

Додаток А

Сценарій автоматизованого форматування графіків

Під час виконання досліджень їхні результати, як правило, представляють у вигляді графіків, форматування яких для їхньої належної демонстрації є досить трудомісткою задачею, тому використовуємо сценарії (рисунок А.1), які забезпечують автоматичне форматування графіків до такого вигляду, котрий можна додавати до текстів наукових звітів безпосередньо.

```
FormatCharts.sce
1 function FormatCharts(titlex, titley, titlec, LEGEND, pos)
2   xgrid(0);
3   a=get("current_axes");
4   a.font_size=3;
5   a.x_label.font_size=4;
6   a.y_label.font_size=4;
7   title(titlec, 'fontsize', 4);
8   xlabel(titlex);
9   ylabel(titley);
10  if length(LEGEND)>0 then
11    legend(LEGEND, pos).font_size=4
12  end
13 endfunction
14
15 function SetAxesBounds(xmin, xmax, ymin, ymax)
16   a=get("current_axes");
17   a.data_bounds = [xmin, ymin; xmax, ymax];
18 endfunction
19
20 function SetXAxesBounds(xmin, xmax)
21   a=get("current_axes");
22   a.data_bounds = [xmin, a.data_bounds(1, 2); xmax, a.data_bounds(2, 2)];
23 endfunction
24
25 function SetYAxesBounds(ymin, ymax)
26   a=get("current_axes");
27   a.data_bounds = [a.data_bounds(1, 1), ymin; a.data_bounds(2, 1), ymax];
28 endfunction
```

Рисунок А.1 – Сценарії автоматичного форматування графіків комп'ютерної системи математичних обчислень та моделювання Scilab

Додаток Б

Базові сценарії дослідження процесів в електромагнітному тахометрі

Сценарій досліджень процесів в ЕТ мають забезпечувати моделювання процесів для різних вихідних даних, зокрема, для різної кутової швидкості, а також побудову результатів у вигляді відповідних графіків. Для моделювання процесів в ЕТ зручно застосовувати спеціальну функцію (рисунок Б.1), вхідними змінними якої будуть параметри, що варіюються протягом виконання досліджень, а результати її містять дані про досліджувані процеси.

```

task1_A.sce
1 clear; clc;
2
3 exec('FormatCharts.sce',-1);
4 loadXcosLibs(); loadScicos();
5
6 function Y=simulation(w)
7 ... importXcosDiagram("task1.zcos");
8 ... typeof(scs_m);
9 ... scs_m.props.context;
10 ... Context.w=w;
11 ... scicos_simulate(scs_m,Context);
12 ... Y=[Um,Wm,W,Eps];
13 endfunction

```

Рисунок Б.1 – Функція для підтримки сценаріїв дослідження процесів в ЕТ під час вимірювання сталої швидкості, котру миттєво отримав первинно нерухомий ротор тахометра

Побудова результатів у вигляді графіків реалізується за допомогою використання даних,отриманих під час моделювання, проте водночас слід упорядковувати такі дані відповідним чином, наприклад, шляхом створення титульних надписів та легенд, які розшифровують криві, розташовані на одному графіку (рисунок Б.2 – Б.4). Зрозуміло, що для цього в окреслених

місцях використовуються раніше розроблені сценарії автоматичного форматування графіків (рисунок А.1).

```

15 w=500;
16 leg=["$\omega="+string(w)+"\mathrm{rpm}$"];
17 Y=simulation(w*pi/30); Um=Y(1); wm=Y(2); w=Y(3); eps=Y(4);
18 show_window(1);
19 plot(1000*Um.time,Um.values,"k-","linewidth",2);
20 show_window(2);
21 plot(1000*eps.time,30/pi*eps.values,"k-","linewidth",2);
22 show_window(3);
23 plot(1000*wm.time,30/pi*wm.values,"k-","linewidth",2);
24 plot(1000*w.time,30/pi*w.values,"k:", "linewidth",2);
25 titul=leg(1);
26 leg1=["$\mathrm{measured}$", "$\mathrm{actual}$"];
27 titlex="$t, \mathrm{ms}$"; titley="$\omega(t), \mathrm{rpm}$";
28 SetYAxesBounds(0,600);
29 FormatCharts(titlex,titley,titul,leg1,4);
30 xsave("task1_A3.scg");

```

Рисунок Б.2 – КМ процесів в ЕТ, що побудована інструментами графічного середовища Xcos комп'ютерної системи математичних обчислень та моделювання Scilab

```

32 w=1000;
33 leg=[leg, "$\omega="+string(w)+"\mathrm{rpm}$"];
34 Y=simulation(w*pi/30); Um=Y(1); wm=Y(2); w=Y(3); eps=Y(4);
35 scf(1);
36 plot(1000*Um.time,Um.values,"k--","linewidth",2);
37 scf(2);
38 plot(1000*eps.time,30/pi*eps.values,"k--","linewidth",2);
39 show_window(4);
40 plot(1000*wm.time,30/pi*wm.values,"k-","linewidth",2);
41 plot(1000*w.time,30/pi*w.values,"k:", "linewidth",2);
42 titul=leg(2);
43 SetYAxesBounds(0,1100);
44 FormatCharts(titlex,titley,titul,leg1,4);
45 xsave("task1_A4.scg");

