



УДК 621.313.322; 681.586.772.

ЛЕВИЦЬКИЙ А.С., канд. техн. наук,
Ін-т електродинаміки НАН України, м. Київ

ЄМНІСНІ СЕНСОРИ БИТТЯ ВАЛА ГІДРОГЕНЕРАТОРА З АКТИВНИМ ЕЛЕКТРОДОМ У ФОРМІ ФРАГМЕНТА БІЧНОЇ ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРА



Запропоновано та досліджено ємнісні сенсори радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів, у яких активний електрод виконаний у формі фрагмента бічної поверхні циліндра, обмеженої круглим та прямокутним контуром. Визначено функції перетворення сенсорів.

Одним із головних шляхів поліпшення методів контролю і діагностики потужних гідрогенераторів є удосконалення існуючих та розробка нових сенсорів (первинних перетворювачів) вимірювання параметрів дефектів, організація їх промислового виробництва.

Удосконалення сенсорів в першу чергу зводиться до поліпшення їх технічних характеристик, особливо їх точності, роздільної здатності та надійності. Це дає можливість об'єктивніше оцінити стан машини, тобто скоротити час простою та витрати на ремонти, а в кінцевому результаті перейти від ремонтів за графіком до ремонтів за фактичним станом машини.

Відхилення биття вала від норм, встановлених технічними умовами, є одним із параметрів, які характеризують стан потужних генераторів. Як відомо, відхилення биття вала гідроагрегата спричиняється наступними дефектами: механічними дисбалансами ротора генератора і робочого колеса турбіни; спотворенням форм ротора і статора; гідравлічним дисбалансом робочого колеса; перекосом і спотворенням лінії вала; неперпендикулярністю опорного диска під'ятника і вала генератора; зсувом сегментів під'ятника і підшипників відносно нормального положення; мікронерівностями опорного диска під'ятника і шийок валів в напрямних підшипниках [1].

Отримання достовірної інформації про биття вала гідроагрегату дозволяє визначити близько 58% дефектів гідроагрегата. З використанням даних про биття в Новосибірському державному технічному університеті розроблені принципи побудови підсистем вібраційної діагностики гідроагрегатів на базі АСУТП гідроелектростанцій [1, 2]. Прикладом є підсистема вібраційної діагностики за биттям вала для АСУТП Новосибірської ГЕС, яка введена в експлуатацію на агрегаті № 4.

Найбільш відомою підсистемою вібраційного контролю, що розроблена на базі вимірювання биття вала, є VibraWatch – Vibration Monitoring System [3], яка є частиною універсального контрольно-діагностичного комплексу ZOOM, розробленого компанією VibroSystM Inc. (Канада) [4]. Цей комплекс встановлений на сотнях потужних гідро- і турбогенераторах у багатьох країнах світу.

У відділі електричних і магнітних вимірювань ІЕД НАНУ були проведені наукові дослідження в області ємнісних сенсорів для вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних генераторів. Результати досліджень, які опубліковані в монографії [5], є науковою основою для створення серійних приладів. Основними перевагами створених сенсорів, принцип дії яких базується на вимірюванні безконтактним методом відстані до провідної поверхні, є: нечутливість до впливу потужних електромагнітних полів; незалежність вимірювальної характеристики від "металургійних" властивостей і хімічного складу вала; вони не вимагають якісної механічної обробки поверхні, відносно якої вимірюється биття.

Запропоновані і досліджені в роботі [5] сенсори з активним електродом у формі круга і прямокутника є оптимальними при достатньо великих діаметрах контрольованого вала. Але коли $r/R \geq 0,1$ або $a/R \geq 0,05$ (де R – радіус контрольованого вала; r – радіус активного електрода круглої форми; a – поперечний розмір активного електрода у формі прямокутника) через збільшення впливу крайових ефектів має місце значне збільшення похибки вимірювання, зумовленої кривизною вала.

