

Д.О. Босий, канд. техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)

## ЗАСТОСУВАННЯ МИТТЄВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДО АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ

### Вступ

Неабиякий інтерес науковців до вивчення проблеми якості електричної енергії в електроенергетиці, та, зокрема, в системах тягового електропостачання змінного струму, спонукає розвиток теоретичної електротехніки та переглядів класичних підходів до електромагнітних процесів у колах з несинусоїдними величинами та нелінійними параметрами.

Так, в статтях [1 – 2] досить оригінально поставлена парадигма «реактивної потужності» в колах з несинусоїдними величинами. Деякі науковці в своїх роботах [3 – 4] також застосовують поняття «активних» та «обмінних потужностей» до аналізу перехідних, квазіперехідних, коливальних та хвильових процесів у системах тягового електропостачання. Досить перспективним є напрям визначення активних та обмінних характеристик нелінійного навантаження на основі експериментальних даних, використаних у роботі [5]. В більш ранній роботі [6] приділяється увага отриманню активних та обмінних характеристик споживача електроенергії, які дозволяють оцінити енергетичну ефективність його роботи та визначити миттєві параметри схеми заміщення цього споживача.

Метою даної роботи є отримання кінцевих формул для розрахунку миттєвих характеристик плечей живлення тягових підстанцій та електровозів змінного струму за допомогою вимірювань та осцилограм миттєвих значень струмів і напруги.

### Методика для загального випадку

Як відомо, у складних розгалужених колах, що містять джерела та споживачі електроенергії, мають місце два відмінні один від одного енергетичні процеси:

- безповоротне перетворення енергії джерел живлення в теплову та (або) інші види енергії;
- накопичення енергії у формі магнітного та електричного поля.

В теорії електричних кіл ці два процеси описуються за допомогою миттєвої активної ( $p = p(t)$ ) та миттєвої обмінної потужності ( $q = q(t)$ ), що в інтегральній інтерпретації є ортогональними складовими миттєвої повної потужності

$$s(t) = p(t) + q(t) = u(t) \cdot i(t). \quad (1)$$

З виразу (1) випливає, що

$$\frac{s(t)}{i^2(t)} = \frac{p(t)}{i^2(t)} + \frac{q(t)}{i^2(t)} = r(t) + x(t) = z(t), \quad (2)$$

де  $r(t)$ ,  $x(t)$ ,  $z(t)$  – миттєві активні, обмінні та повні опори споживача електричної енергії.

Слід зазначити, що вираз (2) є також своєрідним розкладанням миттєвого повного опору на ортогональні складові для інтегральних значень  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ .

Для отримання миттєвих характеристик будь-якого споживача перш за все необхідно визначити його характер. Далі розглянемо два типи споживачів – плече живлення тягової підстанції змінного струму та електровоз змінного струму в режимі тяги. Приймемо, що в межах розглядуваного плеча живлення підстанції рекуператії електроенергії не відбувається, тобто обидва споживачі замінимо еквівалентними пасивними двополусниками. Задамося елементарною схемою заміщення лінійного кола струму зі значенням напруги на вході  $u(t)$  та струму  $i(t)$  (рис. 1).

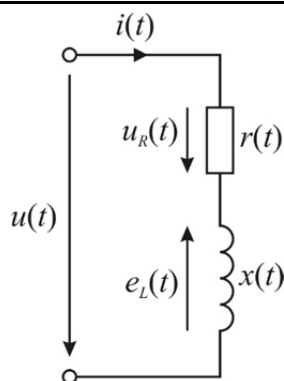


Рис. 1. Схема заміщення активно-індуктивного навантаження

Рівняння електромагнітного стану для даного кола в загальному випадку матиме вигляд

$$u(t) = r(t) \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} = r(t) \cdot i(t) + L \cdot i'(t), \quad (3)$$

або диференціюючи його отримаємо

$$\frac{du}{dt} = u'(t) = r(t) i'(t) + \frac{dr(t)}{di(t)} i'(t) i(t) + \frac{dL}{di(t)} (i')^2 + L \cdot i''.$$

Приймаючи граничну умову  $i'(t_1) = 0$ , знайдемо для моменту  $t_1$  величину відношення  $\frac{u'}{i''}$ ,

$$\left. \frac{u'}{i''} \right|_{t=t_1} = L \Big|_{t=t_1} > 0. \quad (4)$$

Умова (4) застосовується саме для встановлення характеристик пасивного двополюсника за миттєвими значеннями  $u(t)$  та  $i(t)$ . Відповідно для двополюсника з ємнісним навантаженням  $\left. \frac{u'}{i''} \right|_{t=t_1} < 0$ .

