: підвищених низькочастотних вібрацій статора й хрестовини, биття валу й підвищення температури сегментів направляючих підшипників. Якщо передбачається проведення роботи по виправленню форм ротора і статора, то такі вимірювання необхідно проводити двічі: перед

ремонт і після нього. Оцінка симетрії повітряного зазору здійснюється з урахуванням статичних і динамічних форм, а також величин биття валу.

При підвищеному битті валу, пов'язаному з наявністю дефектів водоводу або вузлів гідротурбінного устаткування («злам» валу, небаланси вузлів в проточній частині й ін.), визначення форм ротора і статора проводиться після попереднього усунення причин биття валу.

Статичні форми ротора і статора можуть визначатися традиційним способом – вимірюваннями за допомогою щупу при повороті ротора. В той же час використання датчиків VIBRO-METER для вимірювання повітряного зазору дозволяє автоматизувати процес вимірювання форми ротора і статора, повністю виключивши вплив людського чинника на результати вимірювань. Крім того, датчики, встановлені на статорі дозволяють зняти і динамічну форму ротора.

Статична форма ротора визначається при його повороті. За допомогою щупа вимірюються зазори вгорі і внизу ротора, між серединою кожного полюса і фіксованою довільною точкою статора.

Результати вимірювань оформляються в табличній формі і надається їх графічне відображення: величини зазору між кожним полюсом ротора і довільно вибраною точкою статора наносяться на графік або в полярних, або в прямокутних координатах. При плавній формі огину полюсів ротора (без різких – більше 10–15% відмінностей у величинах зазорів під сусідніми полюсами) кількісною оцінкою спотворення є різниця між максимальною величиною зазору ($A_{p \max}$) і середнім значенням по всіх точках вимірювання ($B_{p. \text{ ср.}}$), віднесена до середнього значення. Ця величина, узята у відсотках, визначає ступінь спотворення форми ротора:

$$\Delta p = [(A_{p \max} - B_{p. \text{ ср.}}) / B_{p. \text{ ср.}}] * 100\%.$$

Такий спрощений аналіз допустимий при плавно змінній формі полюсів ротора. При складній формі полюсів ротора, отриманій за наслідками послідовного вимірювання величин зазорів між всіма полюсами і обраною точкою статора, її доцільно розкласти в ряд Фур'є. Тоді перша гармонійна складова характеризуватиме ексцентриситет, друга – еліпсність, а вищі гармоніки – складніші форми спотворення ротора. Набуті амплітудні значення гармонійних складових, віднесені до величини постійної складової розкладання і

представлені у відсотках, адекватні наведеному вище визначенню ступеня спотворення форми ротора. Рекомендований аналіз дозволяє виявити й оцінити зі спостережуваними аномальними явищами – підвищеною вібрацією сталевих конструкцій і нагрівами сегментів направляючих підшипників.

Динамічна форма ротора визначається в режимі холостого ходу без збудження й зі збудженням при зміні частоти обертання. При цьому є можливість роздільної оцінки впливу відцентрових (при вибігу на холостому ході без збудження) і електромагнітних сил (при подачі збудження) на форму ротора, а отже, отримати кількісну оцінку ослаблення посадки обода на спицях працюючого агрегату.

Статична форма статора визначається одночасно з вимірюванням форми ротора при його повороті, проте, в даному випадку щупом також вимірюються зазори між яким-небудь фіксованим полюсом ротора і декількома (не менше ніж 8) точками розточування статора, симетрично розташованими по його колу.

Системний моніторинг стану зазору

Динаміка зміни повітряного зазору безпосередньо відображає технічний стан механічних вузлів гідрогенератора. Динамічний повітряний зазор є важливим параметром, що демонструє слабкі і сильні місця механічних структур гідроагрегату. Форма повітряного зазору визначається взаємодією всіляких внутрішніх і зовнішніх сил різної природи: доцентровою, магнітною, механічною, гідравлічною, геодезичною, тепловою тощо. Зміна, спотворення повітряного зазору при різних режимах роботи гідроагрегату дозволяє визначити силу і причину, що викликає дисбаланс. Своєчасне відчуження цієї причини попередить можливу відмову. Незбалансований повітряний зазор може безпосередньо викликати дисбаланс струму фаз, локальний струс структур ротора і статора, локальний перегрів ротора і статора, а також прискорити процес старіння обмоток, буде причиною вібрації генератора й ін. Всі перераховані процеси прискорюють загальне старіння генератора, підвищений знос машини, підвищують експлуатаційні витрати, і в окремих випадках, за певних умов призводять до його передчасного виходу з ладу.

Таким чином, зміни геометрії повітряного зазору при різних режимах роботи гідрогенератора дозволяють визначити силу і причину, що викликає дисбаланс. Своєчасне виявлення і усунення таких причин дозволяє запобігати аваріям і скорочувати витрати на поточне обслуговування при підвищенні рівня функціональної надійності устаткування.

Мають також значення й технічні особливості практичної реалізації зазначеної системи.

Таким чином система моніторингу повітряного зазору:

1. Забезпечує безперервний контроль робочого повітряного зазору між статором і ротором у всіх робочих режимах і при зупиненій машині;
2. Дозволяє цифрову обробку даних і представлення їх в графічному форматі;
3. Представляє наочну картину динаміки зміни стану робочого зазору.
4. Дозволяє вчасно виявляти відхилення і своєчасно реагувати, попереджаючи аварійні ситуації;
5. Забезпечує вимірювання в широкому часовому діапазоні.

Первинні перетворювачі інформації вказаної системи включають 4 – 8 датчиків ємностей, що укріплюються на поверхні статора, зверненій до ротора. Кількість датчиків визначається розмірами агрегату, типом конструкції і кількістю секцій статора. Місця кріплення датчиків визначаються положенням опорного підшипника гідроагрегату й низкою інших чинників. На валу генератора під першим полюсом кріпиться датчик положення ротора.

Кожен сигнал виміру величини повітряного зазору обробляється спеціалізованим мікроконтролером, що здійснює попередню обробку даних і передачу їх на центральний комп'ютер системи, що забезпечує зберігання і представлення змінюваних даних.

Основна мета такої системи полягає в зборі, обробці і представленні інформації в зрозумілій і зручній формі. Для цього вона має розширений набір функцій дослідження даних у вигляді перетворення Фур'є, спектрального аналізу, представлення даних в полярній формі координат і ін. Вона відображає загальну картину технічного стану генератора: форму статора і ротора, розташування

геометричних центрів, концентричність кіл, геометричні координати положення ротора і ін.

Принцип дії системи контролю геометрії

У основу системи моніторингу повітряного зазору покладена запатентована високочастотна ємнісна технологія вимірювання повітряного зазору. Ця технологія розроблена для безперервного виміру значень повітряного зазору між ротором і статором гідрогенератора під час його роботи. Принцип ємнісного вимірювання обрано як найбільш стабільний і стійкий до різного роду збурень і дій експлуатаційних чинників. Ніяка інша система з існуючих технологій вимірювання неспроможна забезпечити потрібний технічний рівень. Інші системи теж недостатньо надійні й вимагають регулярного обслуговування, щонайменше очищення. Зокрема, оптичні вимірювальні системи в даному застосуванні недостатньо надійні й вимагають періодичного очищення, магнітні не забезпечують необхідної точності й чутливі до робочих режимів машини, інші методи також не забезпечують необхідної робочої стабільності й точності.

Система виміру магнітного потоку теж не забезпечує достатньої точності, не функціонує при розгоні машини залежить від стану обмотки ротора тощо. Інші системи принципово не придатні для використання безпосередньо в повітряному зазорі за сильних магнітних полів, забрудненості й т. і.

Використаний ємнісний метод повністю забезпечує необхідну функціональну стабільність при необхідній точності 3%, повторюваності вимірювань на рівні 0,7%. Так, при величині зазору 15 мм система дозволяє визначати відхилення параметра з точністю 0,1 мм.

При цьому датчики є пасивними елементами й не вимагають додаткового обслуговування. Типові забруднювачі робочого зазору: масляні бризки й вугільний пил, осідаючи на поверхні датчиків не знижують їх технічних характеристик.

Система вимірювання зазору виконана на локальному перетворювачі на основі датчика електричного поля LS 12 X і електронного блоку попередньої обробки ILS 73X сполучених між собою двома 5 метровими кабелями. Датчик має два електроди (передавач і приймач). Їх зв'язок модулюється при кожному проході полюса ротора повз електроду, рис. 6. 9.

При цьому на електрод передавача від зовнішнього генератора подається сигнал, частотою 1 МГц.

Локальна вимірювальна система ILS 73X на підставі отриманих даних формує три вихідних сигнали:

- профіль полюса – миттєве значення величини зазору між полюсом і датчиком;
- профіль ротора – мінімальна величина повітряного зазору кожного полюса;
- мінімальний зазор – мінімальна величина повітряного зазору для всіх полюсів.

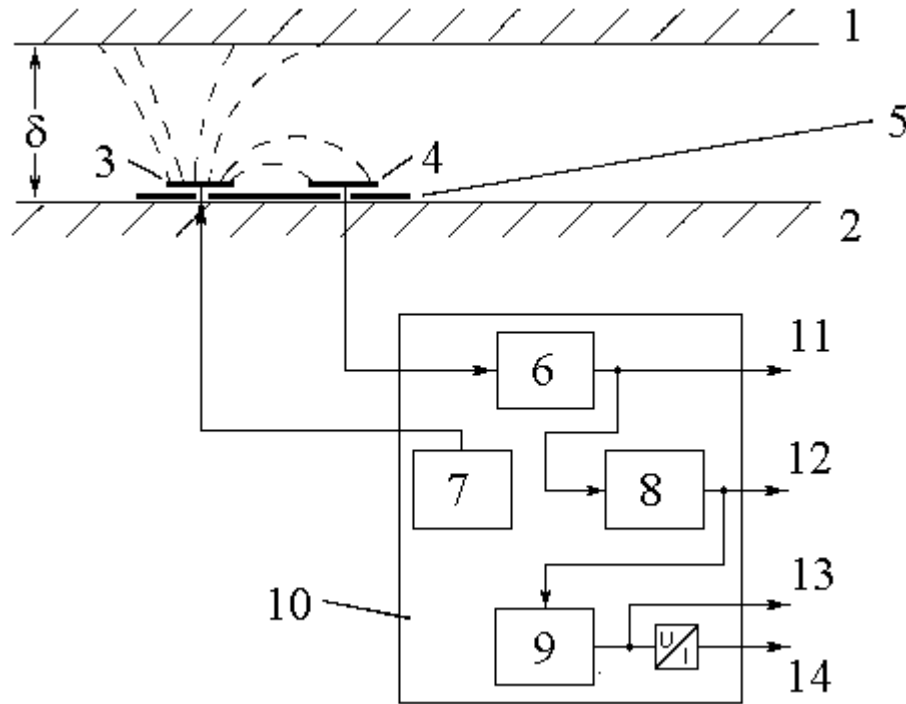


Рис. 6. 9. Функціональна схема системи вимірювання величини зазору: 1 – ротор, 2 – статор, 3 – випромінювач , 4 – приймач, 5 – датчик перетворювач, 6 – виділення профілю поля, 7 – генератор 1 МГц, 8 – виділення профілю ротора, 9 – виділення мінімального зазору, 10 – формувач сигналів, 11 – профіль поля, 12 – профіль ротора, 13 – мін. зазор U, 14 – мін. зазор I.

Система контролю використовує датчик LS 120 електричного поля для вимірювання повітряного зазору. Перетворювач має два електроди: електрод–передавач і електрод–приймач, які ємнісно зв'язані. Зв'язок модулюється кожного разу, коли полюс ротора проходить повз електрод. Електрод–передавач перетворювача збуджується сигналом частотою 1 МГц, отриманим від електронного блоку ILS730.

Отримане високочастотне електричне поле сприймається електродом–приймачем, детектується та формується. Система вимірювання повітряного зазору має 3 виходи, які доступні на затискачах приєднувача електронного блоку:

1. Профіль полюса, вихід показує миттєве значення повітряного зазору між перетворювачем і ротором;
2. Профіль ротора, вихід показує мінімальну величину повітряного зазору для кожного полюса;
3. Мінімальний зазор, вихід відображає величину мінімального повітряного зазору для всіх полюсів ротора.

Вихідні сигнали вимірювальної системи мають напруги 0-10 В, розраховані на струми 4-20 мА. Живлення вимірювального перетворювача = 24 В постійного струму.

Профіль ротора й мінімальний зазор

Функціональний вихід «профіль ротора» забезпечує інформацію про мінімальне значення зазору, зміряне для кожного полюса. Цей напівдинамічний сигнал є похідним від зміряної величини профілю полюса. При цьому слід зважати, що величина профілю ротора відстає від профілю полюса на один полюсний поділ.

Функціональний вихід "мінімальний зазор" відповідає мінімальній величині зазору зміряного для всіх полюсів ротора. Цей квазістатичний сигнал використовується в системі захисту.

Система вимірювання повітряного зазору використовується також для зняття форми ротора при встановленні датчика на статорі, й для зняття форми статора при встановленому датчику на роторі.

Співвідношення сигналів локального перетворювача наведено на рис. 6. 10.