```

Рисунок Б.3 – КМ процесів в ЕТ, що побудована інструментами графічного середовища Xcos комп'ютерної системи математичних обчислень та моделювання Scilab

```

47 w=1500;
48 leg=[leg, "$\omega="+string(w)+"\mathrm{rpm}$"];
49 Y=simulation(w*pi/30); Um=Y(1); wm=Y(2); w=Y(3); eps=Y(4);
50 scf(1);
51 plot(1000*Um.time,Um.values,"k:", "linewidth", 2);
52 FormatCharts("$t, \mathrm{ms}$", "$U_m(t), \mathrm{V}$", "", leg, 4);
53 xsave("task1_A1.scg");
54 scf(2);
55 plot(1000*eps.time, 30/pi*eps.values, "k:", "linewidth", 2);
56 FormatCharts("$t, \mathrm{ms}$", "$\varepsilon(t), \mathrm{rpm}$", "", leg, 1);
57 xsave("task1_A2.scg");
58 show_window(5);
59 plot(1000*wm.time, 30/pi*wm.values, "k-", "linewidth", 2);
60 plot(1000*w.time, 30/pi*w.values, "k:", "linewidth", 2);
61 titul=leg(3);
62 SetYAxesBounds(0, 1600);
63 FormatCharts(titlex, titley, titul, leg1, 4);
64 xsave("task1_A5.scg");

```

Рисунок Б.4 – КМ процесів в ЕТ, що побудована інструментами графічного середовища Xcos комп'ютерної системи математичних обчислень та моделювання Scilab

Зауважимо, що сценарії (рисунок Б.2– Б.4) досліджень передбачають автоматичне збереження результатів, які подаються у вигляді графіків у спеціальному графічному форматі системи Scilab. У подальшому це дозволяє використовувати такі результати безпосередньо без повторного виконання обчислень, зокрема, для збереження їх у розповсюджених форматах графічних файлів, які дозволяють додавати відповідні зображення до текстових документів.

Додаток В

Сценарії щодо статичної ідентифікації ЕТ

```

task2_A.sce
1 clear; clc;
2
3 exec('FormatCharts.sce', -1);
4 loadXcosLibs(); loadScicos();
5
6 function Y=simulation(w)
7     importXcosDiagram("task2.zcos");
8     typeof(scs_m);
9     scs_m.props.context;
10    Context.noise=1;
11    Context.w=w;
12    scicos_simulate(scs_m, Context);
13    Y=[Um, Wm, W, Eps];
14 endfunction
15
16 wk=500;
17 leg=["$\omega=" + string(wk) + "\mathrm{rpm}$"];
18 Y=simulation(wk*pi/30); Um=Y(1); Wm=Y(2); W=Y(3); Eps=Y(4);
19 show_window(1);
20 plot(1000*Um.time, Um.values, "k-", "linewidth", 2);
21 N=length(w.time); Ns=round(N/2);
22 W=[wk*pi/30.*ones(N-Ns, 1)]; U=[Um.values(Ns+1:N)];
23 wk=1000;
24 leg=[leg, "$\omega=" + string(wk) + "\mathrm{rpm}$"];
25 Y=simulation(wk*pi/30); Um=Y(1); Wm=Y(2); W=Y(3); Eps=Y(4);
26 scf(1);
27 plot(1000*Um.time, Um.values, "k--", "linewidth", 2);
28 N=length(w.time); Ns=round(N/2);
29 W=[W; wk*pi/30.*ones(N-Ns, 1)]; U=[U; Um.values(Ns+1:N)];
30 wk=1500;
31 leg=[leg, "$\omega=" + string(wk) + "\mathrm{rpm}$"];
32 Y=simulation(wk*pi/30); Um=Y(1); Wm=Y(2); W=Y(3); Eps=Y(4);
33 scf(1);
34 plot(1000*Um.time, Um.values, "k:", "linewidth", 2);
35 FormatCharts("$t, \mathrm{ms}$", "$U_m(t), \mathrm{V}$", "", leg, 4);
36 xsave("task2_A.scg");
37 N=length(w.time); Ns=round(N/2);
38 W=[W; wk*pi/30.*ones(N-Ns, 1)]; U=[U; Um.values(Ns+1:N)];
39 at=sum(U.*W)/sum(W.*W); disp(at);
40 RT=36; LT=1.6E-3; Be=0.029; Rm=100; at=(Be*Rm)/(RT+Rm); disp(at);

```

Рисунок В.1 – Текст програми-сценарію статичної ідентифікації ЕТ
методом найменших квадратів

```

task3_A.sce
1 clear; -clc;
2
3 exec('FormatCharts.sce',-1);
4 loadXcosLibs(); -loadScicos();
5
6 function Y=simulation(w)
7     -importXcosDiagram("task3.zcos");
8     -typeof(scs_m);
9     -scs_m.props.context;
10    -Context.w=w;
11    -scicos_simulate(scs_m,Context);
12    -Y=[Um,Ums];
13 endfunction
14
15 wk=500; Y=simulation(wk*pi/30); -Um=Y(1); -Ums=Y(2);
16 show_window(1);
17 plot(1000*Um.time,Um.values,"k-","linewidth",2);
18 plot(1000*Ums.time,Ums.values,"k:","linewidth",2);
19 leg=["$\mathrm{clarified\ model}$", "$\mathrm{simplified\ model}$"];
20 FormatCharts("$t, \mathrm{ms}$", "$U_m(t), \mathrm{V}$", "", leg, 4);
21 xsave("task3_A.scg");

```

Рисунок В.2 – Текст програми-сценарію порівняння фактичного стану ЕТ даних та оцінки цього стану на основі результату статичної ідентифікації

Додаток Г

Публікації за темою досліджень

**МІЖНАРОДНИЙ
НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
«ІНТЕРНАУКА»**

ISSN 2520-2057 (print)
ISSN 2520-2065 (online)

INTERNATIONAL
SCIENTIFIC JOURNAL
«INTERNAUKA»



№ 9 (164) / 2024



**МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
«ІНТЕРНАУКА»**
**INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL
«INTERNAUKA»**

*Свідоцтво
про державну реєстрацію
друкованого засобу масової інформації
КВ № 22444-12344ПР*

Збірник наукових праць

№ 9 (164)