Для отримання кінцевих формул визначення миттєвих параметрів, запишемо рівняння для моментів часу  $t_1$  та  $t_2$  відповідно до рівняння електромагнітного стану кола (3):

$$\begin{cases} u(t_1) = r[i(t_1)] \cdot i(t_1) + L[i(t_1)] \cdot i'(t_1); \\ u(t_2) = r[i(t_2)] \cdot i(t_2) + L[i(t_2)] \cdot i'(t_2). \end{cases} \quad (5)$$

Припускаючи, що гістерезисні явища для заданого кола не характерні, отримаємо

$$r[i(t_1)] = r[i(t_2)] = r_{(1)}; \quad L[i(t_1)] = L[i(t_2)] = L_{(1)}.$$

Тоді система двох рівнянь (5) спроститься до вигляду

$$\begin{cases} u(t_1) = r_{(1)} \cdot i(t_1) + L_{(1)} \cdot i'(t_1); \\ u(t_2) = r_{(1)} \cdot i(t_2) + L_{(1)} \cdot i'(t_2). \end{cases}$$

Розв'язуючи отриману систему відносно невідомих  $r_{(1)}$  і  $L_{(1)}$ , та враховуючи, що  $x_{(1)} = L \frac{i'(t_1)}{i(t_1)}$ , ма-

тимемо

$$r_{(1)} = \frac{u(t_2) \cdot i'(t_1) - i'(t_2) \cdot u(t_1)}{i(t_2) \cdot i'(t_1) - i'(t_2) \cdot i(t_1)}, \quad x_{(1)} = \frac{\frac{u(t_1)}{i(t_1)} i(t_2) - u(t_2)}{i(t_2) - \frac{i'(t_2) \cdot i(t_1)}{i'(t_1)}}. \quad (6, 7)$$

За отриманими формулами (6), (7) знайдемо миттєві характеристики на прикладі електровоза ДСЗ за вимірними миттєвими напругою і струмом та за розрахованими похідними цих залежностей (рис. 2). Отримані миттєві характеристики наведено на рис. 3.