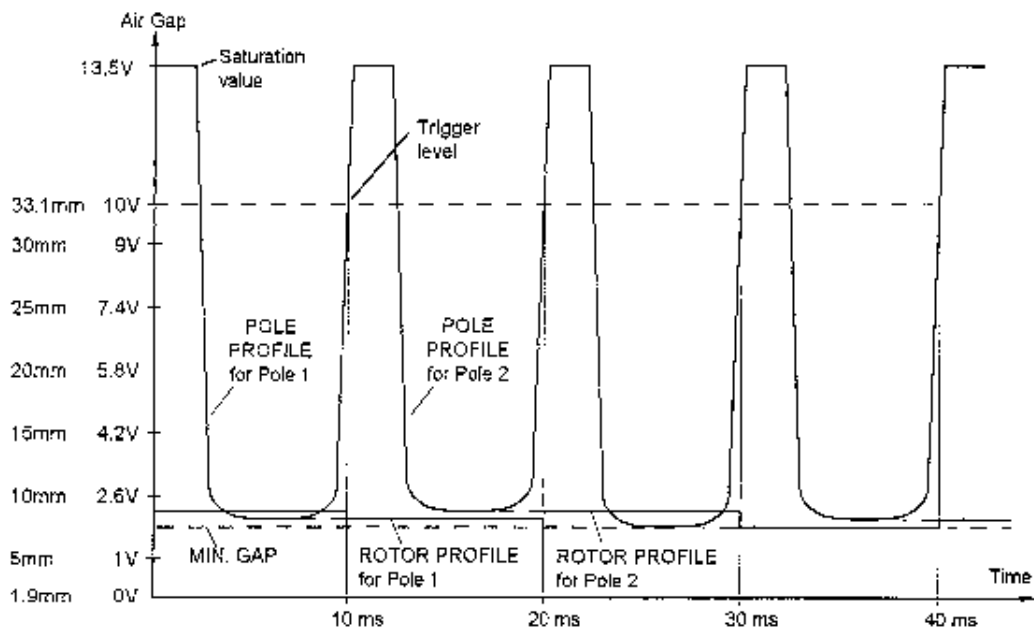


Рис. 6. 10. Співвідношення сигналів профілю ротора, профілю полюса і мінімального зазору.

Мінімальний зазор відповідає мінімальній величині зміряній для всіх полюсів ротора.

Система контролю зазору по суті вимірює його величину між полюсом і датчиком. Тому важливо розрізняти значення зазору зміряне і фактичне, рис. 6. 11.

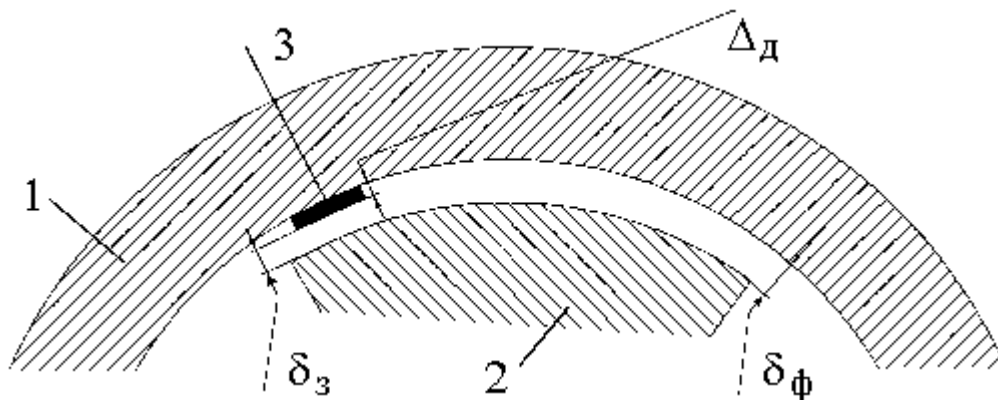


Рис. 6. 11. Вимірювані й фактичні значення зазору: 1 – статор, 2 – ротор, 3 – датчик, δ_z – змірене, δ_f – фактичне значення, Δ_d – товщина датчика.

Фактичне значення зазору відрізняється від зміряного на товщину електроду датчика і його кріплення. Товщина електроду датчика LS 120 складає 3,8 мм, LS 121 – 4,8 мм, клеїв 0,3 – 0,5 мм. Кількість датчиків по колу робочого зазору – 12.

Вихідна характеристика вимірювального перетворювача за напругою та струмом практично технічно лінійна, рис. 6. 12.

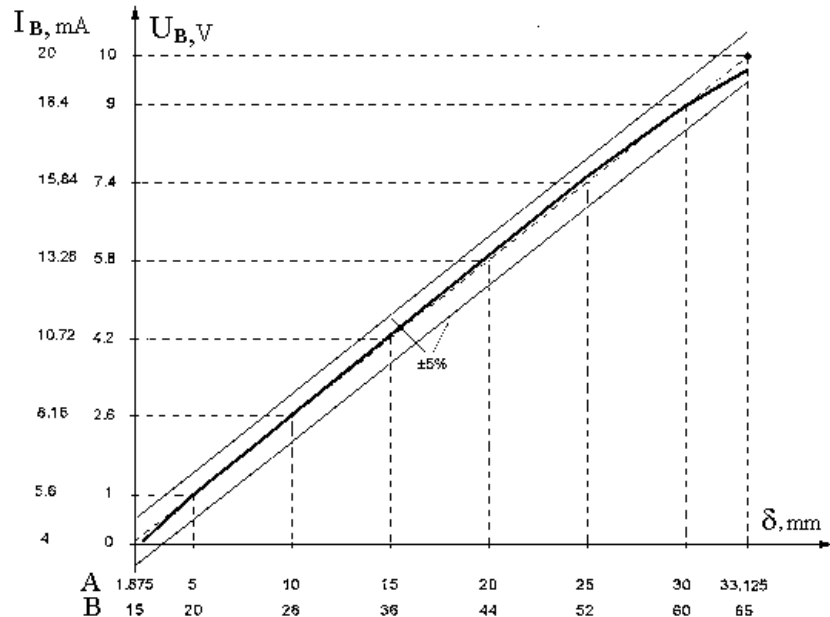


Рис. 6. 12. Вихідна характеристика вимірювального перетворювача: А – LS 120, ILS – 730; В – LS 121, ILS – 731.

В якості робочої використовується частина зовнішньої характеристики, відповідна інтервалу 5 (20) – 30 (60) мм.

Кріплення датчика здійснюється на пакеті активної сталі, рис. 6.13.

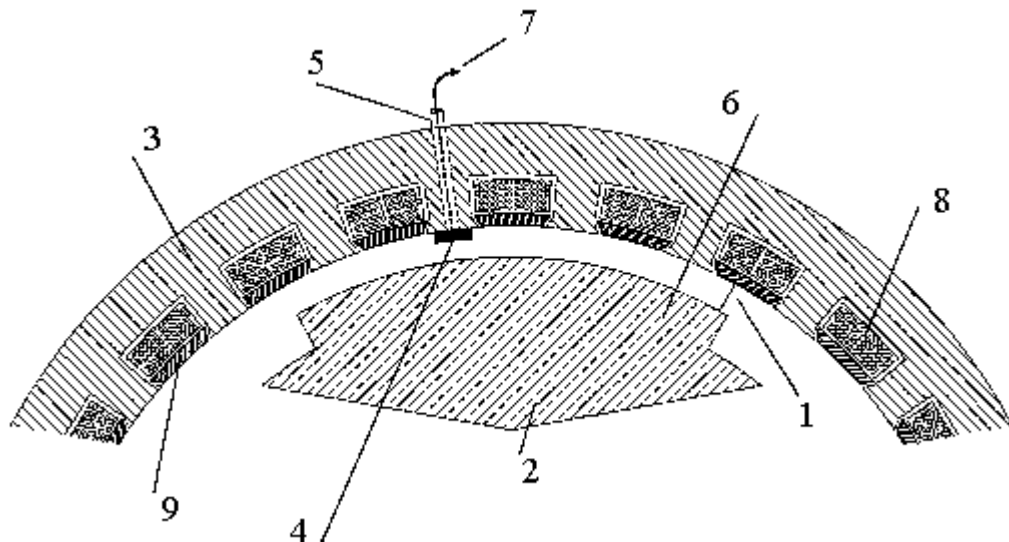


Рис. 6. 13. Конструктивні особливості розташування датчика в робочому зазорі гідрогенератора: 1 – робочий зазор; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – датчик; 5 – захистна оболонка; 6 – полюс ротора; 7 – кабель приєднання; 8 – обмотка статора; 9 – фіксуючий клин пазу.

Особливості розташування електроду датчика по висоті активного пакету сталі гідрогенератора і його підключення показані на рис. 6. 14.

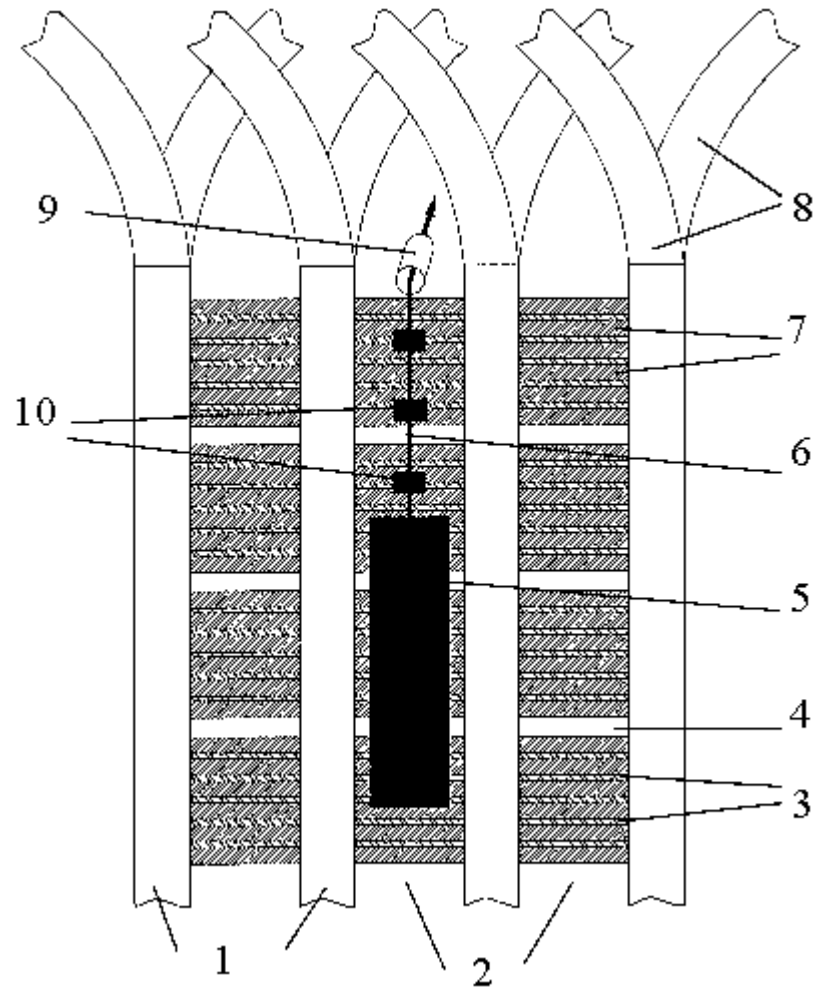


Рис. 6. 14. Розташування електродів датчика на активному пакеті статора: 1 – обмотка статора, 2 – залізо статора, 3 – ізоляційний шар, 4 – канал вентиляції, 5 – пластина датчика, 6 – з'єднуючий кабель, 7 – металеві ламіновані листи, 8 – кінці обмотки, 9 – захисна оболонка, 10 – кабельні з'єднувачі.

Для визначення форми ротора вимірювання проводяться в одному перетині статора по кожному полюсу ротора.

Форма статора визначається шляхом виміру значень зазору між одним полюсом ротора й активною сталлю статора при повороті ротора на 1 – 2 полюсних поділи.

Значення повітряних зазорів в діаметрально протилежних точках не повинні відрізнятись більш ніж на 20%.

За наслідками вимірювань будуються формуляри форми статора і форми ротора у вигляді діаграм відхилень від середніх значень робочого зазору, рис. 6. 15.