Київ 2024

Fialko Nataliia, Stepanova Alla, Navrodska Raisa, Meranova Nataliia, Shevchuk Svitlana RESEARCH OF EXERGETIC LOSSES IN HEAT TRANSFER PROCESSES FOR LAMELLAR AND SMOOTH TUBE AIR HEATING HEAT RECOVERERS.....	66
Аллахверанов Рауф Юсіф огли, Фролов Андрій Віталійович, Самсєєв Дєніс Вікторович, Грифонов Олег Миколойович МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТАХОМЕТРІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКИБОК ВИМІРЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ДЕТАЛЕЙ НАВКОЛО НЕРУХОМОЇ ОСІ.....	69
Лаврін Максим Романович, Белей Оксана Ігорівна, Штаєр Лідія Омелянівна РОЗРОБЛЕННЯ СХЕМИ СТРУКТУРИ БАЗИ ДАНИХ СИСТЕМИ ОБЛІШУ ВИТРАТ ТА ДОКОДІВ.....	77
Покидаєв Олександр Михайлович ЗАХИСТ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ВІД ВІПЛИВУ НАВМИСНИХ ЗАВАД.....	80
Фіалко Наталія Михайлівна, Навродська Раїса Олександрівна, Гнедаш Георгій Олександрович, Шенчук Світлана Іванівна, Сбродова Галина Олександрівна ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТІВ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК.....	84
Шеренковський Юлія Владиславович, Фіалко Наталія Михайлівна, Прокопів Віктор Грогорович, Меранова Наталія Олегівна, Альошко Сергій Олександрович, Юрчук Володимир Леонідович, Кліщ Андрій Володимирович, Бегін Юрій Олексійович, Розитяко Костянтин Володимирович, Дашковська Ірина Леонідівна ВІПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПАЛИВОПОДАЧІ НА ЗАКОНОМІРНОСТІ ТЕЧІІ В МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКАХ.....	88
ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ НАУКИ	
Селєзньова Надія Петрівна, Рудик Тетяна Олександрівна МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КОЛЕКТИВНИХ ПЕРЕВАГ ЕЛЕКТОРАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	93
ФІЛОЛОГІЧНІ НАУКИ	
Ivashchshyn Olha, Markelova Svitlana COGNITIVE AND COMMUNICATIVE APPROACHES TO TEACHING GRAMMAR IN ESP CLASSES.....	99
ФІЛОСОФСЬКІ НАУКИ	
Філіпенко Наталія Григорівна ФІЛОСОФІЯ В КИЇВСЬКОМУ УНІВЕРСИТЕТІ СВ. ВОЛОДИМИРА ПОЧАТКУ ХХ СТ.: АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ У НАЦІОНАЛЬНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ «КИЇВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ».....	103
ЮРИДИЧНІ НАУКИ	
Ільєнко Владислав Юрійович, Ільєнко Дмитро Юрійович ОРГАНІЗАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОННОЇ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ ОРГАНАМИ ДЕРЖАВНОЇ ТА СУДОВОЇ ВЛАДИ.....	110
Ільєнко Владислав Юрійович, Ільєнко Дмитро Юрійович ВИДИ, ФОРМИ ТА МЕТОДИ ВЗАЄМОДІЇ ОРГАНІВ ДЕРЖАВНОЇ ТА СУДОВОЇ ВЛАДИ.....	114

УДК 621.317

Аллахверанов Рауф Юсіф огли
*кандидат технічних наук, доцент,
 доцент кафедри КТТАР
 Харківський національний університет радіоелектроніки*
Allakhveranov Rauf
*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
 Kharkiv National University of Radio Electronics*

Фролов Андрій Віталійович
*кандидат технічних наук, доцент,
 доцент кафедри КТТАР
 Харківський національний університет радіоелектроніки*
Frolov Andrii
*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
 Kharkiv National University of Radio Electronics*

Синєєв Денис Вікторович
*магістрант
 Харківського національного університету радіоелектроніки*
Siniyev Denys
*Master Student of the
 Kharkiv National University of Radio Electronics*

Трифонов Олег Миколайович
*магістрант
 Харківського національного університету радіоелектроніки*
Tryfonov Oleh
*Master Student of the
 Kharkiv National University of Radio Electronics*

DOI: 10.26313/2520-2067-2024-9-10298

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТАХОМЕТРІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ДЕТАЛЕЙ НАВКОЛО НЕРУХОМОЇ ОСІ

MODELING OF ELECTROMAGNETIC TACHOMETERS TO DETERMINE MEASUREMENT ERRORS ANGULAR SPEED OF ROTATION OF PARTS AROUND A FIXED AXIS

Анотація. Побудовано математичну модель електромагнітного тахометра, на основі електромагнітних аналогів та рівнянь Лагранжа 2-го роду, у вигляді диференціального рівняння першого порядку із відповідною початковою умовою, що дозволяє визначити вимірювану електричну напругу, котра формується тахометром під час вимірювання кутової швидкості обертання деталей навколо нерухомої осі.

Ключові слова: математична модель, електромагнітний тахометр, кутова швидкість, диференціальні рівняння, функція Лагранжа, вимірювання.

Summary. A mathematical model of an electromagnetic tachometer has been constructed, based on electromechanical analogies and Lagrange's equations of the 2nd kind, in the form of a first-order differential equation with an appropriate initial condition, which allows determining the measuring electric voltage generated by the tachometer when measuring the angular velocity of rotation of parts around a fixed axis.

Key words: mathematical model, electromagnetic tachometer, angular velocity, differential equations, Lagrange function, measurement.

Вступ. Електромагнітний тахометр є досить розповсюдженим вимірвальним приладом, який використовується в системах автоматизації для неперервного визначення поточної кутової швидкості обертання деталей навколо нерухомої осі. Визначення кутової швидкості обертання за допомогою електромагнітного тахометра ґрунтується на взаємодії рухомих шільних електричних зарядів у провідниках із зовнішнім магнітним полем, отже, електромагнітний тахометр насправді є електро механічним або мікроелектромеханічним вимірвальним приладом [1].