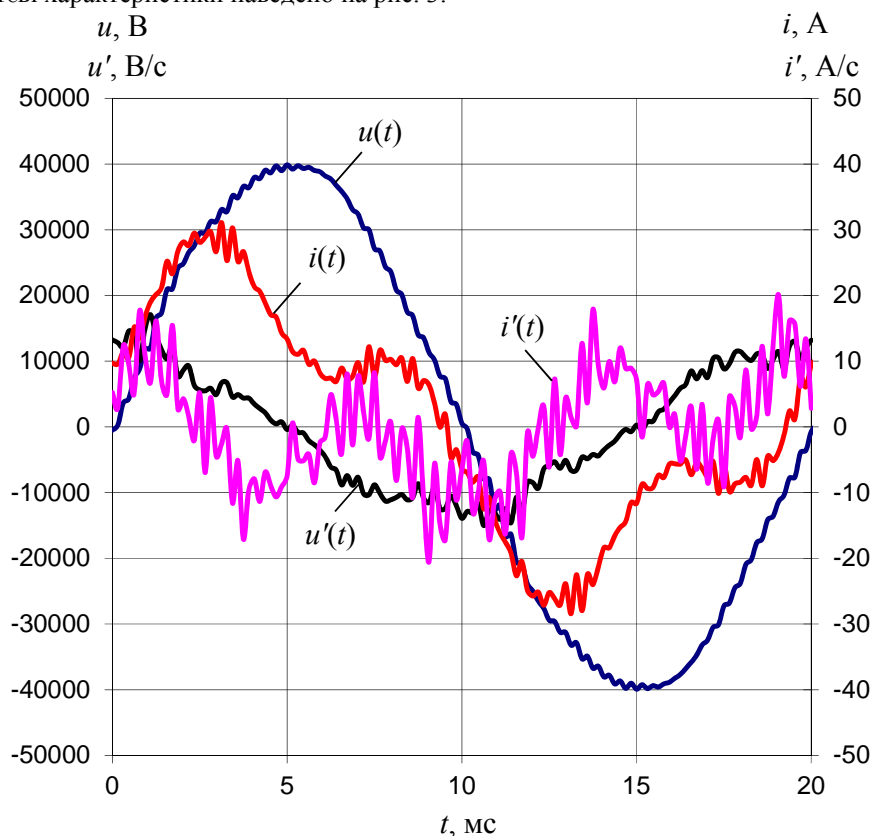


Рис. 2. Осцилограми миттєвих напруги, струму електровоза ДСЗ та їх похідні

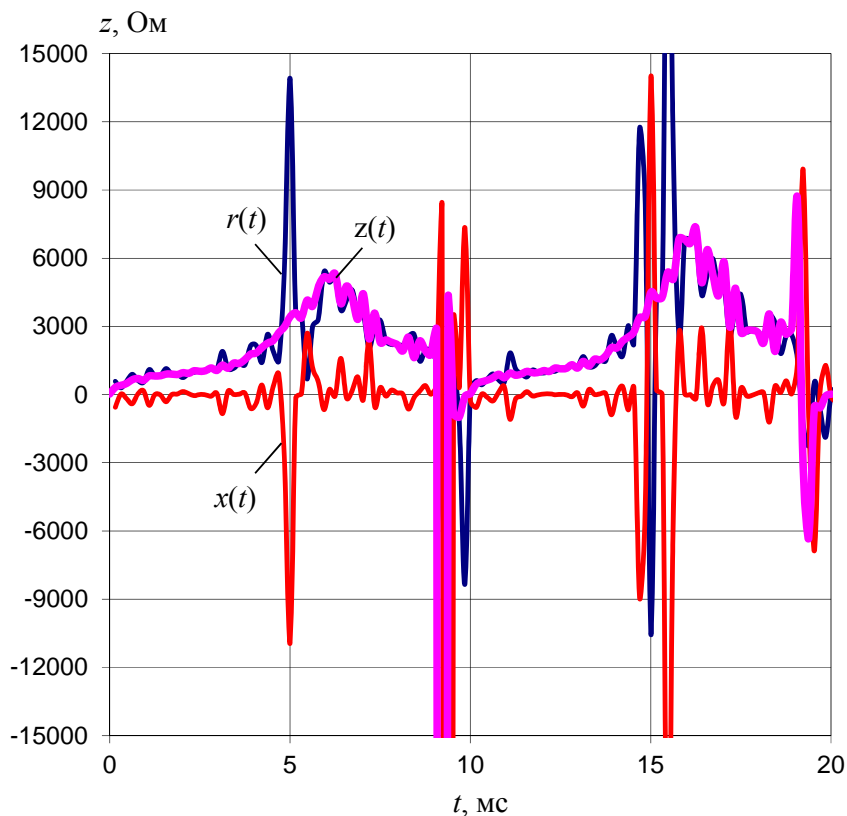


Рис. 3. Миттєві активна та обмінна характеристики електровоза ДСЗ (випадок для ідеального синусоїдного двополюсника)

Для порівняння визначимо миттєві характеристики для ідеально синусоїдного пасивного двополюсника змінного струму. Застосовуючи закон Ома до кожного моменту часу, запишемо

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} = \frac{U_m \sin \omega t}{I_m \sin(\omega t - \varphi)} = \frac{U_m \sin \omega t}{I_m (\sin \omega t \cdot \cos \varphi - \cos \omega t \cdot \sin \varphi)}. \quad (8)$$

Спростуючи рівняння (8), отримаємо

$$z(t) = \frac{U_m}{I_m} \cdot \frac{1}{\cos \varphi - \operatorname{ctg} \omega t \cdot \sin \varphi}. \quad (9)$$

Розкладемо вихідний вираз (8) на постійну та змінну в часі складові. Для цього доцільно застосувати принцип розкладання змінної величини на ортогональні складові, тобто прикладену напругу  $u(t)$  запишемо сумою двох синусоїд – співпадаючою за фазою зі струмом навантаження (активна) та зсунутою на кут  $\pi/2$  відносно струму навантаження (реактивна).