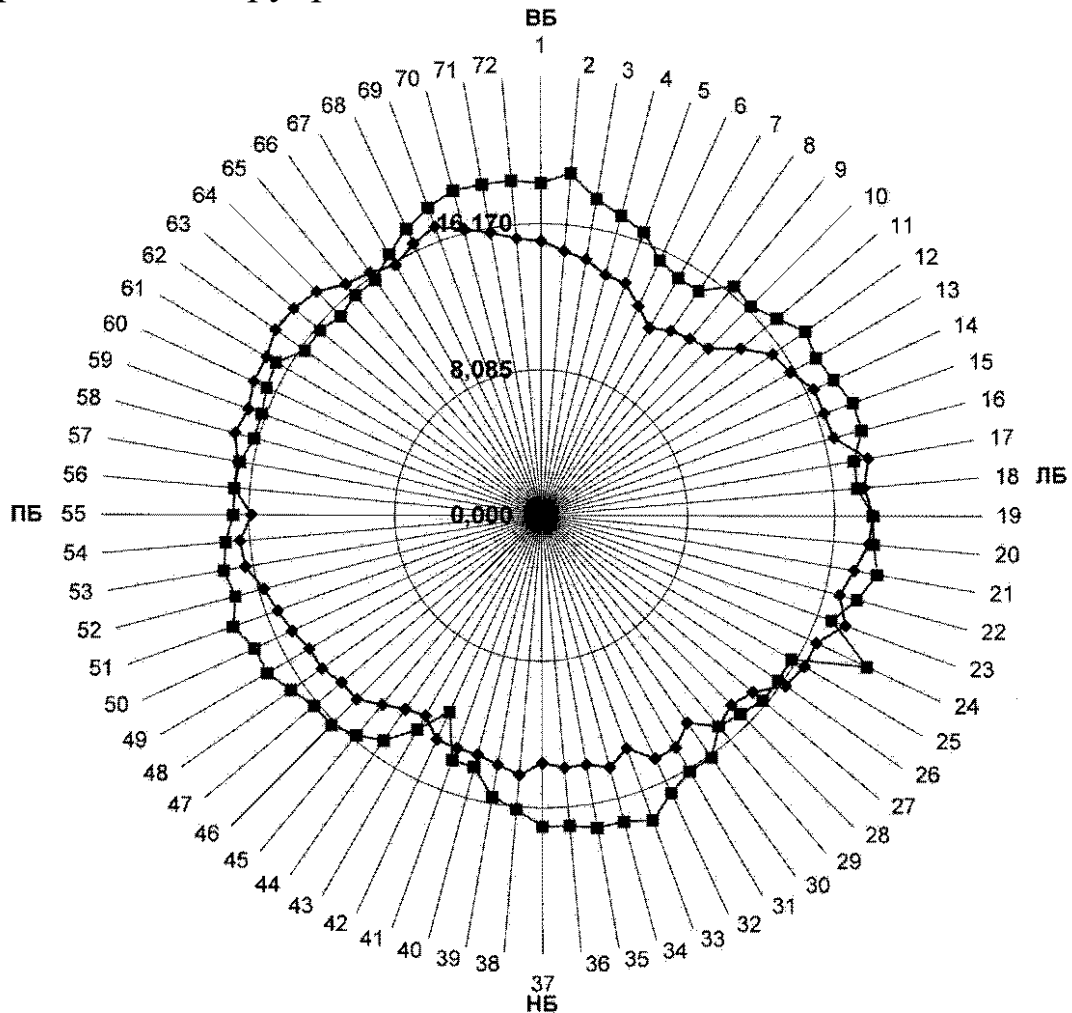


Рис. 6. 15. Діаграма відхилень від середніх значень робочого зазору

Вимірювання мають проводитися безперервно. Контроль поточних характеристик робочого зазору гідрогенератора має важливе практичне значення з експлуатаційної точки зору. Це дозволяє вчасно реєструвати критичні його відхилення, що безпосередньо впливають на функціональну ефективність та попереджувати аварійні ситуації.

Діючі системи моніторингу дозволяють суттєво впливати на надійність роботи основного енергетичного обладнання ГЕС. Однак можливе їх доповнення й розширення, наприклад в бік гідромеханічного обладнання: робочого колеса турбіни, НА тощо.

Важливим окремим завданням на діючих ГЕС є моніторинг стану гідроенергетичних споруд. Не секрет, що каскад Дніпровських ГЕС має

споруди, яким вже понад 80 років. Тому це питання є надто важливим не тільки з погляду технічного, але й безпеки. Воно є системним, оскільки включає в себе одержання, накопичення, обробку щонайменш даних геологічних та зміни фактичного стану споруд, включаючи їх фільтраційні якості, криві депресії тощо. Це забезпечується відповідними вимірюваннями, спостереженнями, програмними засобами, що дозволяють відслідковувати зміни. Для цього встановлюється необхідне контрольно-вимірвальне обладнання, що забезпечує поточну інформацію системи моніторингу.

7. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторний практикум з питань моніторингу обладнання та споруд ГЕС присвячений практичним аспектам вивчення дисципліни. Він спрямований на формування практичних навичок реалізації діагностики обладнання й споруд ГЕС. Зорієнтований на експлуатацію основного обладнання станцій. Включає важливі практичні питання вимірювань, перетворень, тестувань обладнання тощо.

Лабораторна робота № 1

Тема: Тестування й визначення характеристики датчика вимірювання биття валу.

Мета роботи: Дослідження характеристик датчика вимірювання биття валу системи віброконтролю гідроагрегату.

Предмет дослідження: датчик зрушень валу гідроагрегата.

1. 1. Короткий теоретичний опис

В процесі експлуатації необхідно мати інформацію про рівень биття валу в контрольованих точках гідроагрегату, який не має перевищувати допустимих значень. Контроль здійснюється віброконтроллером BENTLY NEVADA серії 3300. В якості датчиків використовуються струмовихорові датчики биття валу.

Принцип дії таких датчиків заснований на зміні електричного поля, що створюється датчиком, від зміни відстані між ним і валом гідроагрегату. Датчики контролюють биття валу щодо верхнього направляючого й нижнього, турбінного підшипників та осьового зсуву диску під'ятника. Оскільки переміщення валу не є однонаправленим, тому контролювати переміщення валу необхідно двома струмовихоровими датчиками відносного переміщення в одній площині під кутом 90°: Таке розташування датчиків дозволяє діагностичному обладнанню визначати як переміщення валу (змінна складова) так і усереднене положення осі валу (постійна складова сигналу датчика, відповідає усередненому значенню зазору) в зазорі підшипника. Положення вісі валу – важливий показник стану

підшипника й характеру діючих на нього зусиль. Крім того цей датчик використовується для отримання строб-імпульсу напруги обертання валу за рахунок виточки на ньому. Цей імпульс використовується для вимірювання швидкості обертання, зсуву фаз тощо. Інформація про кут зрушення фаз необхідна для визначення й усунення дисбалансу ротора, неспіввісності, нестабільності в підшипнику, тріщин валу, дисбалансових резонансів і інших поширених дефектів. Сигнал з цього датчика необхідний для повноцінної роботи програми DATA MANAGER 2000 віброконтроллера BENTLY NEVADA серії 3300.

В якості установки для імітації необхідної відстані між датчиком і валом гідроагрегату використовується стенд, який складається з мішені й мікрометра, що вимірює відстань між датчиком і мішенню.

1. 2. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка представлена на рис. 1.1.

Установка містить:

- досліджуваний датчик;
- блок перетворювача;
- джерело постійної напруги;
- електронний вольтметр (мультиметр);
- мікрометр.

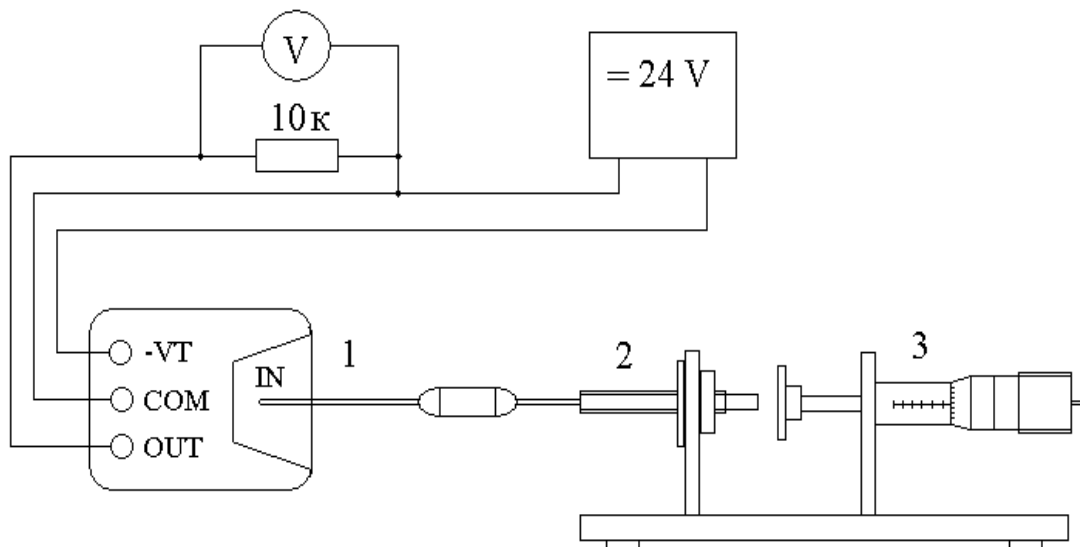


Рис. 1. 1 – Лабораторна установка: 1 – перетворювач, 2 – датчик, 3 – мікрометр.

Датчик закріплюється на стенді нерухомо. Мікрометр дозволяє встановлювати й вимірювати відстань між датчиком та мішенню, що необхідно для знаття його характеристики.

1. 3. Вказівки до виконання роботи

В якості додаткової літератури рекомендується скористатися [21].

1. 4. Зміст роботи

1. Зібрати схему досліджень.
2. Встановити необхідне положення датчика.
3. Зняти характеристики датчика: напруга виходу електронного блоку залежно від відстані між датчиком і мішенню $U_{вих} = f(L)$.
4. Побудувати графічну залежність $U_{вих} = f(L)$.

1. 5. Порядок виконання роботи

1. Досліджуваний датчик встановлюється в спеціальний утримувач.
2. Датчик підключається до електронного блоку інтегрованими кабелями.
3. Джерело постійної напруги 24 В підключається до клем V_t і СОМ електронного блоку.
4. Включити резистор 10 кОм між клемми OUT і СОМ електронного блоку
5. Включити вольтметр між клемми OUT і СОМ електронного блоку. Діапазон зміни напруги від 0 до 30 В.
6. Змінюючи відстань між датчиком і мішенню в межах 0–2 мм, вимірюється напруга для кожного калібрувального розміру.
7. Результати внести до таблиці.
8. За результатами проведених досліджень будується залежність $U_{вих} = f(L)$.

1. 6. Зміст звіту

1. Схема лабораторної установки для перевірки датчика.
2. Перелік використаного обладнання й устаткування.
3. Знята залежність $U_{вих} = f(L)$.
4. Порівняння знятої залежності з паспортними даними датчика.

5. Висновки й рекомендації

Лабораторна робота № 2

Тема: Тестування й частотні характеристики датчика вимірювання вібрації.

Мета роботи: Дослідження характеристик датчика вимірювання вібрації.

Предмет дослідження: датчик вібрації, характеристики датчика вимірювання вібрації конструктивних вузлів гідроагрегату для системи віброконтролю гідроагрегату.

2. 1. Короткий опис

В процесі експлуатації необхідно мати інформацію про рівень вібрації конструктивних вузлів в контрольованих точках гідроагрегату, яка не повинна перевищувати допустиму. Контроль здійснюватися віброконтроллером BENTLY NEVADA серії 3300, як датчики використовуються датчики вимірювання вібрації. Принцип дії цих датчиків заснований на зміні електричного сигналу створюваного датчиком від величини вібрації конструктивних вузлів гідроагрегату. Датчики контролюють вібрацію верхньої і нижньої хрестовини, кришки турбінного підшипника і вібрацію заліза статора.

В якості установки реалізації вібрації використовується вібростенд, який складається з вібростолу, на якому встановлюється датчик, що перевіряється, і датчика переміщення, що вимірює відстань між датчиком і вібростолом (амплітуду вібрації). Вібрація вібростолу задається зовнішнім генератором.

2. 2. Вказівки до виконання роботи

Як додаткова література рекомендується скористатися [20].

2. 3. Зміст роботи

Визначення характеристики датчика: напруга виходу датчика залежно від відстані між датчиком переміщення й вібростолом

$$U_{\text{вих}} = f(F).$$

2. 4. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка представлена на рис. 2. 1.

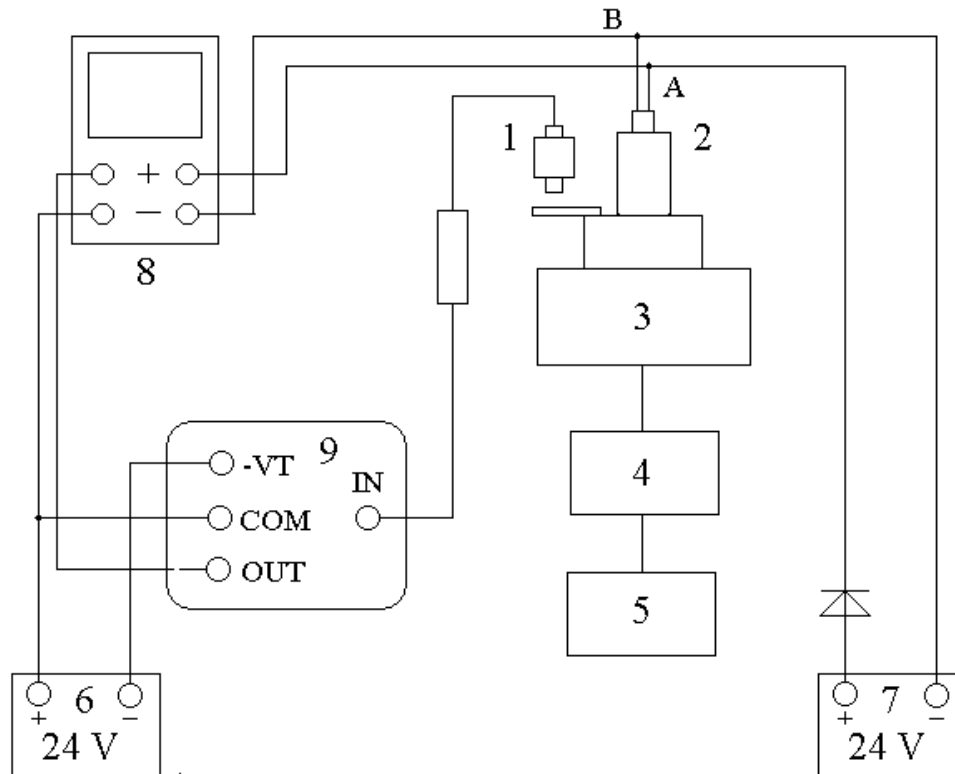


Рис. 2. 1 – Лабораторна установка: 1 – датчик переміщень, 2 – датчик вібрації, 3 – вібростіл, 4 – генератор, 5 – підсилювач, 6, 7 – джерела живлення, 8 – осцилограф, 9 – перетворювач.