Проблему можна вирішити, застосувавши в сенсорі замість плоского активного електрода активний електрод у вигляді фрагмента бічної по-

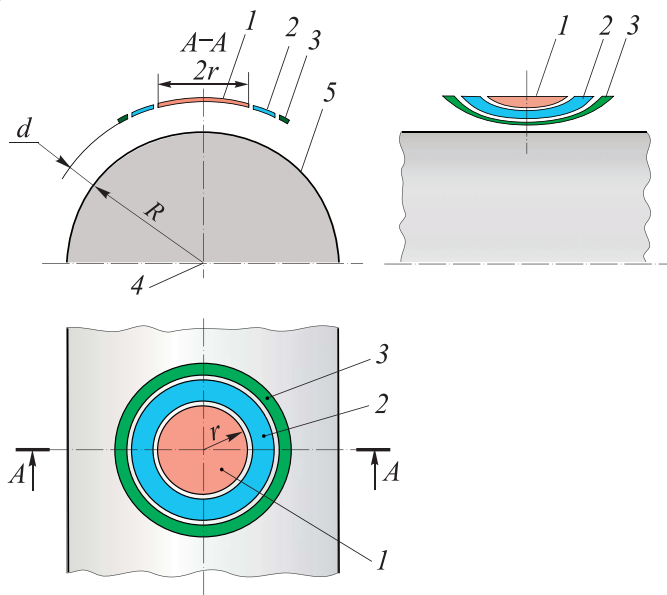


Рис.1. Ємнісний сенсор биття вала з активним електродом, що є фрагментом бічної поверхні циліндра, обмеженої круглим контуром.

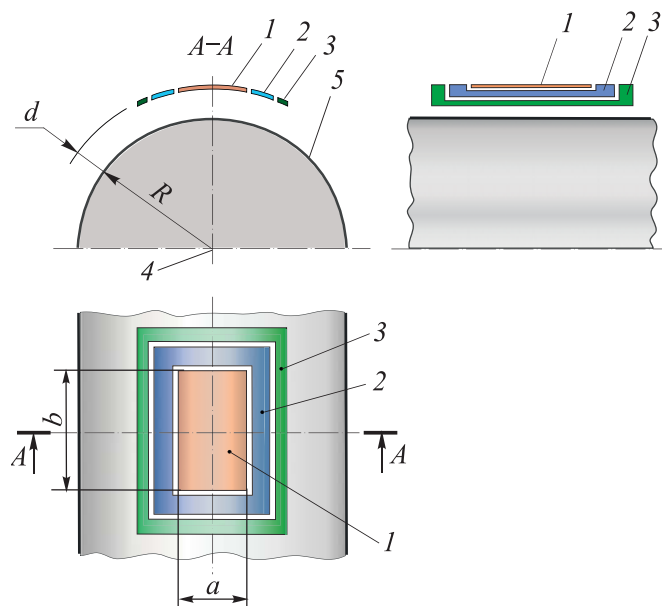


Рис.2. Ємнісний сенсор биття вала з активним електродом, що є фрагментом бічної поверхні циліндра, обмеженої прямокутним контуром

верхні циліндра, еквідистантній контрольованій циліндричній поверхні вала [6]. Замість плоскопаралельного поля в сенсорах буде рівномірне радіально-центричне поле, що практично усуне крайовий ефект.

На Рис. 1 показано у трьох проекціях схему такого сенсора з контуром у вигляді круга, а на Рис. 2 – у вигляді прямокутника. На Рис. 1 і Рис. 2 позначено: 1 – активний електрод, 2 – охоронний електрод, 3 – екранний електрод, 4 – поздовжня вісь вала і 5 – циліндрична поверхня вала.

Охоронні електроди 2 розташовані навколо активних електродів 1, а екранні електроди 3 – навколо охоронних електродів 2. В кожному сен-

сорі електроди 1, 2, 3 розташовані на одній бічній поверхні циліндра радіусом $R + d$ (R – радіус вала; d – зазор в сенсорі).

Пристрої працюють таким чином.

При подачі на активний електрод 1 і охоронний електрод 2 однакових напруг у робочому зазорі сенсора між активним електродом 1 і циліндричною поверхнею вала 5 утвориться однорідне електричне поле. Зважаючи на те, що електроди 1 і 2 не зв'язані між собою гальванічно, вимірювальним струмом є струм, який проходить через електричну ємність, утворену електродом 1 і циліндричною поверхнею вала 4. Якщо проконтролювати відстань d_x за один повний оберт вала, то величина биття δ визначається як різниця між найбільшою $d_{x-\max}$ та найменшою відстанню

$$\delta = d_{x-\max} - d_{x-\min} \quad (1)$$

Постільки поверхня активного електрода сенсора буде приблизно еквідистантною по відношенню до циліндричної поверхні вала, то електричне поле між активним електродом та валом буде однорідним (радіально-центричним), що зменшить в декілька разів величину похибки, яка внесена кривизною вала.