Математично цю операцію можна подати так:

$$u(t) = U_m \sin[(\omega t - \varphi) + \varphi] = U_m [\sin(\omega t - \varphi) \cdot \cos \varphi + \cos(\omega t - \varphi) \cdot \sin \varphi]. \quad (10)$$

Підставляючи останній вираз (10) у вихідний для визначення  $z(t)$  (8), отримаємо

$$z(t) = \frac{U_m}{I_m} \cdot \frac{\sin(\omega t - \varphi) \cdot \cos \varphi + \cos(\omega t - \varphi) \cdot \sin \varphi}{\sin(\omega t - \varphi)},$$

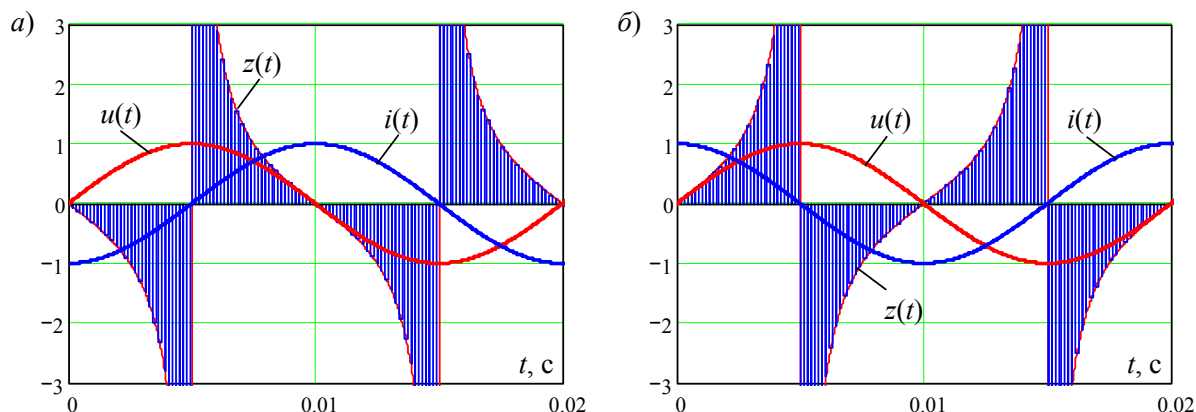
тобто

$$z(t) = \frac{U_m}{I_m} \cos \varphi + \frac{U_m}{I_m} \operatorname{ctg}(\omega t - \varphi) \cdot \sin \varphi. \quad (11)$$

Проаналізуємо вираз (11) детальніше. За відсутності зсуву навантаження ( $\varphi = 0$ ), значення миттєвого опору  $z(t)$  не залежить від часу, а визначається тільки відношенням амплітуд прикладеної напруги та струму навантаження. У такому випадку має місце споживання потужності навантаженням, яке називають чисто активним, а опір, що кількісно характеризує величину цієї потужності, активним опором.

У разі, коли струм зсунутий відносно напруги на кут  $\pi$ , то має місце повернення потужності зі сторони споживача (рекуперация), а величина опору приймає від'ємне значення і не залежить від часу.