Установка містить:

- досліджуваний датчик вібрації (VELOMITOR);
- датчик переміщень (PROBE) з блоком перетворювача (PROXIMITOR);
- джерела постійної напруги (TK15);
- генератор (SIGNAL GENERATOR);
- осцилограф (OSCILLOSCOPE)
- вібростіл (SHAKE TABLE)

2. 5. Порядок виконання роботи

1. Досліджуваний датчик встановлюється в спеціальний утримувач на вібростолі.
2. Підключити осцилограф до висновків досліджуваного датчика.
3. Датчик переміщення підключається до електронного блоку

інтегрованими кабелями і встановлюється над вібростолом.

4. Джерела постійної напруги 24 В підключаються до клем VT і СОМ електронного блоку й до досліджуваного датчика.

5. Підключити осцилограф між клемми OUT і СОМ електронного блоку. Встановити відстань між датчиком і вібростолом 1 мм.

6. Подати необхідну частоту на вхід вібростолу від генератора.

7. За результатами проведених досліджень будується залежність

$$U_{\text{вих}} = f(F).$$

2. 6. Зміст звіту

1. Схема лабораторної установки для перевірки датчика.
2. Перелік використаного устаткування.
3. Знята залежність $U_{\text{вих}} = f(F)$.
4. Порівняння знятої залежності з паспортними даними датчика.
5. Висновки й рекомендації.

Лабораторна робота № 3

Тема: Тестування і характеристики датчика вимірювання повітряного зазору гідрогенератора.

Мета роботи: Дослідження датчика вимірювання повітряного зазору гідрогенератора.

Предмет дослідження: датчик вимірювання робочого повітряного зазору ротор – статор гідрогенератора.

3. 1. Короткий опис

Повітряний динамічний зазор – основний робочий параметр, що безпосередньо визначає енергетичні характеристики гідрогенератора, додатково відображає слабкі й сильні місця механічних структур гідрогенератора. Форма повітряного зазору визначається взаємодією всіляких внутрішніх і зовнішніх сил різної природи: доцентровою, магнітною, механічною, гідравлічною, геодезичною, тепловою тощо.

Зміни (спотворення) повітряного зазору при різних режимах роботи гідрогенератора дозволяє визначити силу і причину, що викликає дисбаланс. Своєчасне усунення цієї причини запобігає можливій пошкодженню.

Повітряний незбалансований зазор може безпосередньо викликати дисбаланс струму фаз, локальну зміну структур ротора і статора, локальний перегрів ротора і статора, прискорити процес старіння ізоляції обмоток, а також бути причиною вібрації генератора і ін.

Всі вище перераховані процеси прискорюють старіння генератора, підвищують експлуатаційні витрати, і в окремих випадках, призводять до виходу його з ладу.

3. 2. Вказівки до виконання роботи

Як додатковою літературою рекомендується скористатися [20].

3. 3. Зміст роботи

Зняття характеристики датчика: напруга виходу електронного блоку залежно від значень повітряного зазору $U_{вих} = f(L)$

3. 4. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка представлена на рис. 3. 1.

Установка містить:

- досліджуваний датчик LS 120;
- блок перетворювача;
- джерело постійної напруги;
- електронний вольтметр (мультиметр);
- набір калібрувальний розмірів для фіксації величини повітряного зазору.

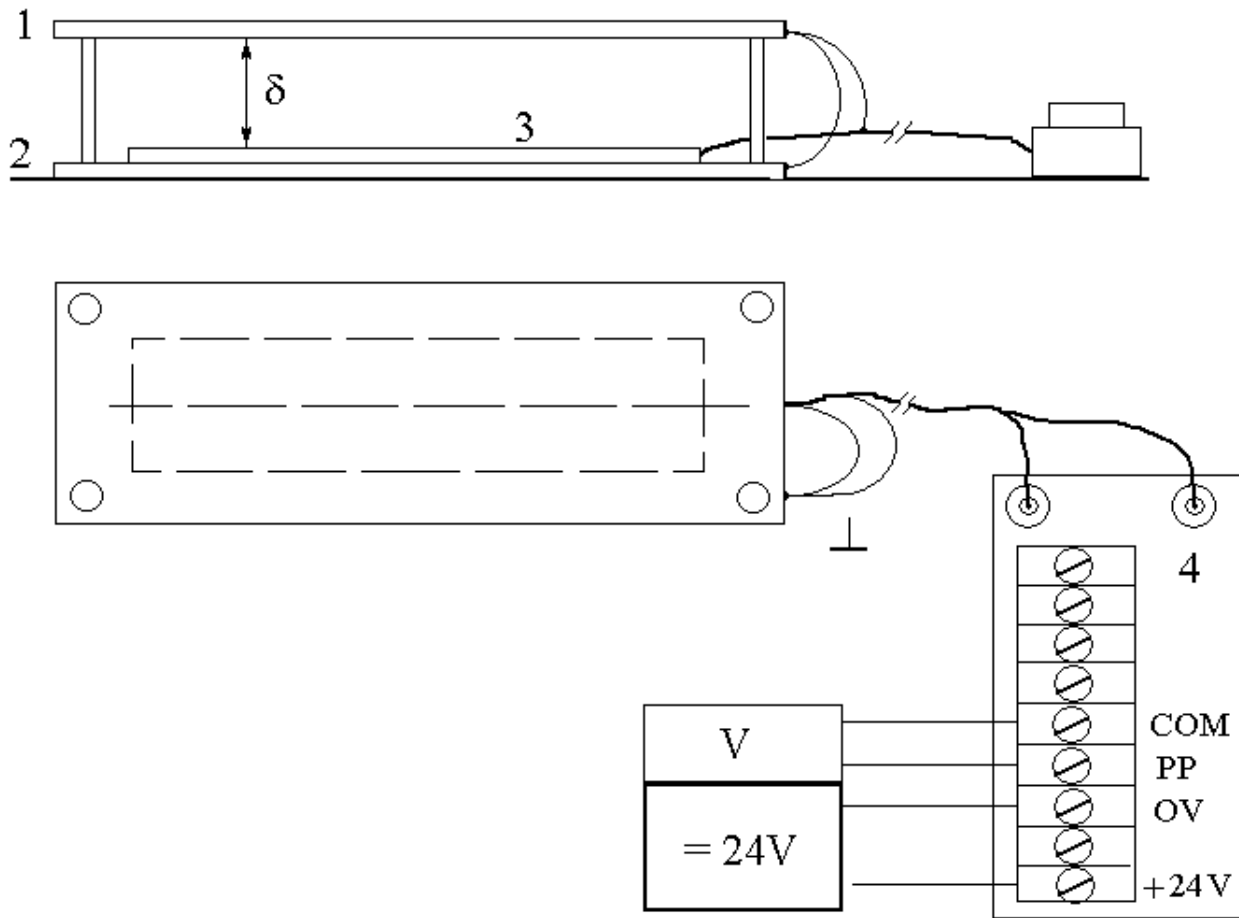


Рис. 3. 1 – Лабораторна установка: 1, 2 – пластини тримача, 3 – датчик, 4 – під'єднувач.

3. 5. Порядок виконання роботи

1. Досліджуваний датчик LS 120 встановлюється в спеціальний утримувач.

2. Датчик LS 120 підключається до електронного блоку ILS 730 інтегрованими коаксіальними кабелями (REC і TRM).

3. Заземлюючий провідник підключається до пластини, що імітує повітряний зазор.

4. Джерело постійної напруги 24 В підключається до клем +24 V і 0V SUPPLY електронного блоку ILS 730.

5. Включити вольтметр між клемами POLE PROFILE і COM електронного блоку ILS 730. Діапазон зміни напруги від 0 до 10 В.

6. Використовуючи набір калібрувальних розмірів, встановлюються відстані до досліджуваного датчика LS 120 і вимірюється напруга для кожного калібрувального розміру.

7. За результатами проведених досліджень будується залежність

$$U_{\text{вих}} = f(L).$$

3. 6. Зміст звіту

1. Схема лабораторної установки перевірки датчика повітряного зазору LS 120.
2. Перелік використаного устаткування.
3. Знята залежність $U_{\text{вих}} = f(L)$.
4. Порівняння знятої залежності з паспортними даними датчика повітряного зазору LS 120.
5. Висновки й рекомендації.

Лабораторна робота № 4

Тема: Тестування датчика вимірювання температури.

Мета роботи: Дослідження характеристик датчика вимірювання температури

Предмет дослідження: Датчик температури – термоопір. Характеристики датчика, використовуваного в системі термоконтролю, для вимірювання температури в контрольованих точках гідроагрегату.

4. 1. Короткий опис

В процесі експлуатації необхідно мати інформацію про температуру в контрольованих точках гідроагрегату, яка не повинна перевищувати допустиму. Контроль здійснюється контролером температури типу CHESSELL, в якості датчиків використовуються термоопори.

Принцип дії цих датчиків заснований на властивості визначених металів змінювати електричний опір із зміною температури. Такі матеріали як мідь і платина використовуються для термоопорів в системі термоконтролю й вимірювання температури в контрольованих точках гідроагрегату. Тип, використовуваних датчиків з міді, ТСМ з характеристиками CU 9, CU 10, CU 50, CU 53. Тип, використовуваних датчиків з платини, ТСП з характеристикою Pt 100.

Градування ТСМ з характеристиками CU 9, CU 10, CU 50, CU 53 і ТСП з характеристикою Pt 100 наведено в табл. 4.1 – 4.5.

Таблиця 4. 1. Градування мідного термометра опору ($R_0 = 53 \text{ Ом}$)

$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{0}{53}$	$\frac{10}{55,26}$	$\frac{20}{57,52}$	$\frac{30}{59,80}$	$\frac{40}{62,07}$	$\frac{50}{64,34}$
$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{60}{66,6}$	$\frac{70}{68,87}$	$\frac{80}{71,14}$	$\frac{90}{73,41}$	$\frac{100}{75,68}$	$\frac{110}{77,95}$
$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{120}{80,22}$	$\frac{130}{82,45}$	$\frac{140}{84,75}$	$\frac{150}{87,00}$	-	-

Таблиця 4. 2. Градування мідного термометра опору ($R_0 = 50 \text{ Ом}$)

$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{0}{50}$	$\frac{10}{52,14}$	$\frac{20}{54,28}$	$\frac{30}{56,42}$	$\frac{40}{58,56}$	$\frac{50}{60,70}$
$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{60}{62,84}$	$\frac{70}{64,98}$	$\frac{80}{67,17}$	$\frac{90}{69,26}$	$\frac{100}{70,40}$	$\frac{110}{73,54}$
$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{120}{75,68}$	$\frac{130}{77,82}$	$\frac{140}{79,96}$	$\frac{150}{82,10}$	-	-

Таблиця 4. 3. Градування мідного термометра опору ($R_0 = 10 \text{ Ом}$)

$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{0}{10}$	$\frac{10}{10,428}$	$\frac{20}{10,86}$	$\frac{30}{11,28}$	$\frac{40}{11,71}$	$\frac{50}{12,14}$
$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{60}{12,57}$	$\frac{70}{12,99}$	$\frac{80}{13,42}$	$\frac{90}{13,85}$	$\frac{100}{14,28}$	$\frac{110}{14,71}$
$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{120}{15,14}$	$\frac{130}{15,56}$	$\frac{140}{15,99}$	$\frac{150}{16,42}$	-	-

Таблиця 4. 4. Градування мідного термометра опору ($R_0 = 9 \text{ Ом}$)

$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{0}{9}$	$\frac{10}{9,38}$	$\frac{20}{9,77}$	$\frac{30}{10,15}$	$\frac{40}{10,54}$	$\frac{50}{10,92}$
$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{60}{11,31}$	$\frac{70}{11,69}$	$\frac{80}{12,08}$	$\frac{90}{12,46}$	$\frac{100}{12,85}$	$\frac{110}{13,23}$
$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{120}{14,00}$	$\frac{130}{14,16}$	$\frac{140}{14,39}$	$\frac{150}{14,77}$	-	-

Таблиця 4. 5. Градування платиногового термометра опору ($R_0 = 100 \text{ Ом}$)

$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{0}{100}$	$\frac{10}{103,90}$	$\frac{20}{107,79}$	$\frac{30}{111,67}$	$\frac{40}{115,54}$	$\frac{50}{119,40}$
$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{60}{123,24}$	$\frac{70}{127,08}$	$\frac{80}{130,90}$	$\frac{90}{134,71}$	$\frac{100}{138,51}$	$\frac{110}{142,29}$
$\frac{T, ^\circ C}{R, \text{Ом}}$	$\frac{120}{146,07}$	$\frac{130}{149,83}$	$\frac{140}{153,53}$	$\frac{150}{157,33}$	-	-

Для створення необхідної температури використовується термостат типа ТС–16. Термостат складається з корпусу і кришки, на яких вмонтовуються окремі вузли. Термостатична рідина заливається у внутрішній бачок. На кронштейні 1 встановлений електродвигун змінного струму 2, вал якого гнучкою муфтою 3 сполучений з віссю, що приводить в обертання насос і мішалку. Термостатична рідина нагрівається двома електричними нагрівачами потужністю 700 і 1300 Вт. Контроль за роботою термостата здійснюється контактним термометром 4 і блоком управління 5. Точне регулювання температури здійснюється контактним термометром по контрольному термометру і фіксацією включення і відключення нагрівача.