Визначимо функції перетворення сенсорів, тобто залежність між зазором в сенсорі d_x і ємністю C_x між активним електродом та поверхнею вала. Для зручності порівняння виберемо сенсори, що мають однакову площу.

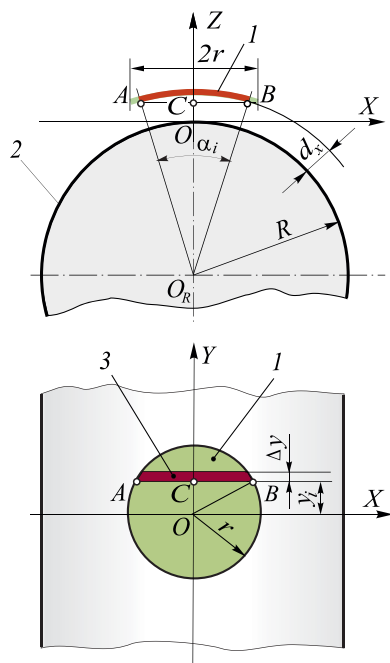


Рис.3. Розрахункова схема сенсора з круглим контуром.



**Розрахунок сенсора з активним електро-
дом, що є фрагментом бічної поверхні цилін-
дра, обмеженої круглим контуром.**

Схема для розрахунку показана на Рис. 3.

Визначимо електричну ємність між актив-
ним робочим електродом 1 і циліндричною пове-
рхнею вала 2 в залежності від розмірів активного
електрода a і b , радіуса R вала та змінної відстані
 d_x між активним електродом 1 і валом 2.

Для розрахунку введемо систему координат
 XYZ таким чином, щоб площина XOY проходила
через точку O на поверхні вала 2, а вісь OZ — че-
рез центр вала O_R і через середину електрода 1.
Вісь OY буде твірною циліндра радіусом $R + d_x$.

Виберемо на площині електрода 1 елементар-
ну ділянку 3 (від точки A до точки B) з нескінчен-
но малим розміром Δy і координатою y_i . Ємність
 ΔC_i між площадкою 3 і поверхнею вала 2, як еле-
ментів співвісних циліндрів, визначиться нас-
тупним чином

$$\begin{aligned} \Delta C_i &= \epsilon_0 \epsilon \frac{2\pi \Delta y}{\ln\left(\frac{R+d_x}{R}\right)} \cdot \frac{(R+d_x) \alpha_i}{2\pi(R+d_x)} = \\ &= \epsilon_0 \epsilon \frac{\alpha_i}{\ln\left(\frac{R+d_x}{R}\right)} \Delta y \end{aligned} \quad (2)$$

де $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — діелектрична про-
никність вакууму; ϵ — відносна діелектрична про-
никність середовища; α_i — центральний кут, на
який спирається дуга елементарної ділянки 3.

Враховуючи співвідношення в прямокутних
трикутниках ASO і ASO_R , визначимо, що α_i буде

дорівнювати

$$\alpha_i = 2 \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - y_i^2}}{R + d_x} \quad (3)$$

Тоді

$$\Delta C_i = 4\epsilon_0 \epsilon \frac{\arcsin \frac{\sqrt{r^2 - y_i^2}}{R + d_x}}{\ln\left(\frac{R + d_x}{R}\right)} \Delta y \quad (4)$$

Замінивши приріст функції Δy на диференціал
 dy , визначимо загальну ємність C_x (з урахуван-
ням симетрії відносно осі OX) між активним
електродом 1 і валом 2, обчисливши інтеграл з
межами інтегрування $y_1 = 0; y_2 = r$.

$$C_x = \sum_{i=1}^{\infty} \Delta C_i = 4\epsilon_0 \epsilon \int_0^r \frac{\arcsin \frac{\sqrt{r^2 - y^2}}{R + d_x}}{\ln\left(\frac{R + d_x}{R}\right)} dy \quad (5)$$

Результати чисельного обчислення ємності
 C_x згідно формули (5) показані на Рис. 4. Обчис-
лення виконано при $R = 40$ мм; $r = 8$ мм.