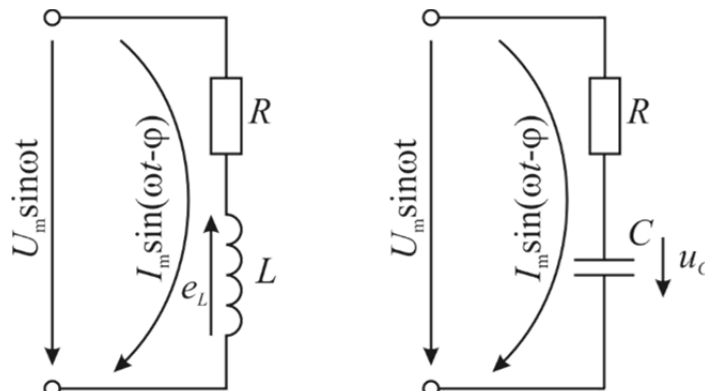
Для значень кутів навантаження  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  та  $\varphi = -\frac{\pi}{2}$  спостерігається чисто індуктивне та чисто ємнісне навантаження. Тоді перша складова виразу (4) дорівнює нулю, а друга – являє собою характеристику миттєвого реактивного опору споживача (рис. 4).



**Рис. 4. Миттєві характеристики індуктивного (а) та ємнісного навантажень (б) на одному періоді основної частоти**

Як видно з рис. 4, величина миттєвого реактивного опору навантаження змінює свій знак чотири рази за один період основної частоти, що свідчить про зміну напрямку проходження реактивної потужності між генератором та споживачем.

В електротехніці для кіл змінного струму застосовуються поняття індуктивного  $X_L$  та ємнісного опору  $X_C$ . Для знаходження співвідношень між цими поняттями і поняттям миттєвого опору розглянемо дві схеми з активно-індуктивним та активно-ємнісним навантаженнями (рис. 5).



**Рис. 5. Схеми заміщення активно-індуктивного та активно-ємнісного навантаження**

Використовуючи закон електромагнітної індукції  $e_L = -L \frac{di}{dt}$  та відомий вираз для ємнісного елемента  $u_C = \frac{1}{C} \int idt$ , на основі другого закону Кірхгофа запишемо рівняння для кожної схеми заміщення, а саме:

$$U_m \sin \omega t = RI_m \sin(\omega t - \varphi) + \omega LI_m \cos(\omega t - \varphi); \quad U_m \sin \omega t = RI_m \sin(\omega t - \varphi) - \frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t - \varphi).$$

Поділивши праву та ліву частини рівнянь на вираз миттєвого струму  $I_m \sin(\omega t - \varphi)$ , запишемо

$$z(t) = R + \omega L \operatorname{ctg}(\omega t - \varphi); \quad z(t) = R - \frac{1}{\omega C} \operatorname{ctg}(\omega t - \varphi).$$

Зіставляючи отримані вирази з формулою (11), матимемо відомі в електротехніці співвідношення

$$R = \frac{U_m}{I_m} \cos \varphi; \quad X_L = \omega L = \frac{U_m}{I_m} \sin \varphi; \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = -\frac{U_m}{I_m} \sin \varphi.$$

Таким чином, незалежна від часу складова у виразі (11) кількісно характеризує величину потужності, що без повернення споживається навантаженням і яку в електротехніці прийнято називати активною потужністю і вона відповідає активній характеристиці навантаження.

Змінна в часі складова миттєвого опору кількісно характеризує величину потужності, що коливається між генератором та споживачем, не створюючи при цьому корисної роботи. Для синусоїдних кіл ця потужність отримала назву «реактивної», а в більш ширшому розумінні її називають «обмінною». Відповідно друга складова миттєвого опору відповідає обмінній характеристиці навантаження.

Для несинусоїдних кіл при визначенні миттєвого опору необхідно було б виконати перетворення Фур'є для переходу від часового до частотного уявлення. Проте виникає проблема, оскільки функція миттєвого опору має стрибки, тобто не є неперервною і не відповідає умові Діріхле. Тому робимо висновок, що отримати характеристики опору навантаження в частотній області за миттєвими значеннями напруги і струму неможливо, оскільки ці осцилограми визначають характеристики навантаження при фіксованому наборі частотних збурень.

### Висновки

Складні розгалужені кола, що містять джерела, та споживачі електроенергії характеризуються двома відмінними енергетичними процесами: безповоротного перетворення енергії джерела живлення в інші види енергії; накопичення енергії у формі магнітного та електричного поля.

Миттєві характеристики електровозів чи плечей навантаження в системі електропостачання змінного струму за вимірними миттєвими напругами і струмами можуть бути визначені за допомогою чисельно розрахованих похідних цих залежностей.