4. 2. Вказівки до виконання роботи

Як додаткова література рекомендується скористатися [20, 21].

4. 3. Зміст роботи

Зняття характеристики датчика: опір датчика температури, що перевіряється, залежно від температури

$$R_{\text{дат}} = f(T)$$

4. 4. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка представлена на рис. 4. 1.

Установка містить:

- досліджуваний датчик термоопору;
- термостат ТС–16;
- джерело змінної напруги;
- електронний омметр (мультиметр);

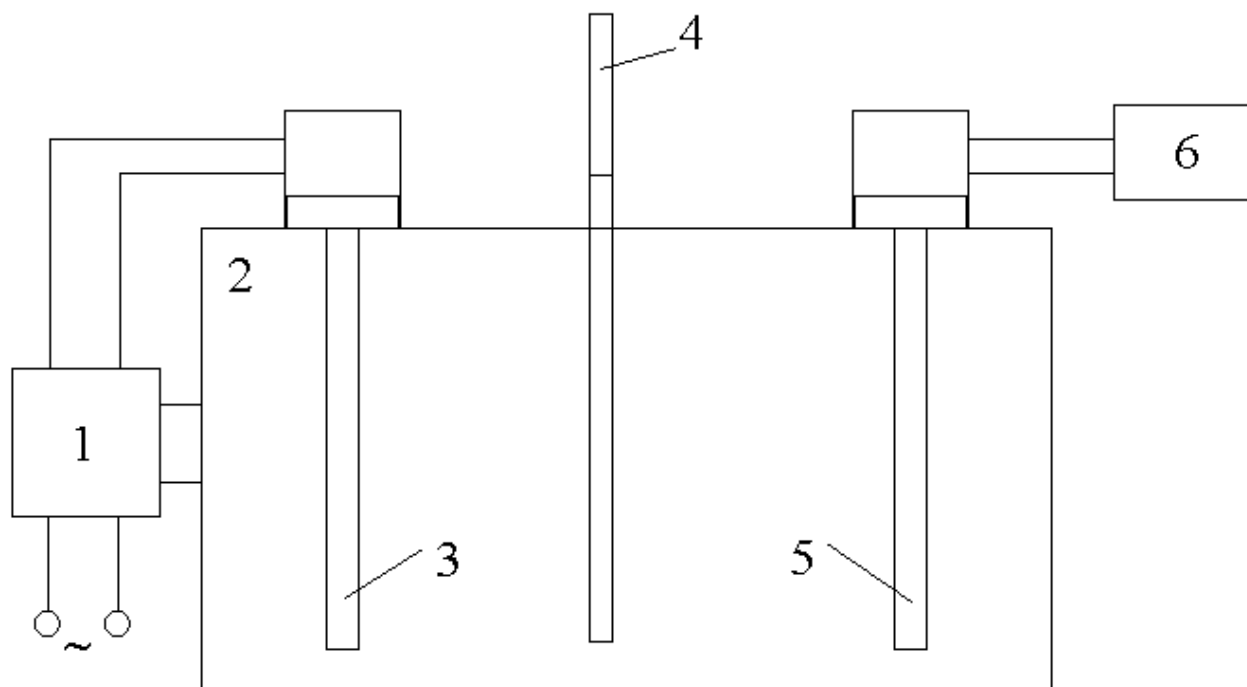


Рис. 4. 1 – Лабораторна установка: 1 – блок керування, 2 – термостат, 3 – контактний термометр, 4 – контрольний термометр, 5 – датчик, 6 – мультиметр.

4. 5. Порядок виконання роботи

1. Досліджуваний датчик (термоопір) встановлюється в спеціальний тримач.
2. Підключити омметр до клем датчика.
3. Включити термостат ТС–16.
4. Встановити на контактному термометрі температуру згідно таблиці 4. 1 – 4. 5.
5. Зміряти омметром опір датчика для встановленої температури.
6. За результатами проведених досліджень будується залежність $R_{дат} = f(T)$.

4. 6. Зміст звіту

1. Схема лабораторної установки для перевірки датчика.
- 2 Перелік використаного устаткування.
- 3 Знята залежність $R_{дат} = f(T)$.
- 4 Порівняння знятої залежності з паспортними даними датчика.
- 5 Висновки і рекомендації.

Лабораторна робота № 5

Тема: Тестування манометричного приладу вимірювання температури.

Мета роботи: Дослідження характеристик приладу вимірювання температури манометричного

Предмет дослідження: термосигналізатор, – прилад вимірювання температури манометричний конденсаційний, показуючий, сигналізуючий, що використовується в системі термоконтролю, для вимірювання й контролю температури в контрольованих точках гідроагрегату.

5. 1. Короткий опис

В процесі експлуатації необхідно мати інформацію про температуру в контрольованих точках гідроагрегату, яка не повинна перевищувати допустиму. Контроль здійснюватися агрегатним котролером типа ALSPA, в якості датчиків використовуються манометричні термосигналізатори.

Основним вузлом термосигналізатора є термосистема, яка складається з манометричної пружини з утримувачем шкали й двома сигналізуючими пристроями, термобалона і сполучного капіляра. Принцип дії заснований на суворій залежності тиску насиченої пари заповнювача термосистеми від температури вимірюваного середовища. Вимірювання температури контрольованого середовища сприймається заповнювачем через термобалон і перетворюється в зміну тиску, який по капіляру передається в манометричну пружину. Манометрична пружина під дією тиску розгортається і повертає вісь і стрілку, що закріплена на ній. Межі температури задаються двома покажчиками сполученими з мікрровимикачами.

В якості приладу для контролю необхідної температури використовується термосигналізатор типу ТС–16, рис. 5. 1.

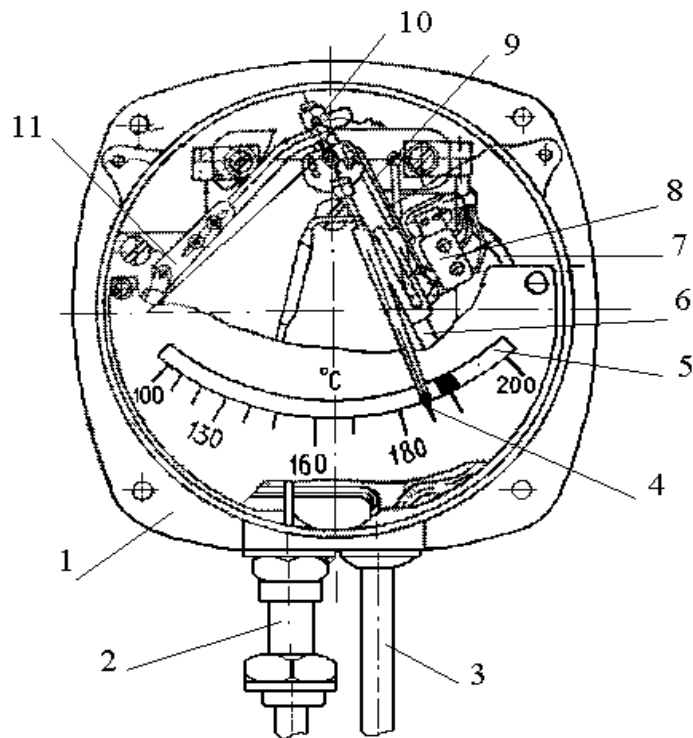


Рис 5. 1. Будова термосигналізатора ТС–16: 1 – корпус, 2 – приєднання термобалону, 3 – електричні приєднання, 4 – стрілка, 5 – шкала, 6 – вказник, 7 – манометрична пружина, 8 – мікрореле, 9 – ричаг, 10 – повзун, 11 – тяга.

Термосигналізатор за принципом побудови є приладом манометричного типу з електричними контактами, що сигналізують межі встановленого діапазону температури. Схема електрична сигналізатора наведена на рис. 5. 2.

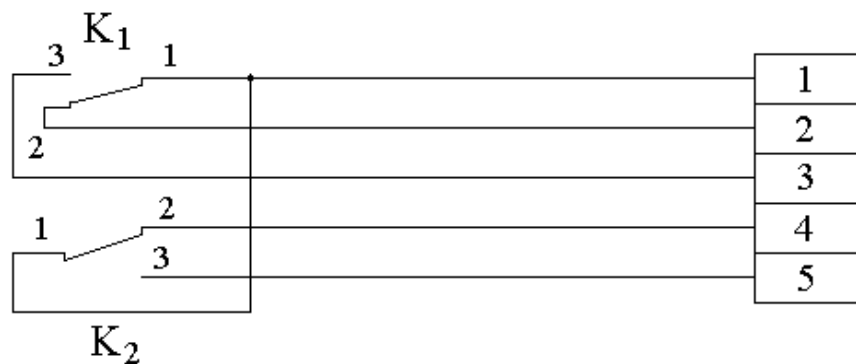


Рис. 5. 2. Схема електрична принципова ТС–16.

В наведеній схемі перемикачі K₁ та K₂ встановлюють межі інтервалу регулювання температури. Вони розташовані так, щоб сигналізувати про зміну температури за межі встановленого інтервалу, з лівого й правого боків. Сигналізація здійснюється

перемиканням контактів. Алгоритм сигналізуючих перемикачів K_1 та K_2 зустрічний.

В якості приладу для створення необхідної температури для перевірки ТС–16 використовується термостат.

Термостат, рис. 5. 3, складається з корпусу і кришки, на яких змонтовано окремі його вузли. Термостатична рідина заливається у внутрішній бачок. На кронштейні 1 встановлений електродвигун змінного струму 2, вал якого гнучкою муфтою 3 сполучений з віссю, що приводить в обертання насос і мішалку. Термостатична рідина нагрівається двома електричними нагрівачами потужністю 700 і 1300 Вт. Контроль за роботою термостата здійснюється контактним термометром 4 і блоком управління 5. Точне регулювання температури здійснюється контактним термометром по контрольному термометру і фіксацією включення і відключення нагрівача.

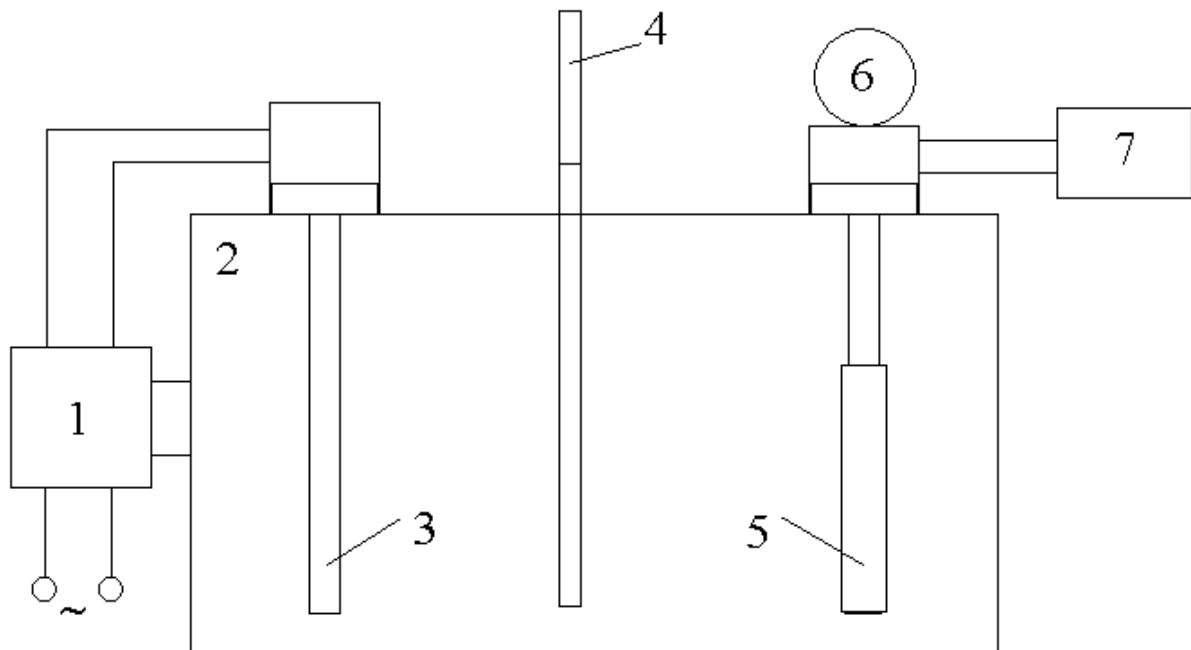


Рис. 5. 3 – Лабораторна установка: 1 – блок керування, 2 – термостат, 3 – контактний термометр, 4 – контрольний термометр, 5 – датчик термосигналізатора, 6 – термосигналізатор, 7 – мультиметр.