Моделювання електромагнітних тахометрів насправді потрібне для визначення похибок вимірювання кутової швидкості для різних режимів роботи приладів у системах автоматизації. Перевагою математичного моделювання порівняно із проведенням суто натурних випробувань тахометрів є можливість дослідження різноманітних режимів роботи приладу, підтворення яких під час проведення випробувань може бути досить складним. Характерним прикладом режимів роботи тахометрів, які досить складно підтворити під час проведення випробувань, є височастотні коливання кутової швидкості, що обумовлені, наприклад, крутильними коливаннями деталей, які обертаються навколо нерухомої осі [1]. Такі особливі режими роботи тахометрів, зазвичай, підпадають досить небезпечними режимам, у тому числі таким, які можуть призвести до руйнування деталей, або інших порушень умов нормальної експлуатації технічних систем. Отже, дослідження впливу режимів експлуатації

на похибку вимірювання кутової швидкості електромагнітними тахометрами насправді важливо для забезпечення безпечної експлуатації різноманітних технічних систем. Крім цього, перевагою математичного моделювання є можливість дослідження процесів в електромагнітних тахометрах, які ще не виготовлені, що, зрозуміло, є насправді дуже корисним на етапі проектування тахометрів, у тому числі для забезпечення можливостей щодо вимірювання кутової швидкості на особливих режимах обертання.

Розрахункова схема електромагнітного тахометра. Кутова швидкість — векторна фізична величина, що характеризує швидкість обертання матеріальної точки навколо центру обертання. Вектор кутової швидкості за величиною дорівнює куту повороту точки навколо центру обертання за одиницю часу. Сучасні прилади, що базуються на різноманітних принципах, механічних, електричних, магнітних тощо застосовувалися та застосовуються для вимірювання середніх значень швидкостей. Поведінка цих приладів при режимі роботи, що не встановився, піддається виміру лише деякими методами. Так само багато приладів підпадають на деталі, що обертається, або мають серйозні похибки і складності в установленні та налаштуванні, що частіше ці проблеми зустрічаються всі разом [2; 3].

На рис. 1 наведено схематичну будову електромагнітного тахометра.

Основним елементом електромагнітного тахометра (рис. 1) є провідник електричного струму, котрий обертається в зовнішньому магнітному полі

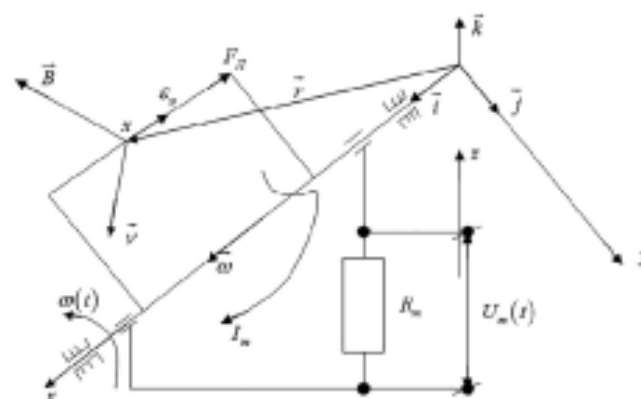


Рис. 1. Схематична будова електромагнітного тахометру

а індукцією \vec{B} . Як відомо із фізики, провідники електричного струму містять ніякі електричні заряди (рис. 1) у вигляді електронів або іонів [4]. Під час обертання такого провідника із кутовою швидкістю ω навколо нерухомої осі x , ніякі електричні заряди, що містяться в ньому, зрозуміло, будуть переноситися разом із рухомих провідником (рис. 1). У результаті цього матимемо ніякі електричні заряди, що переносяться провідником в зонішньому магнітному полі, на які, як відомо із фізики, діє сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = x\vec{v}\vec{B} \quad (1)$$

де \vec{F}_L — сила Лоренца, а якою зонішнє магнітне поле діє на рухомих електричний заряд;

x — електричний заряд;

\vec{v} — тривалентність електричного заряду;

\vec{B} — індукція магнітного поля.

Сила Лоренца дуже схожа за своїм принципом на силу Ампера, різниця полягає в тому, що остання діє на весь провідник, який загалом електрично нейтральний, а сила Лоренца описує вплив електромагнітного поля лише на одиничний заряд, що рухається. Вона характеризується тим, що не змінює швидкість переміщення зарядів, а лише впливає на вектор швидкості, тобто здатна змінювати напрямок руху заряджених частинок [4].

Оскільки провідник електричного струму, передбачений в електромагнітному тахометрі, обертається навколо нерухомої осі (рис. 1), то, як відомо з механіки, швидкість вільного електричного заряду, що переноситься таким провідником, визначатиметься у наступному вигляді:

$$\vec{v} = \vec{\omega} \cdot \vec{r} \quad (2)$$

де $\vec{\omega}$ — вектор кутової швидкості;

\vec{r} — радіус-вектор точки, котра визначає положення рухомого електричного заряду.

Врахуємо швидкість (2) під час визначення сили Лоренца (1), та в результаті цього одержимо так:

$$\vec{F}_L = x(\vec{\omega} \cdot \vec{r}) \cdot \vec{B}. \quad (3)$$

Дію сили Лоренца (3.3) на ніякі електричні заряди в провіднику можна уявити як результат наявності електричного поля, що визначатиметься так:

$$\vec{E}_n = (\vec{\omega} \cdot \vec{r}) \cdot \vec{B}, \quad (4)$$

де \vec{E}_n — енергія поля, котра утворюється електричним зарядом, який рухається в магнітному полі.