Як було зазначено в [5], для одержання пря-
мого відліку величини зазору вторинний перет-
ворювач будується таким чином, що його вихідна
напряга прямо пропорційна ємнісному опору сен-
сора, тобто зворотній величині ємності $1/C_x$, і ця
залежність $1/C_x = f(d_x)$ показана на Рис. 5.

**Розрахунок сенсора з активним електро-
дом, що є фрагментом бічної поверхні цилін-
дра, обмеженої прямокутним контуром.**

Схема для розрахунку показана на Рис. 6.

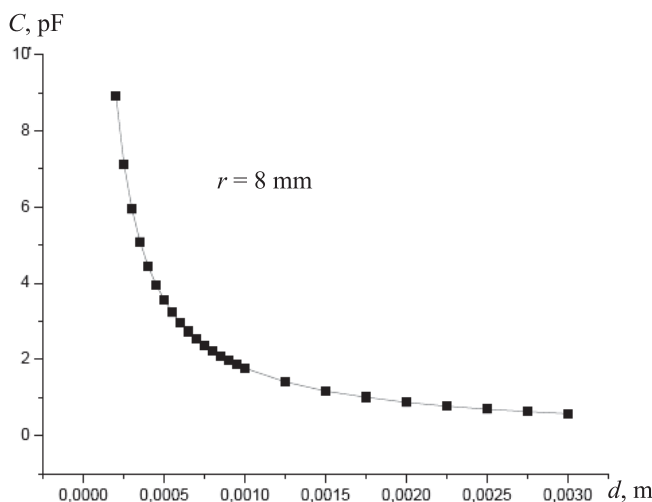


Рис. 4. Залежність $C_x = f(d_x)$ для ємнісного сенсора з активним електродом, що є фрагментом бічної поверхні циліндра, обмеженої круглим контуром.

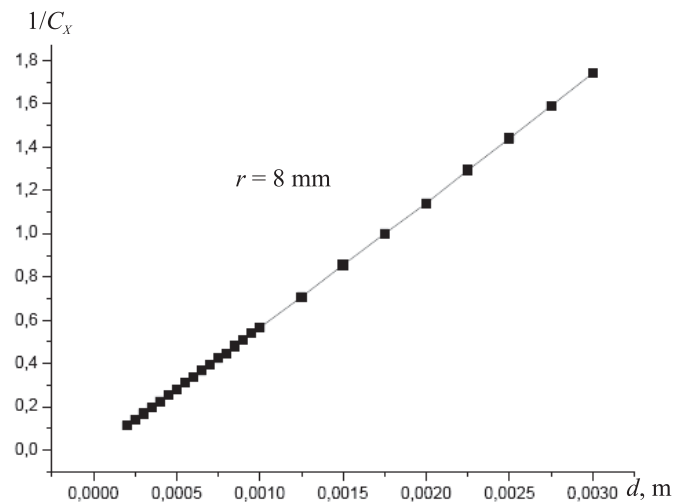


Рис. 5. Залежність $1/C_x = f(d_x)$ для ємнісного сенсора з активним електродом, що є фрагментом бічної поверхні циліндра, обмеженої круглим контуром

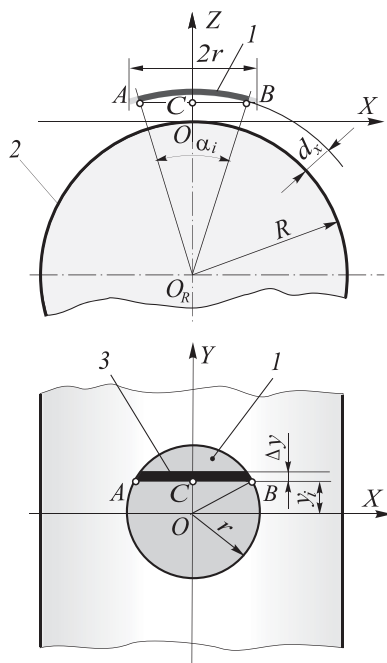


Рис. 6. Розрахункова схема сенсора з прямокутним контуром

Визначимо електричну ємність між активним робочим електродом 1 і циліндричною поверхнею вала 2 в залежності від розмірів активного електрода a і b , радіуса R вала та відстані d між активним електродом 1 і валом 2.