5. 2. Вказівки до виконання роботи

Як додатковою літературою рекомендується скористатися [20, 21].

5. 3. Зміст роботи

Зняття характеристики прилада і перевірка уставок його спрацьовування.

Зняття характеристики датчика: данні датчика температури, що перевіряється, залежно від температури $T_{пр} = f(T_{середи})$

5. 4. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка представлена на рис. 5. 3.

Установка містить:

- досліджуваний прилад (термосигналізатор);
- термостат ТС–16;
- джерело змінної напруги;
- електронний омметр (мультиметр);

5. 5. Порядок виконання роботи

1. Досліджуваний прилад – термосигналізатор встановлюється в спеціальний тримач.

2. Підключити омметр до клем приладу.

3. Встановити на контактному термометрі термостату температуру згідно шкали термосигналізатора.

4. Встановити на термосигналізаторі уставки спрацьовування.

5. Включити термостат.

6. Контролювати показання термосигналізатора.

7. Контролювати омметром спрацьовування уставок прилада для виставлених температур.

8. За результатами проведених досліджень будується залежність $T_{пр} = f(T_{середи})$.

5. 6. Зміст звіту

1. Схема лабораторної установки для перевірки приладу.

2. Перелік використаного устаткування.

3. Знята залежність $T_{пр} = f(T_{середи})$.

4. Порівняння знятої залежності з паспортними даними прилада.

5. Висновки й рекомендації

Лабораторна робота № 6

Тема: Тестування датчика вимірювання деформації.

Мета роботи: Дослідження характеристик датчика вимірювання деформації

Предмет дослідження: датчик вимірювання деформації конструктивних вузлів гідроагрегату (тензодатчиків).

6. 1. Короткий опис

В процесі експлуатації важливо мати інформацію про рівень деформації конструктивних вузлів в контрольованих точках гідроагрегату, яка не повинна перевищувати допустиму. В якості чутливих елементів використовуються датчики вимірювання деформації. Принцип дії цих датчиків заснований на зміні електричного опору від величини деформації конструктивних вузлів гідроагрегату. Зазначені датчики надають можливість контролю деформації верхньої хрестовини, сегментів підп'ятника тощо.

Для зняття характеристик датчиків деформації використовується тензобалка, на якій встановлюється тензорезистор, що перевіряється, й набір фіксованих вантажів.

6. 2. Вказівки до виконання роботи

Як додатковою літературою рекомендується скористатися [32, 33].

6. 3. Зміст роботи

Зняття характеристики датчика деформації: опір тензодатчика залежно від ваги вантажу

$$R_{вих} = f(m).$$

6. 4. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка представлена на рис. 6. 1.

Установка містить:

- тензобалку з досліджуваним датчиком;
- набір вантажів;
- омметр.

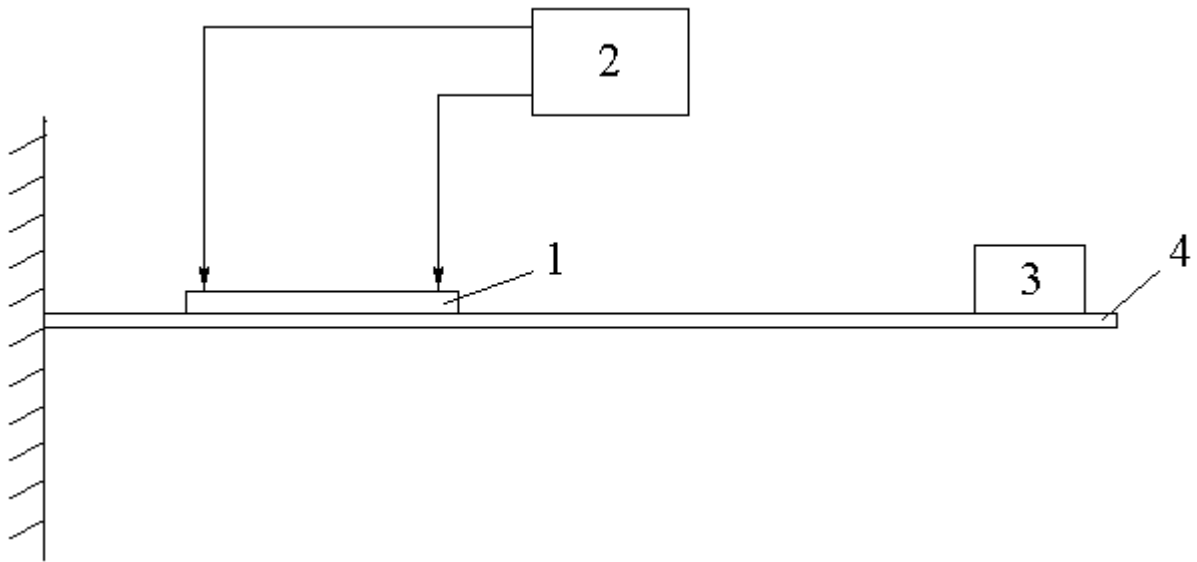


Рис. 6. 1 – Лабораторна установка: 1 – тензодатчик, 2 – омметр, 3 – вантаж, 4 – балка.

Лабораторна установка являє собою зафіксовану з одного боку тензобалку з закріпленим датчиком та вантажем. До виходу датчика підключено омметр. Зміна навантаження призводить до відповідної зміни опору.

6. 5. Порядок виконання роботи

1. Тензобалка з досліджуваним датчиком встановлюється в спеціальний утримувач.
2. Підключається омметр до виводів досліджуваного датчика.
3. Встановлюючи фіксовані вантажі на тензобалку, зміряти опір тензодатчика й занести дані до таблиці.
4. За результатами проведених досліджень будується залежність $R_{вих} = f(m)$.

6. 6. Зміст звіту

1. Схема лабораторної установки для перевірки датчика.
2. Перелік використаного устаткування.
3. Знята залежність $R_{вих} = f(m)$.
4. Порівняння знятої залежності з паспортними даними датчика.
5. Висновки й рекомендації.

Лабораторна робота № 7

Тема: Тестування вимірювальних перетворювачів активної й реактивної потужності.

Мета роботи: Дослідження характеристик вимірювальних перетворювачів активної і реактивної потужності

Предмет дослідження:

Тестування вимірювальних перетворювачів. Визначення основної погрішності вимірювальних перетворювачів активної і реактивної потужності. Визначення погрішностей вимірювальних перетворювачів.

7. 1. Короткий опис

Для отримання оперативної поточної інформації про основні робочі електричні параметри гідрогенераторів використовуються наступні вимірювальні перетворювачі (ВП).

- Вимірювальні перетворювачі типа Е 849 для перетворення прямих і зворотних потоків активної і реактивної потужності в уніфіковані вихідні сигнали постійного струму (0–5) мА на навантаженні від 0 до 3 кОм.

- Вимірювальні перетворювачі типа Е 854 для перетворення змінного струму в уніфіковані вихідні сигнали постійного струму (0–5) мА на навантаженні від 0 до 3 кОм.

- Вимірювальні перетворювачі типа Е 855 для перетворення напруги змінного струму в уніфіковані вихідні сигнали постійного струму (0–5) мА на навантаженні від 0 до 3 кОм.

- Вимірювальні перетворювачі типа Е 856 для перетворення напруги постійного струму в уніфіковані вихідні сигнали постійного струму (0–5) мА на навантаженні від 0 до 3 кОм.

- Вимірювальні перетворювачі типа Е857 для перетворення постійного струму в уніфіковані вихідні сигнали постійного струму (0-5) мА на навантаженні від 0 до 3 кОм.

Робоча інформаційна достовірність зазначених перетворювачів забезпечується перевірками їх характеристик. При проведенні

перевірки мають застосовуватися зразкові й допоміжні засоби перевірки, перераховані в переліку, табл. 7. 1.

Таблиця 7. 1. Перелік зразкових і допоміжних засобів перевірки

№ п/п	Найменування засобу перевірки	Тип	Основні параметри використаного засобу	Погрішність вимірів засобу
1.	Установка трифазна для перевірки приладів змінного струму	У 1134	150-600 В	0,2 %
2.	Потенціометр постійного струму високоомний	Р-368	15-1500 мВ	0,03 %
3.	Зразкова котушка опору	Р-331	10 Ом	0,01 %
4.	Зразкова котушка опору	КМС-4	0,1-100 кОм	0,2 %
5.	Мегаомметр	МЕГ	50 МОм	1 %
6.	Ватметр	Д 57	75-300 В 2,5-5 А	0,1 %
7.	Вольтметр	Э 59	75-600 В	0,5 %
8.	Вольтметр	Д 57	150-300 В	0,1 %
9.	Милівольтметр	М1151	45-150 кВ	0,1 %
10.	Ампервольтметр	Р 386	10 мкВ-1000 В 10 кА-1000 мА 0,01 Ом-16 МОм	0,06 % 0,1 % 0,1 %

ПРИМІТКИ:

1. Зразкові прилади, включені на вході й виході вимірювального перетворювача (ВП), повинні мати сумарну допустиму погрішність в 5 разів менше допустимої погрішності ВП.

Допускається застосування зразкових приладів з поправками, сумарна допустима погрішність яких в 2,5 рази менше основної погрішності ВП.

2. Вся контрольно–вимірювальна апаратура, використовувана при вимірюваннях має мати документи про державну перевірку.

Умовні позначення, вживані в схемах перевірки ВП:

ВП – вимірювальний перетворювач;

У1 – установка трифазна для перевірки приладів змінного струму (СІ-1);

W – ватметр, класу не нижче 0,1 (наприклад, Д-57);

V – вольтметр, класу не нижче 0,5 (наприклад, Е-59);

R_0 – зразкова котушка на 100 Ом класу не нижче 0,01 (Р–331);

R_H – магазин опорів класу не нижче 0,2 (КМС–4);

R_d – додатковий опір класу не нижче 0,2 (Р–32);

$$R_d = \frac{R_{w1} + R_{w2}}{2}$$

де R_{w1} і R_{w2} – опори паралельних ланцюгів ватметрів;

Π – потенціометр постійного струму високоомний класу не нижче 0,03 (Р–368).

Електричні схеми зовнішніх підключень ВП наведено на його передній панелі.

7. 2. Вказівки до виконання роботи

В якості додаткової літератури рекомендується скористатися [21, 32, 33, 34].

7. 3. Зміст роботи

Визначення основної погрішності вимірювальних перетворювачів активної і реактивної потужності.

7. 4. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка й схема підключення ВП для визначення основної погрішності вимірювальних перетворювачів активної потужності рис. 7. 1 і реактивній потужності рис. 7. 2.