Уведемо до розгляду вектори кутової швидкості, індукції магнітного поля та визначимо положення рухомого вільного заряду провідника за допомогою декартових координат (рис. 1):

$$\vec{\omega} = \omega \vec{i}, \quad (5)$$

$$\vec{B} = -B \vec{j}, \quad (6)$$

$$\vec{r} = x \vec{i} + y \vec{j} + z \vec{k}, \quad (7)$$

де $\vec{\omega}$ — вектор кутової швидкості;

\vec{B} — вектор індукції магнітного поля;

ω — проєкція вектору кутової швидкості на вісь x ;

B — модуль індукції магнітного поля;

x, y, z — координати рухомого вільного електричного заряду;

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — орти нерухомих координатних осей.

З урахуванням співвідношень (5) та (6) визначимо кутову швидкість (2) наступним чином:

$$\vec{v} = \vec{\omega} \cdot \vec{r} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \omega & 0 & 0 \\ x & y & z \end{vmatrix} = -x\omega \vec{j} + y\omega \vec{k}. \quad (8)$$

Далі використаємо визначену у вигляді (8) кутову швидкість для обчислення електричного поля (4), що утворюється рухомих електричним зарядом у магнітному полі:

$$\vec{v} = (\vec{\omega} \cdot \vec{r}) \cdot \vec{B} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & -x\omega & y\omega \\ 0 & -B & 0 \end{vmatrix} = By\omega \vec{i}. \quad (9)$$

Отже, замість результату (9) матимемо такий вираз для електричного поля, що утворюється електричним зарядом, який рухається у магнітному полі (рис. 1):

$$\vec{E}_n = By\omega \vec{i}. \quad (10)$$

Одержаний вираз (10) визначає електричне поле, що утворюється вільним електричним зарядом провідника, що обертається навколо нерухомої осі та передбачений для визначення кутової швидкості. Обмотка ротора електромагнітного тахометра наспраді містить не один провідник, а багато провідників, які рухаються у зонішньому магнітному полі [5; 6]. Отже, сумарний ефект великої кількості провідників (10) призводитиме до такого результату:

$$\vec{E}_n = B_r \omega, \quad (11)$$

де B_r — характеристика тахометра, що враховує наявність великої кількості провідників в обмотці.

Як підтверджує співвідношення (11), обертання ротора (рис. 1) електромагнітного тахометра у спеціально створеному зонішньому магнітному полі буде призводити до виникнення електродвигової сили, величина якої пропорційна кутовій швидкості обертання ротора. Отже, якщо замкнути контакти обмотки ротора електромагнітного тахометра за допомогою вимірального резистора (рис. 1), то в результаті матимемо електричний струм I_m (рис. 1). При цьому, падіння напруги U_m на виміральному резисторі R_m (рис. 1) буде визначатися так:

$$U_m = I_m R_m, \quad (12)$$

де U_m — вимірювальна напруга тахометра, що містить інформацію про кутову швидкість;

R_m — штрихвальний резистор тахометра;

I_T — струм в еквівалентному ланцюзі тахометра.

Цілковито зрозуміло, що падіння напруги (12) буде певними чином залежати від кутової швидкості:

$$U_m = U_m(\omega) \quad (13)$$

Як слідчить співвідношення (13), за величиною вимірювальної напруги (12) можна встановити кутову швидкість. У загальному випадку маємо, вимірювану кутову швидкість, яка залежить від часу:

$$\omega = \omega(t), \quad (14)$$

де t — час.

Завдяки співвідношенням (13) та (14) матимемо, що вимірювальна напруга (12) буде представляти собою функцію часу:

$$U_m = U_m(t) \quad (15)$$

Саме у вигляді (15) маємо результати вимірювань кутової швидкості електромагнітним англо-рометром.

Математична модель процесів в електромагнітному тахометрі. Математична модель не є самоцілью, а лише засобом для розв'язання певної проблеми. У зв'язку з цим необхідність створення математичної моделі випливає з методології розв'язання проблеми, що обирається дослідником. Для вирішення складних проблем, звичайно, застосовують так звані системний похід, де моделювання є основним методом дослідження. Залежно від предметної області, що вивчається, від розв'язуваних проблем, від математичної підготовки дослідника і винос замовника математичної моделі можуть мати різні форми та способи представлення. У найпростішому випадку модель може бути однофакторною лінійною або нелінійною функцією з постійними числовими коефіцієнтами (параметрами моделі, що відображають внутрішній стан системи, котра вивчається) [7].

Процеси, що відбуваються в електромагнітному тахометрі під час проведення вимірювань кутової швидкості, характеризуються певними фізичними величинами, що змінюються протягом часу. З урахуванням цієї обставини математична модель процесів в електромагнітному тахометрі має бути представлена у вигляді звичайних диференціальних рівнянь з початковими умовами.

Як слідчить співвідношення (12), математична модель процесів в електромагнітному тахометрі протягом вимірювання кутової швидкості має визначати електричний струм I_T (рис. 2), який утворюється внаслідок обертання ротора тахометра [5; 6]. Отже, шукана величина має електричну природу, тому для моделювання процесів в електромагнітному тахометрі слід побудувати еквівалентну електричну схему тахометра. З урахуванням прийнятої схематизації

(рис. 1) та співвідношень (11) — (15), еквівалентна електрична схема тахометра може бути представлена, як показано на рис. 2. У запропонованій еквівалентній електричній схемі тахометра (рис. 2) враховано опір R_T обмотки ротора, індуктивність L_T обмотки ротора, наявність джерела електрорушійної сили E_m , котра відповідно до співвідношення (11) залежить від кутової швидкості (14) ротора, а також вимірювальний резистор R_m , на якому вимірюється електрична напруга (15), котра завдяки співвідношенням (12) містить інформацію (14) про вимірювану кутову швидкість. Саме за допомогою еквівалентної електричної схеми електромагнітного тахометра, що запропонована відповідно до рис. 2, досліджуватимемо електричні процеси, що відбуватимуться в тахометрі під час вимірювання кутової швидкості. Вплив вимірюваної кутової швидкості (14) на електричні процеси (рис. 2), що відбуваються в електромагнітному тахометрі, враховується через залежність (11), яка встановлює зв'язок електрорушійної сили з кутовою швидкістю (14) ротора.