Для розрахунку введемо систему координат XYZ за тими ж вимогами, що і для розрахунку сенсора з круглим контуром. Виберемо на площині електрода 1 елементарну ділянку 3 (від точки A до точки B) з нескінченно малим розміром Δy і координатою y_i . Ємність ΔC_i між площадкою 3 і поверхнею вала 2, як елементів співвісних циліндрів, визначиться за формулою

$$\Delta C_i = \epsilon_0 \epsilon \frac{2\pi \Delta y}{\ln\left(\frac{R+d_x}{R}\right)} \cdot \frac{(R+d_x)\alpha}{2\pi(R+d_x)} = \epsilon_0 \epsilon \frac{\alpha}{\ln\left(\frac{R+d_x}{R}\right)} \Delta y \quad (6)$$

Враховуючи співвідношення в прямокутному трикутнику ACO_R визначимо, що

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{a}{2(R+d_x)} \quad \alpha = 2 \arcsin \frac{a}{2(R+d_x)}$$

Тоді

$$\Delta C_i = \epsilon_0 \epsilon \frac{2 \arcsin \frac{a}{2(R+d_x)}}{\ln\left(\frac{R+d_x}{R}\right)} \Delta y \quad (7)$$

Замінивши приріст функції Δy на диференціал dy , визначимо загальну ємність C_X між активним електродом 1 і валом 2, обчисливши інтеграл з межами інтегрування $y_1 = 0$; $y_2 = b$.

$$C_X = \sum_{i=1}^{i=\infty} \Delta C_i = 2\epsilon_0 \epsilon \int_0^b \frac{\arcsin \frac{a}{2(R+d_x)}}{2 \ln\left(\frac{R+d_x}{R}\right)} dy = 2b\epsilon_0 \epsilon \frac{\arcsin \frac{a}{2(R+d_x)}}{2 \ln\left(\frac{R+d_x}{R}\right)} \quad (8)$$

Якщо прийняти розміри активного електрода рівними $a = 6,4$ мм і $b = 31,4$ мм, то результати розрахунку $C_X = f(d_X)$ ілюструє графік, показаний на

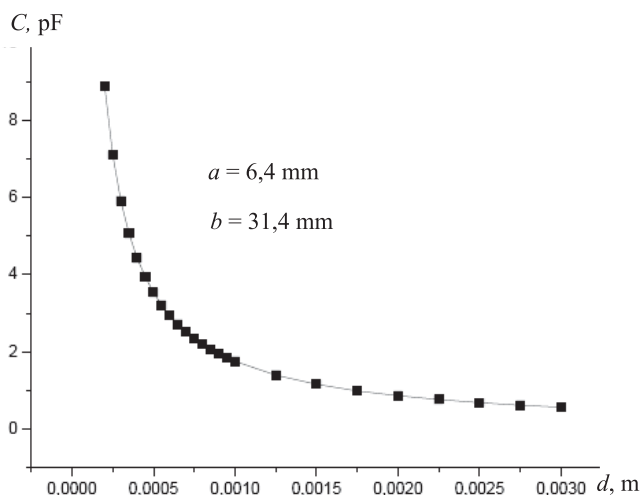


Рис. 7. Залежність $C_X = f(d_X)$ ємнісного сенсора з активним електродом, що є фрагментом бічної поверхні циліндра, обмеженої прямокутним контуром.