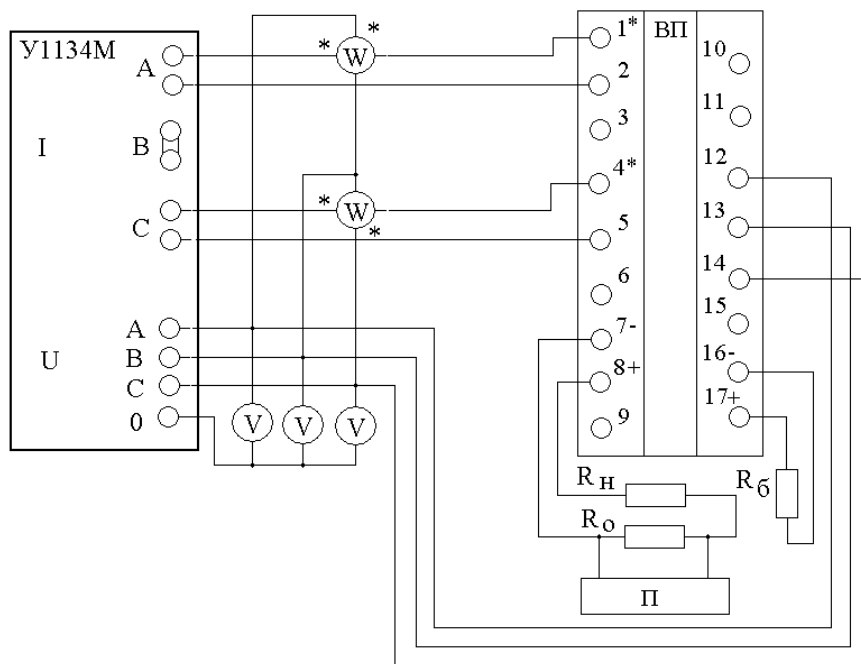


Рис. 7. 1 Схема підключення ВП активної потужності

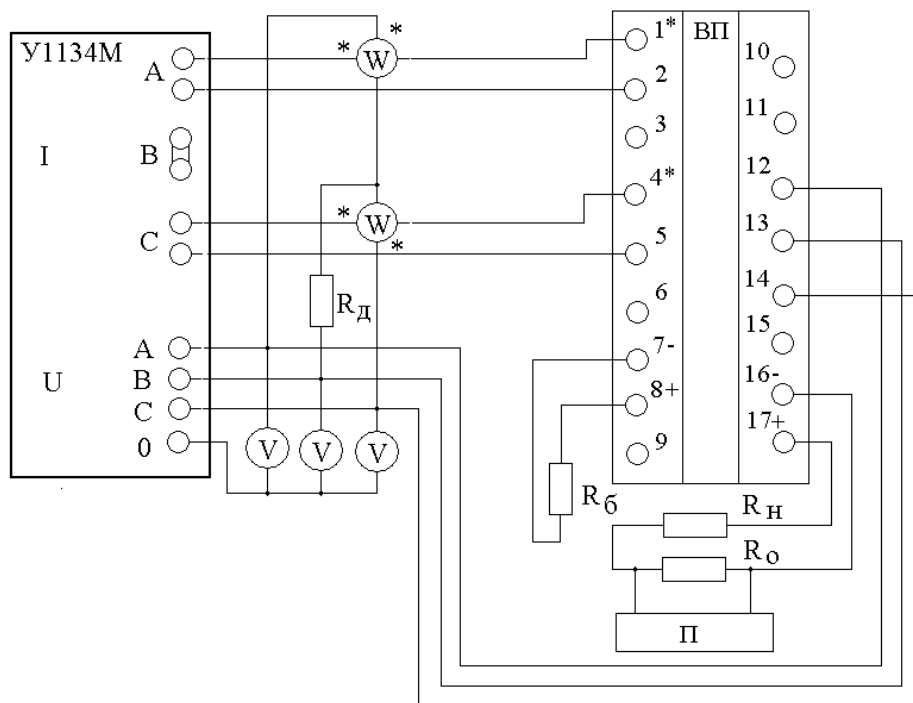


Рис. 7. 2. Схема підключення ВП реактивної потужності

7. 5. Порядок виконання роботи

1 Зібрати схеми визначення основної погрішності вимірювальних перетворювачів активної потужності згідно рис. 7. 1 і реактивній потужності згідно рис. 7. 2.

2. Визначення основної погрішності ВП активної і реактивної потужності.

3. Визначення основної погрішності проводиться методом порівняння показань зразкового приладу, включеного на вході ВП, з розрахунковими значеннями вхідного сигналу ВП. Вимірювану трифазну потужність на вході ВП визначають за показаннями двох зразкових ватметрів.

За основну погрішність ВП приймають найбільшу за абсолютним значенням різницю між показниками зразкового приладу на виході ВП з розрахунковим значенням вихідного сигналу, віднесена до нормуючого значення вихідного сигналу.

Величина основної погрішності ВП виражається у вигляді приведеної і визначається згідно (7. 1):

$$\gamma = \frac{I_x - I_p}{I_N} \cdot 100\% , \quad (7. 1)$$

де I_x – значення вихідного сигналу при відповідному значенні вхідного сигналу; I_p – розрахункове значення вихідного сигналу при тому ж значенні вхідного сигналу; I_N – додатак, що нормує значення вихідного сигналу.

Розрахункові значення вихідного сигналу залежно від вхідної вимірюваної потужності наведені в табл. 7. 2 для ВП активної потужності та в табл. 7. 3 для ВП реактивної потужності.

Таблиця 7. 2. Розрахункові значення вихідного сигналу ВП активної потужності

U н. вх., В	I н. вх., А	Cos φ	P ₁ = P ₂ , Вт	P _x = P ₁ + P ₂ , Вт	I p, мА
100	5	1	0	0	0
			43,3	86,6	0,5
			86,6	173,2	1,0
			130,0	260,0	1,5
			173,25	346,5	2,0
			218,5	433,0	2,5
			259,5	519,0	3,0
			303,0	606,0	3,5

			346,5	698,0	4,0
			389,5	779,0	4,5
			433,0	866,0	5,0
100	2,5	1	108,3	216,6	2,5
			216,5	433,0	5,0
			0	0	0
			8,7	17,4	0,5
			17,3	34,6	1,0
			26,0	52,0	1,5
			34,6	69,2	2,0
100	1	1	43,3	86,6	2,5
			52,0	104,0	3,0
			60,6	121,2	3,5
			69,3	138,6	4,0
			77,9	155,8	4,5
			86,6	173,2	5,0
100	0,5	1	21,65	43,3	2,5
			43,3	86,6	5,0

Таблиця 7. 3. Розрахункові значення вихідного сигналу ВП реактивної потужності

U н. вх., В	I н. вх., А	Cos φ	Q ₁ = Q ₂ , ВА	Q _x = Q ₁ + Q ₂ , ВА	I p, мА
			0	0	0
			25	50	0,5
			50	100	1,0
			75	150	1,5
			100	200	2,0
100	5	1	125	250	2,5
			150	300	3,0
			175	350	3,5
			200	400	4,0
			225	450	4,5
			250	500	5,0
100	2,5	1	62,5	125	2,5
			125,0	250	5,0
			0	0	0
			5	10	0,5
100	1	1	10	20	1,0
			15	30	1,5
			20	40	2,0
			25	50	2,5

			30	60	3,0
			35	70	3,5
			40	80	4,0
			45	90	4,5
			50	100	5,0
100	0,5	1	12,5	25	2,5
			25,0	50	5,0

Для меж вимірювання з номінальними значеннями вхідного струму 5А і 1А основна погрішність визначається при всіх значеннях вхідної потужності, вказаних в табл. 7. 2 і 7. 3.

Для меж вимірювання з номінальними значеннями вхідного струму 2,5 і 0,5 А основна погрішність визначається при 50 і 100 % номінального значення вхідної потужності. При цьому струмова шина фази А підключається до клем 1 і 3, струмова шина фази З – до клем 4 і 6 ВП.

4. Визначення впливу зміни вхідної напруги на основну погрішність приладу проводиться методом, вказаним в розділі 1.

Зміна вхідного сигналу ВП щодо розрахункового значення, викликане відхиленням величини вхідної напруги вимірюваного ланцюга на $\pm 20\%$ від номінального значення не повинно перевищувати межі основної припустимої похибки.

При вхідній напрузі, рівній 80% номінального значення, значення вхідного струму встановлюються рівними 50 і 100% номінального значення. При вхідній напрузі, рівній 120% номінального значення, значення вхідного струму встановлюються рівними 50 і 80% номінального значення.

Зміна вихідного сигналу ВП визначається по формулі (7.1), де:

I_x - значення вихідного сигналу за наявності впливаючого чинника.

Розрахункове значення вихідного сигналу залежно від вхідної вимірюваної потужності при зміні вхідної напруги приведені в табл. 7. 4 для ВП активної потужності та в табл. 7. 5 для ВП реактивної потужності.

Таблиця 7. 4. Розрахункове значення вихідного сигналу ВП активної потужності

Cos φ	I н. вх., А	U н. вх., В	P ₁ = P ₂ , Вт	P _X , Вт	I _p , мА
1,0	5,0	80 120	346,5	693,0	4,8
			173,2	346,4	2,0
			415,5	831,0	4,8
			260,0	520,0	3,0
- 1,0	5,0	80 120	- 346,5	- 693,0	- 4,8
			- 173,2	- 346,4	- 2,0
			- 415,5	- 831,0	- 4,8
			- 260,0	- 520,0	- 3,0
1,0	1,0	80 120	69,3	138,6	4,8
			34,6	69,2	2,0
			83,2	166,4	4,8
			52,0	104,0	3,0
- 1,0	1,0	80 120	- 69,3	- 138,6	- 4,8
			- 34,6	- 69,2	- 2,0
			- 83,2	- 166,4	- 4,8
			- 52,0	- 104,0	- 3,0

Таблиця 7. 5. Розрахункове значення вихідного сигналу ВП реактивної потужності

Cos φ	I н. вх., А	U н. вх., В	I _A = I _C , А	Q ₁ = Q ₂ , ВА	P _X , ВА	I _p , мА
1,0	5,0	80 120	5,0	200	400	4,0
			2,5	100	200	2,0
			4,0	240	480	4,8
			2,5	150	300	3,0
- 1,0	5,0	80 120	- 5,0	- 200	- 400	- 4,0
			- 2,5	- 100	- 200	- 2,0
			- 4,0	- 240	- 480	- 4,8
			- 2,5	- 150	- 300	- 3,0
1,0	1,0	80 120	1,0	40	80	4,0
			0,5	20	40	2,0
			0,8	48	96	4,8
			0,5	30	60	3,0
- 1,0	1,0	80 120	- 1,0	- 40	- 80	- 4,0
			- 0,5	- 20	- 40	- 2,0
			- 0,8	- 48	- 96	- 4,8
			- 0,5	- 30	- 60	- 3,0

Визначення впливу коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ ($\sin \varphi$) на основну погрішність приладу проводиться методом, вказаним в розділі 1.

Зміна вихідного сигналу ВП щодо розрахункового значення, викликане відхиленням $\cos \varphi$ ($\sin \varphi$) від номінального значення до нуля, не повинно перевищувати величини значення основної погрішності, що допускається.

Зміна вихідного сигналу ВП визначається за (7. 1), де I_x – значення вихідного сигналу ВП за наявності впливаючого чинника.

Розрахункові значення вихідного сигналу залежно від вхідної потужності наведені вище (див. табл. 7. 2 й 7. 3) для ВП активної і реактивної потужності відповідно.

Розрахункове значенні вхідної потужності залежно від зміни коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ ($\sin \varphi$) наведені вище (див. табл. 7. 4 та 7. 5) для ВП активної і реактивної потужності відповідно. Розрахункові значення потужності за зміни $\cos \varphi$ ($\sin \varphi$) ВП наведено в додатку Б.

5. Визначення впливу відхилення опору навантаження від номінального значення до нуля для ВП всіх типів.

Визначення впливу відхилення опору навантаження на основну погрішність приладу проводиться методом, вказаним в розділі 1. по схемах, приведених в додатках для кожного типа ВП відповідно.

Зміна вихідного сигналу ВП щодо розрахункового нормованого значення, викликане відхиленням опору навантаження від номінального значення (3 кОм) до нуля, не повинно перевищувати межі основної похибки, що припускається. Зміна вихідного сигналу ВП визначається за (7. 1).

Результати визначення основної погрішності оформляються у вигляді таблиць.

7. 6. Зміст звіту

1. Схема для визначення основної погрішності вимірювальних перетворювачів активної і реактивної потужності.

2. Перелік використаного устаткування.

3. Результати визначення основної погрішності оформляються у вигляді таблиць за наведеним зразком, табл. 7. 6.

Таблиця 7. 6. Зразок оформлення результатів випробувань ВП

Технічні дані ВП	Тип	Клас	Номінальн. вхідн. струм	Номінальн. вхідн. напруга.	Номінальн. велич. опору навантаження	Номінальн. вихідн. струм		Номінальн. велич. потужн.
1	2	3	4	5	6	7		8
Величина вхідн. напруги. $U_{вх.}/V$	Коеф. потужності	Вхідна потужність по кожній фазі $\cos \varphi$ ($\sin \varphi$) $I_1=P_2/V_T$ $I_1=Q_2/V_{ар}$	Загальна вхідна потужність $P=P_1+P_2/V_T$ $Q=Q_1+Q_2/V_{ар}$	Розрахункові значення вихідного струму I_r (мА)	Дійсні значення вихідного струму I_x (мА)	Основна приведена погрішність		Примітки

4. Побудувати зовнішні характеристики ВП.
5. Висновки й рекомендації.

Контрольні запитання

1. Структура управління обладнанням і спорудами каскаду ГЕС.
2. Режими роботи і способи управління обладнанням ГЕС.
3. Організація системи моніторингу і управління ГЕС.
4. Загальні функції управління й моніторингу.
5. Структура системи управління гідроагрегатами ГЕС.
6. Станційний рівень управління ГЕС.
7. Інтерфейс станційного рівня управління.
8. Управління потужністю ГЕС.
9. Управління окремими гідроагрегатами.
10. Характеристики дискретних величин контролерів.
11. Характеристики аналогових величин контролерів.
12. Функції мікропроцесорного контролера гідроагрегату.
13. Моніторинг повітряного зазору ротор – статор.
14. Структурна схема системи моніторингу повітряного зазору ротор – статор.

15. Методи перевірки датчиків системи вимірювання робочого повітряного зазору.
16. Застосування системи вимірювання повітряного зазору ротор – статор.
17. Вібромоніторинг гідроагрегатів. Загальні вимоги.
18. Структурна схема вібромоніторингу гідроагрегатів
19. Розміщення датчиків вібромоніторингу на гідроагрегаті.
20. Підвищена вібрація гідроагрегатів.
21. Оцінка рівня вібрації вузлів гідроагрегату.
22. Оцінка механічних характеристик гідроагрегату.
23. Ідентифікація вигляду, місця й ступеня розвитку дефектів вузлів гідроагрегату.
24. Прогнозування дефекту вузлів гідроагрегату.
25. Вибір режиму роботи гідроагрегатів.
26. Види збурюючих ефектів за різних режимів роботи гідроагрегатів. Загальні відомості.
27. Збурюючі дії в режимі холостого ходу без збудження.
28. Збурюючі впливи в режимі холостого ходу із збудженням.
29. Збурюючі дії при паралельній роботі й симетричному навантаженні гідроагрегатів.
30. Збурюючі дії при паралельній роботі й несиметричному навантаженні гідроагрегатів.
31. Вплив турбулентності й кавітації на вібраційний стан гідроагрегату.
32. Параметри вимірювання вібрації.
33. Метод перевірки датчика биття валу.
34. Метод перевірки датчика вимірювання швидкості й прискорення.
35. Температурний моніторинг гідроагрегатів. Загальні вимоги.
36. Структурна схема температурного моніторингу.
37. Структурна схема системи охолодження гідроагрегату.
38. Датчики системи температурного моніторингу.
39. Термометри манометричні.
40. Електричні термометри опору.
41. Термопари та їх властивості.
42. Розміщення датчиків температурного моніторингу на гідроагрегаті.