Для побудови диференціального рівняння математичної моделі еквівалентної електричної схеми (рис. 2) електромагнітного тахометра використаємо відомі електромеханічні аналогії (табл. 1) та рівняння Лагранжа 2-го роду:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_k} + Q_k, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (16)$$

де n — кількість ступенів вільності системи;

q_1, q_2, \dots, q_n — узагальнені координати досліджуваної системи;

$\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n$ — узагальнені швидкості досліджуваної системи;

L — функція Лагранжа, що визначає різницю між кінетичною та потенційною енергією досліджуваної системи;

R — дисипативна функція Релея, котра характеризує сили в'язкого опору та дорівнює половині потужності сили в'язкого опору, що постійно залежить від швидкості;

Q_k — узагальнена сила, відповідна узагальненій координаті q_k .

У випадку досліджуваної еквівалентної електричної схеми (рис. 2) електромагнітного тахометра функція Лагранжа та дисипативна функція Релея із рівнянь Лагранжа 2-го роду (16) з урахуванням електромеханічних аналогій (таб. 1) матимуть такий вигляд:

$$L = \frac{1}{2} L_T I_T^2, \quad (17)$$

$$R = \frac{1}{2} R_T I_T^2, \quad (18)$$

де L_T — індуктивність обмотки ротора тахометра;

R_T — опір обмотки ротора тахометра;

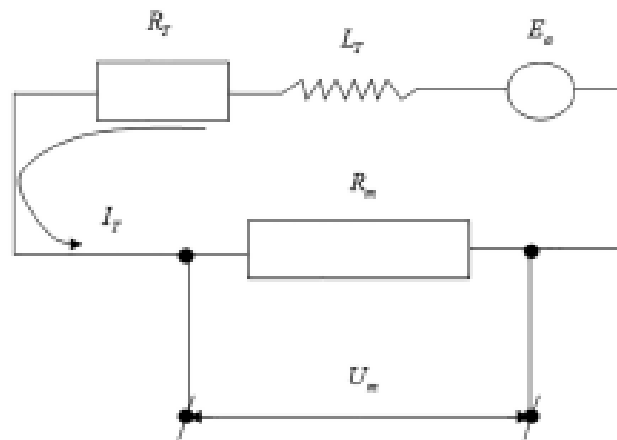


Рис. 2. Еквівалентна електрична схема електромагнітного тахометра

I_T — струм еквівалентного електричного ланцюга тахометра.

Використовувана під час моделювання процесів в електромагнітному тахометрі еквівалентна електрична схема (рис. 2) наспраді є системою з одним ступенем вільності, оскільки стан відповідного електричного ланцюга визначається лише одним параметром, а саме — електричним струмом I_m (рис. 2). Отже, будемо використовувати далі узагальнену координату, що вводить до розгляду наступним чином:

$$n = 1, \quad q_1 = q = \int I_m dt, \quad (19)$$

де $q_1 = q$ — узагальнена координата, що представляє електричний заряд еквівалентного електричного ланцюга тахометра.

Щоб визначити узагальнені сили, які містяться у рівняннях Лагранжа 2-го роду, обчислимо спочатку суму віртуальних робіт сил, які не є потенційними та дисипативними, або розглядаються окремо під них. У результаті матимемо:

$$\delta A = E_a \delta q_1, \quad (20)$$

де δq_1 — варіація електричного заряду в еквівалентному ланцюзі тахометра.

Звідки виразу (20) матимемо узагальнену силу еквівалентного електричного ланцюга електромагнітного тахометра (рис. 2), котра відповідає узагальненій координаті (19), у такому вигляді:

$$Q_1 = E_a \quad (21)$$

З урахуванням прийнятої у вигляді (19) узагальненої координати функція Лагранжа (17) та дисипативна функція Релея (18) набудуть такого вигляду:

$$L = \frac{1}{2} L_T \dot{q}_1^2, \quad (22)$$

$$R = \frac{1}{2} R_T \dot{q}_1^2 \quad (23)$$

Таким чином, для прийнятої узагальненої координати (19) та відповідній їй узагальненій силі (20), з урахуванням виразу (22) функції Лагранжа, виразу (23) дисипативної функції Релея, та співвідношення (11) рівняння Лагранжа 2-го роду (16) приведуть до такого результату:

$$L_T \ddot{q}_1 = -R_T \dot{q}_1 + E_a \omega(t) \quad (24)$$

Отже, завдяки отриманому результату (24), матимемо математичну модель процесів

Таблиця 1

Електромагнітні аналогії

Механічна величина	Електрична величина
Пороміщення, м	Заряд, К
Швидкість, м/с	Сила струму, А
Маса, кг	Індуктивність, Т
В'язкий опір, Ном	Активний опір, Ом
Потенціальність, мН	Ємність, Ф
Сила, Н	Напряга, В