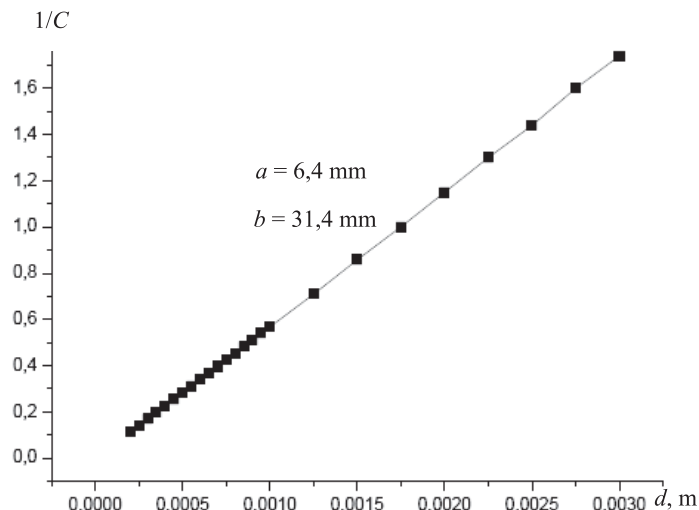


Рис. 8. Залежність $1/C_X = f(d_X)$ для ємнісного сенсора з активним електродом, що є фрагментом бічної поверхні циліндра, обмеженої прямокутним контуром.

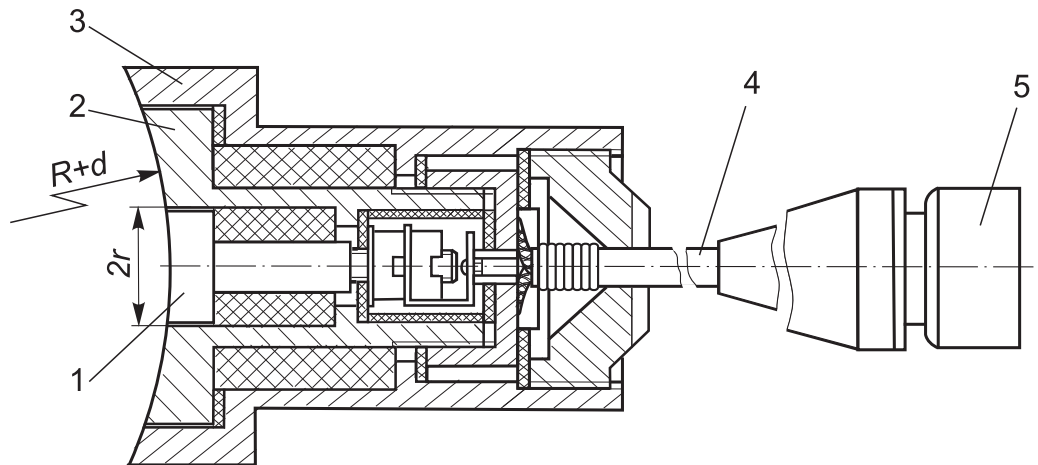


Рис. 9. Креслення сенсора з круглим контуром: 1 – активний електрод (з контуром радіусом r); 2 – охоронний електрод; 3 – екранний електрод; 4 – триаксальний кабель; 5 – вилка-рознімач.

Рис. 7, а розрахунку $1/C_X = f(d_X)$ – на Рис. 8.

На рис. 9 показано креслення одного із можливих варіантів ємнісного сенсора з активним електродом у формі фрагмента бічної поверхні циліндра з круглим контуром.

Висновки.

1. Функції перетворення запропонованих ємнісних сенсорів мають лінійний характер.
2. За однакової площі сенсорів їх функція перетворення не залежить від форми електродів.
3. Запропоновані сенсори можуть бути використані для вимірювання биття вала потужних електричних машин, в тому числі і гідрогенераторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Глазырин Г.В. Разработка моделей и методов вибрационной диагностики агрегатов гидроэлектростанций: Дис. ... кандидата техн. наук: 05.14.02 / Глазырин Глеб Владимирович. – Новосибирск, 2006. – 338 с.
2. Белоглазов А.В. Разработка средств мониторинга биений вала гидроагрегата / А.В. Белоглазов, Г.В. Глазырин // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – № 3 (53). – С. 79–84.
3. *VibraWatch*™ – Vibration Monitoring System. http://www.vibrosystem.com/en/vibra_e.html.
4. *On-line Monitoring of Hydro Generating Units for Optimized Operation and Maintenance*. http://www.vibrosystem.com/pdf/ZOOM_E.PDF.
5. Левицький А.С. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів / Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – 242 с.
6. Патент на корисну модель № 62685 Україна, МПК G01B 7/14. Ємнісний сенсор для вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних електричних машин / Левицький А.С., Новік А.І.; Заявник і власник Інститут електродинаміки Національної Академії Наук України – у 2011 01524; заяв. 10.02.2011; опубл. 12.09. 2011, Бюл. № 17.

© Левицький А.С., 2012