43. Експлуатаційний температурний моніторинг на гідроагрегаті.
44. Моніторинг вимірювань енергетичного стану гідроагрегату.
45. Аналізатор електричної мережі РЕСА–301.
46. Вимірювальні перетворювачі.
47. Комерційний облік електроенергії.
48. Пристрій і принцип дії електронного лічильника типа ЕВРО АЛЬФА.
49. Моніторинг механічних деформацій конструктивних вузлів гідроагрегатів.
50. ГЩУ. Контроллер мнемошита.
51. ГЩУ. Контроллер власних потреб.
52. Контроллер ДГЕС–2.
53. Діючий моніторинг ДГЕС–2.

ЛІТЕРАТУРА

1. Надежность и эффективность в технике. В 10 т. Т. 9. Техническая диагностика. Справочник. Ред. Авдеевский В. С. – М.: Машиностроение, 1987. – 351 с.
2. Башта Т. М. Техническая диагностика гидравлических приводов - М.: Машиностроение, 1989. – 263 с.
3. Жук А. Я., Малышев Г. П., Желябина Н. К. и др. Техническая диагностика, контроль и прогнозирование. Монография. – Запорожье: ЗГИА, 2008. – 500 с.
4. Жуков С. Ф. Диагностика релейной защиты и автоматики электрических систем. – К.: Вища школа. 1989. – 71 с.
5. Обнаружение дефектов гидрогенераторов Под ред. П. Г. Мамиконенца и Ю. М. Элькина. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 320с.
6. Грабко В. В., Мокін Б. І. Моделі та системи технічної діагностики високовольтних вимикачів. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1999. – 74 с.
7. Браун М., Раутани Дж., Пэтил Д, Электрические цепи и электротехнические устройства: Диагностика неисправностей. Пер. с английского С. В. Пряничникова. – М.: Додэкс – XXI, 2012. - 328 с.
8. Таран В. П. Диагностирование электрооборудования. – К.: Техніка, 1983. – 200 с.
9. Гончаров Н. Гидроэнергетическое оборудование гидроэлектростанций и его монтаж. – М.: Энергия, 1972. – 320 с.
10. Кошемякин В. А., Рымарь А. Н., Гидрогенераторы. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
11. Чернев К. К. Обслуживание генераторов. – М.: Энергия, 1968. – 104 с.
12. Гессе Б. А. Эксплуатация тиристорных систем возбуждения генераторов. – К.: Техніка, 1981. – 144 с.
13. Элькинд Ю. М. Контроль вибрации мощных гидрогенераторов. – М.: Энергия, 1979. – 168 с.
14. Владиславлев Л. А. Вибрация гидроагрегатов гидроэлектрических станций. – М.: Энергия, 1972. – 176 с.

15. Самойлов В. А. Вибрация агрегатов электростанций и балансировка роторов. – М., – Л.: Государственное энергетическое издательство, 1949, –160 с.
16. Дойчик М. П. Методы и средства натурной теплотметрии. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
17. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. – К.:ОЕП „Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики”, 2003. – 598 с.
18. Норми випробування обладнання. СОУ–Н ЕЕ20.302:2007. – К.: ОЕП „Гріфре”, 2007. – 266 с.
19. Методы электрических измерений./ Л. Г. Журавин, М. А. Мариненко, Е. И. Семенов и др. Под ред. Э. И. Цветкова. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
20. Алиев Т. М., Тер-Хачатуров А. А. Измерительная техника. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.
21. Измерение электрических и неэлектрических величин. / Н. Н. Евтихийев, Купершмидт Я. А., В. Ф. Папуловский и др. Под ред. Н. Н. Евтихьева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
22. Ерофеев Ю. Н. Импульсная техника. – М.: Высшая школа, 1984. – 391 с.
23. Зиновьев А. Л., Филиппов Л. И. Введение в теорию сигналов и цепей. – М.: Высшая школа, 1975. – 264 с.
24. Айзинов М. М. Избранные вопросы теории сигналов и теории цепей. – М.: Связь, 1971. – 349 с.
25. Алексеева В. Г. Расчет формы сигналов. – Л.: Энергия, 1968. – 296 с.
26. Миронов В. Г. Основы технологий цифровой обработки сигналов. Ч. 1. Свойства сигналов и современные технические средства их обработки. Электричество, № 3, 2001. – С. 55–65.
27. Миронов В. Г. Основы технологий цифровой обработки сигналов. Ч. 2. Математическое описание цифровых сигналов. Электричество, № 8, 2001. – С. 60–69.
28. Тыричев П. А. Контрольно измерительные устройства и устройства информационного канала электромеханических систем/ Под. ред. С. И. Маслова. – М.: МЭИ, 2000. – 136 с.

29. Цапенко М. П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.
30. Изотов А. З. Измерительные органы автоматических регуляторов. – М.: МЭИ, 1987. – 68 с.
31. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин: Измерительные преобразователи. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
32. Бриндли К. Измерительные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
33. Полищук Е. С. Измерительные преобразователи. – К.: Вища школа, 1981. – 296 с.
34. Преобразователи телеизмерительных устройств. Методы и средства поверки. СТП 513100–08.07–80. – Запорожье: ДнепроЭнерго, 1980. – 18 с.
35. Микропроцессорные агрегатные комплексы для диагностирования технических систем/ А. А. Горовой, В. Ф. Ващевский, Б. И. Доценко и др. – К.: Техніка, 1990. – 168 с.

Висновки

В посібнику розглянуто основні теоретичні засади й підходи до технології побудови діагностичних систем. Визначені основні технічні задачі, технологія и засоби їх реалізації. Розглянуті основні види та етапи діагностування.

Наведено основні питання реалізації технічної діагностики. Відображено особливості відмов, пошуку пошкоджених елементів, визначення надійності обладнання в експлуатації та умов його використання, а також особливості пошкоджень окремих видів функціональних складових.

Розглянуто також загальні питання прогнозування стану технічних об'єктів. Наведено основні шляхи вирішення задач та інженерні підходи, види, форми і методи прогнозування, а також основні технології обробки інформаційних сигналів системи моніторингу.

Є також основні відомості з реалізації системи керування ГЕС. Розглянуто ієрархію контролю та управління, основні складові й особливості архітектури, а також реалізацію й особливості агрегатних систем контролю.

Наведено можливості основних систем моніторингу стану основного гідроенергетичного обладнання ГЕС.

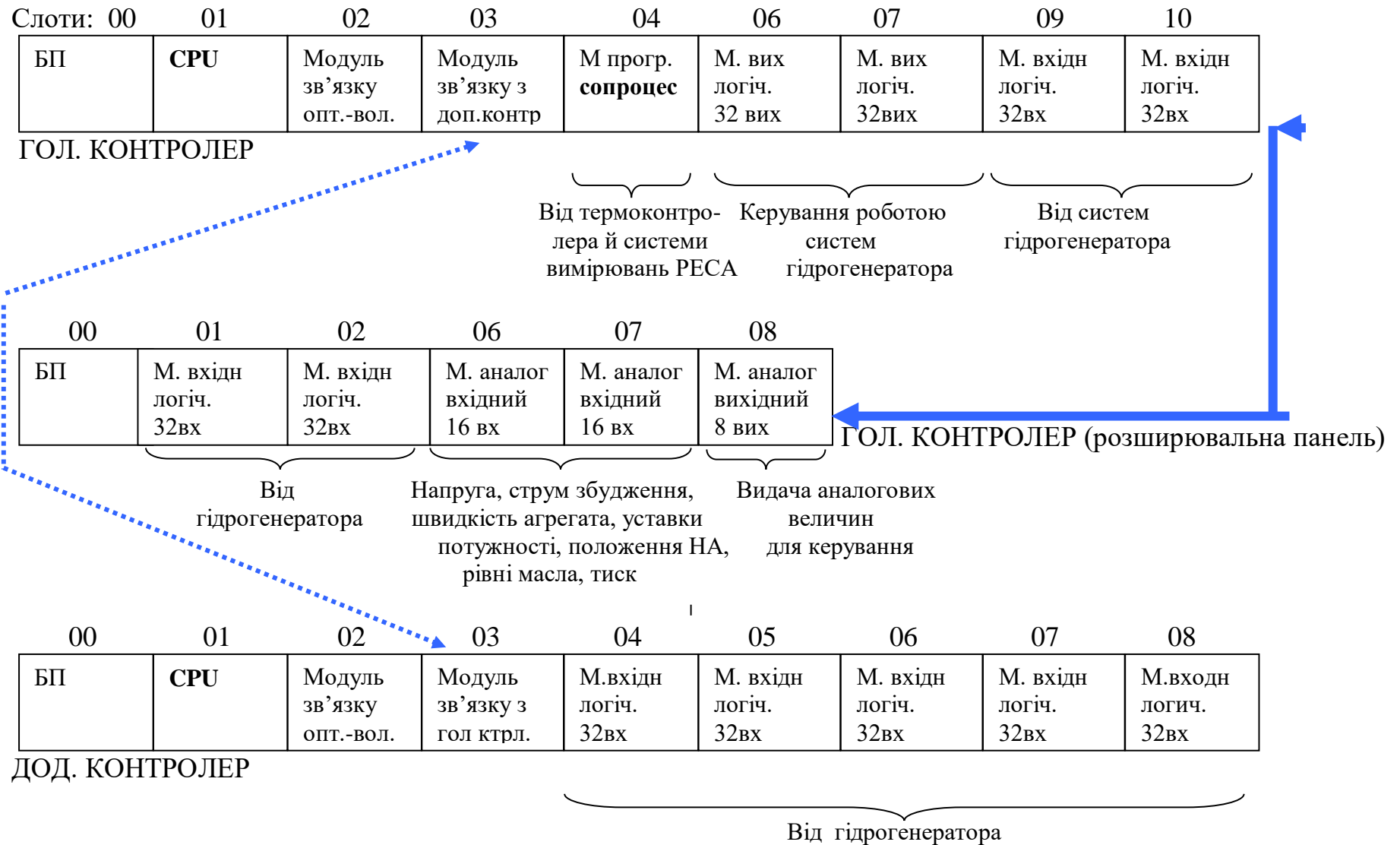
Посібник також містить лабораторний практикум з використанням діючого обладнання ГЕС.

У тексті наводяться завдання для студентів і контрольні запитання.

Зміст навчального посібника відповідає програмі дисципліни «Моніторинг та діагностика обладнання і споруд ГЕС», зорієнтований також на забезпечення самостійної теоретичної й практичної складових навчання.

Додаток А

Структурна схема контролера мікропроцесорної системи управління ГЕС



Таблиця Б. 1. Розрахункові значення потужності за зміни $\cos \varphi$ ($\sin \varphi$) ВП

Uвх	I _A =I _C	Cos φ	Напрямок потужності											
			Прямий (cos φ = 0)						Зворотний (sin φ = 0)					
			інд			ємн			інд			ємн		
			P ₁	P ₂	P _X	P ₁	P ₂	P _X	P ₁	P ₂	P _X	P ₁	P ₂	P _X
100	5	1,0	433	433	866	433	433	866	- 433	- 433	- 866	- 433	- 433	- 866
		0,5	0	433	433	433	0	433	0	- 433	- 433	- 433	0	0
		0	- 250	250	0	250	- 250	0	250	- 250	0	- 250	250	0
100	2,5	1,0	216,5	216,5	433	216,5	216,5	433	- 216,5	- 216,5	- 433	- 216,5	- 216,5	- 433
		0,5	0	216,5	216,5	216,5	0	216,5	0	- 216,5	- 216,5	- 216,5	0	- 216,5
		0	- 125	125	0	125	- 125	0	125	- 125	0	- 125	125	0
100	1	1,0	86,6	86,6	173,2	86,6	86,6	173,2	- 86,6	- 86,6	-173, 2	- 86,6	- 86,6	-173, 2
		0,5	0	86,6	86,6	86,6	0	86,6	0	- 86,6	- 86,6	- 86,6	0	- 86,6
		0	- 50	50	0	50	- 50	0	50	- 50	0	- 50	50	0
100	0,5	1,0	43,3	43,3	86,6	43,3	43,3	86,6	- 43,3	- 43,3	- 86,6	- 43,3	- 43,3	- 86,6
		0,5	0	43,3	43,3	43,3	0	43,3	0	- 43,3	- 43,3	- 43,3	0	- 43,3
		0	- 25	25	0	25	- 25	0	25	- 25	0	- 25	25	0

СТП 513100-08.07-80