в електромагнітному тахометрі (рис. 2), що відбуваються під час вимірювань кутової швидкості, у вигляді звичайного диференціального рівняння із початковою умовою

$$L_T \frac{dI_T}{dt} + R_T I_T = B_s \omega(t), I_T(0) = 0. \quad (25)$$

У вихідній умові (25) передбачається, що у початковий момент часу електричний струм в ексциляційному електричному ланцюзі електромагнітного тахометра дорівнює нулю, що дозволяє досліджувати перехідні процеси під час вимірювань тахометра. Хоча математична модель (25) дозволяє чисельно визначити процеси в електромагнітному тахометрі під час вимірювань кутової швидкості, але більш зручною є математична модель, яка сформульована відносно вимірної напруги (15). Для отримання такої моделі використаємо співвідношення (12), що дозволить отримати наступне:

$$I_T(t) = \frac{U_m(t)}{R_m}. \quad (26)$$

З урахуванням виразу (26) математична модель процесів в електромагнітному тахометрі під час вимірювань кутової швидкості набуде такого найбільш зручного вигляду:

$$\frac{L_T}{R_m} \frac{dU_m}{dt} + \frac{R_T}{R_m} U_m = B_s \omega(t), U_m(0) = 0. \quad (27)$$

Як свідчить математична модель (27), процеси, що відбуваються в електромагнітному тахометрі під час вимірювань кутової швидкості, можна представити у вигляді такого відображення:

$$\omega(t) \xrightarrow{w_T} U_m(t), \quad (28)$$

де w_T — відображення кутової швидкості у вимірну напругу тахометра.

Оскільки диференціальне рівняння математичної моделі (27) є лінійним, то відображення (28) зручно представляти у вигляді динамічної ланки, як показано на рис. 3. Передаточна функція динамічної ланки (рис. 3), що зв'язує вимірну напругу тахометра (15) та вимірну напругу (15) має такий вигляд:

$$w_T(S) = \frac{B_s R_m}{L_T S + R_T}, \quad (29)$$

де $w_T(S)$ — передаточна функція електромагнітного тахометра.

Таким чином, у вигляді (27) маємо зручну математичну модель процесів, які відбуваються в електромагнітному тахометрі під час вимірювань кутової

швидкості. Під час досліджень процесів в автоматизованих системах також зручно користуватися передаточною функцією (29), що узгоджується із підходами теорії автоматичного керування.

Вимірювання за допомогою тахометра. Як було показано вище, моделювання процесів в електромагнітному тахометрі зводиться до побудови відображення (28), в якому кутова швидкість (14) виступає як відома величина, а невідомою величиною є вимірною напруга (15). Водночас, процес вимірювання кутової швидкості електромагнітним тахометром з точки зору користувача підтримується від процесу моделювання тахометра. Дійсно, під час вимірювань за допомогою тахометра кутова швидкість (14) насправді є невідомою, а відомою є вимірною напруга (15). Отже, процес вимірювання кутової швидкості електромагнітним тахометром з точки зору користувача представляє собою відображення вимірною напруги (15) у відповідну їй кутову швидкість (14), яка має такий вигляд:

$$U_m(t) \xrightarrow{w_m} \omega(t), \quad (30)$$

де w_m — відображення вимірною напруги в кутову швидкість.

Побудова відображення (30) вимірною напруги (15) у відповідну їй кутову швидкість (14) здійснюється за допомогою диференціального рівняння математичної моделі (27), в якому невідомою кутову швидкість (14) слід визначати ліворуч, а відому вимірною напругу (15) — праворуч від знаку рівності:

$$\omega(t) = \frac{L_T}{B_s R_m} \frac{dU_m}{dt} + \frac{R_T}{B_s R_m} U_m. \quad (31)$$

Відображення (28), що визначається співвідношенням (31), в деяких випадках зручно представляти у вигляді динамічної ланки (рис. 4), що має таку передаточну функцію:

$$W_m(S) = \frac{L_T S + R_T}{B_s R_m}, \quad (32)$$

де $W_m(S)$ — передаточна функція вимірювання за допомогою електромагнітного тахометра.

Зрозуміло, що у випадку вимірною напруги (15), відомої у вигляді точно заданого аналітичного виразу залежності від часу визначення кутової швидкості за допомогою формули (31) не містять принципових труднощів та зводиться до диференціювання відомої функції. Водночас, під час вимірювань кутової швидкості за допомогою

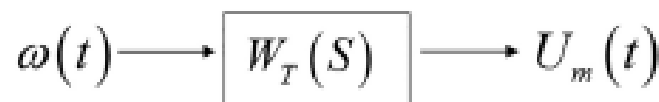


Рис. 3. Представлення електромагнітного тахометру у вигляді динамічної ланки

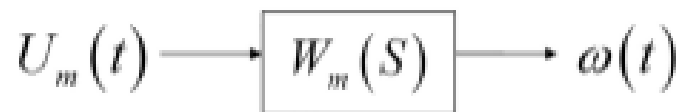


Рис. 4. Представлення вимірювань за допомогою електромагнітного тачометру у вигляді динамічної ланки

електромагнітного тачометра не маємо точно заданого аналітичного виразу, який би визначав нівірнуальну напругу (15), а маємо лише сигнал, який представляє таку напругу в аналоговій або цифровій формі. Зрозуміло, що такий сигнал природно міститиме похибки вимірювань, притаманні будь-якій нівірнуальній апаратурі, нівірнуальним приладам та пристроям. Відомо, що диференціювання наближено представленої функції є некоректним за Адамсом, тобто позначені похибки визначення функції призводять до теоретично нескінченних похибок визначення її похідних. Завдяки цьому, доданок у формулі (31), який містить похідну нівірнуальної напруги (15), буде збільшувати похибку, що міститься в сигналі (15) через обмежену точність вимірювань. З урахуванням цієї обставини, при визначенні кутової швидкості (14) за нівірнуальною напругою (15), зазначай, нахтують додати до формулі (31), що містить похідну нівірнуальної напруги (15), та визначення нівірнуваної кутової швидкості здійснюють наближено у вигляді

$$\omega(t) \approx \bar{\omega}(t), \quad \bar{\omega}(t) = \frac{1}{B_e R_m} U_m(t), \quad (33)$$

де $\bar{\omega}(t)$ — наближено визначена кутова швидкість.