Отримання характеристик опору навантаження в частотній області за миттєвими значеннями напруги і струму неможливі, оскільки ці осцилограми визначають характеристики навантаження при фіксованому наборі частотних збурень.

### Список літератури

1. Костин, Н. А. Реактивная мощность в устройствах систем электрической тяги / Н. А. Костин // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 73 – 76.
2. Міщенко Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод миттєвих потужностей; паралельне з'єднання елементів / Т. М. Міщенко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 41. – С. 86 – 91.
3. Косарев Б. И. Определение параметров устройств электрической тяги по временным характеристикам / Б. И. Косарев, С. В. Ключников, А. В. Фролов, А. И. Щуров // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – № 3. – С. 15 – 17.
4. Косарев Б. И. Активные и обменные характеристики электрических цепей при несинусоидальных токах и напряжениях / Б. И. Косарев, А. И. Щуров, А. В. Фролов, В. Н. Силкин // Электричество. – 1989. – № 9. – С. 43 – 47.
5. Волынец В. В. Машинный метод прямого синтеза нелинейных двухполюсников по временным характеристикам тока и напряжения / В. В. Волынец, А. Б. Косарев // Электротехника. – 2011. – № 8. – С. 37 – 41.
6. Использование мгновенных характеристик электрических цепей при исследовании пассивных двухполюсников: Методические указания по дисциплинам «Теоретические основы электротехники» и «Основы теории электрических цепей» / Сост. Б. И. Косарев, Т. К. Асанов, В. Н. Силкин, и др. – М.: МИИТ, 1990. – 28 с.
7. Босий Д. О. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму / Д. О. Босий, В. Г. Сиченко // Технічна електродинаміка. Тем. вип. – 2009. – Ч. 3. – С. 86 – 89.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Костіним М.О.*

УДК 681.518.5:656.2

*Бойнік А. Б., д-р.техн.наук, Прилипко А. А., канд.техн.наук, Прилипко А. А.  
(Україна, Харків, Український державний університет залізничного транспорту)*

## РОЗШИРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ СИСТЕМ ПОВНОЇ ДІАГНОСТИКИ ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ

### Вступ

Вимоги безпеки, безвідмовності та довговічності систем керування залізничним транспортом, які постійно зростають, потребують постійної оцінки технічного стану різних пристроїв і, зокрема пристроїв залізничної автоматики. Найбільш важливим показником надійності цих пристроїв автоматики є відсутність відмов під час функціонування, тому що відмова їх на залізничному транспорті може призвести до важких наслідків. Технічна діагностика, завдяки ранньому виявленню дефектів та несправностей, дозволяє усунути подібні відмови в процесі обслуговування та ремонту, що підвищує надійність та ефективність експлуатації пристроїв. Важливим напрямом у технічній діагностиці є підвищення контролездатності пристроїв на стадії проектування. Контролездатність створюється спеціальною конструкцією пристрою та прийнятою системою діагностики. Основним завданням контролездатності є створення засобів та методів одержання діагностичної інформації. Одним із найбільш відповідальних приладів залізничної автоматики є точкові колійні датчики (ТКД). Технічна діагностика ТКД сьогодні є актуальним завданням щодо підвищення надійності, ефективності роботи систем залізничної автоматики (ЗА), а також для зменшення часу знаходження електромеханіка в зоні підвищеної безпеки під час пошуку несправностей. Також ці методи можуть бути застосовані і для посиленого контролю за станом інших відповідальних або будь-яких вибраних вузлів та елементів пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ). Особливо це актуально при застосуванні на залізницях таких систем, як АС ДК, АП ДК, АДК-СЦБ та інших.

### Постановка проблеми

У зв'язку із широким упровадженням нових мікропроцесорних систем технічної діагностики з'явилася можливість одночасно контролювати роботу великої кількості пристроїв СЦБ. Однак багато з них мають низьку контролездатність. Насамперед труднощі виникають при визначенні робочих параметрів первинних перетворювачів ТКД. Одним з уразливих елементів є жили кабелю та обмотки датчиків до яких вони приєднані. При руйнуванні цих елементів, або ж порушенні кріплення в багатьох