Хоча формула (33) принципово є наближеною, на відміну від точної формули (31), але використання точної формули (31) у випадку сигналу нівірнуальної напруги (15), що містить похибки, буде призводити до більших похибок визначення кутової швидкості, ніж використання наближеної формули (33). Слід також зазначити, що оцінку кутової швидкості за наближеною формулою (33) зручно представляти у вигляді динамічної ланки (рис. 4) із наближено визначеною передаточною функцією

$$W_m(S) \approx \bar{W}_m(S), \quad \bar{W}_m(S) = \frac{1}{B_e R_m}, \quad (34)$$

де $\bar{W}_m(S)$ — наближена передаточна функція нівірнування за допомогою електромагнітного тачометра.

Вачимо, що використання наближеної формули (33) або динамічної ланки (рис. 4) із наближеною передаточною функцією (34) є досить зручним у практичному використанні, оскільки визначення кутової швидкості (13) зводиться до визначення множини нівірнуальної напруги (15) на відповідний коефіцієнт, який залежить від параметрів еквівалентного електричного ланцюга (рис. 2), що представляє

електромагнітний тачометр відповідно прийнятої схематизації (рис. 1). Зразком, слід розуміти, що використання наближеної формули (33) призводить до похибки визначення кутової швидкості (14) таким чином, що абсолютне значення цієї похибки буде таким:

$$\varepsilon(t) = \left| \omega(t) - \frac{1}{B_e R_m} U_m(t) \right|, \quad (35)$$

де $\varepsilon(t)$ — абсолютна похибка нівірнування кутової швидкості тачометром.

Завдяки результату (35) бачимо, що абсолютна похибка оцінювання кутової швидкості (14) за нівірнуальною напругою (15) залежатиме від вигляду функціональної залежності кутової швидкості (14). Зрозуміло, що вигляд залежності від часу (14) кутової швидкості визначається режимом експлуатації та особливостями будови технічної системи, в якій передбачення досліджуваній електромагнітний тачометр.

Висновки. Одним із негативних чинників, які можуть мати помітний вплив на результати нівірнування кутової швидкості (14) за допомогою електромагнітного тачометра, є високочастотні крутильні коливання, що супроводжують обертання навколо нерухокої осі твердих тіл внаслідок притаманного їм деформування. Якщо вплив таких високочастотних коливань на результати нівірнування кутової швидкості (14) електромагнітним тачометром будуть помітними, то це може непередбачувано вплинути на роботу систем автоматизації, в яких електромагнітний тачометр використовується як пристрій вимірювання для забезпечення формування коригування керування відповідно до принципу зворотного зв'язку. Зрозуміло, що за цих умов слід розуміти особливості нівірнування електромагнітними тачометрами кутової швидкості (14), що містить високочастотні крутильні складові. Крім того, крутильні коливання обмежують ресурс елементів конструкцій через накопичення пошкодження внаслідок втоми, тому досить важливою окремою задачею є нівірнування параметрів таких крутильних коливань за допомогою електромагнітних тачометрів. Дійсно, належна консервативна фіксація крутильних коливань протягом експлуатації дозволить оцінювати накопичені втомні пошкодження, що надасть можливостей для уникнення порушень нормальної експлуатації технічних систем, у тому числі важких аварій із значними збитками та впливом на навколишнє середовище.

Література

1. Bonert R. Design of a high performance tachometer with a microcontroller. *Instrumentation and Measurement*. 1989. Vol. 38. P. 1104–1108.
2. Das S. Contactless Speed Monitoring and Displaying. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2016. Vol. 3.
3. Tunggal T.P., Kirana L.A., Arfianto A.Z., Helmy E.T., Wasool F. The Design of Tachometer Contact and Non-Contact Using Microcontroller. *Journal of Robotics and Control*. 2020. Vol. 1, № 3. P. 972–981.
4. Бабак В.П., Хацарський В.С., Шроффер Е. Обробка сигналів : підручник. К. : Либідь, 1999. 392 с.
5. Бурштінський М.В., Хай М.В., Харченко В.М. Даначі. Львів : ТзОВ «Простір М», 2013. 184 с.
6. Кучарчук В.В., Кучарчук В.Ю., Володарський Є.Т., Грабко В.В. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник. Харків : Осві-плюс, 2013. 538 с.
7. Banerjee S., Raton B. *Mathematical Modeling: Models, Analysis and Applications*, 2nd Edition. FL: Chapman and Hall/CRC Press, Taylor & Francis Group, 2022, 433 p.

SCI-CONF.COM.UA

PERSPECTIVES OF CONTEMPORARY SCIENCE: THEORY AND PRACTICE



**PROCEEDINGS OF VII INTERNATIONAL
SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE
AUGUST 19-21, 2024**

**LVIV
2024**

PERSPECTIVES OF CONTEMPORARY SCIENCE: THEORY AND PRACTICE

Proceedings of VII International Scientific and Practical Conference

Lviv, Ukraine

19-21 August 2024

Lviv, Ukraine

2024

2

АКТ
ЧТОГ

34.	<i>Pundyk S., Karmalita A.</i>	162
	STATUS AND PROSPECTS OF THE DEVELOPMENT OF ROBOTIZATION IN THE FOOTWEAR INDUSTRY	
35.	<i>Sanieiev D., Allakhveranov R.</i>	166
	GENERAL INFORMATION ABOUT THE PRINCIPLES OF TACHOMETERS	
36.	<i>Артамонов Є. Б., Чабан С. А., Назорний Є. В.</i>	175
	ОСОБЛИВОСТІ ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ ОПОВІЩЕННЯ ПРО НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ	
37.	<i>Бабала Л. В., Данилюк І. В., Макушко М. М.</i>	180
	АНАЛІЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТОВАРНИМИ ЗАПАСАМИ НА ПРИКЛАДІ ПІДПРИЄМСТВА ТОВ "НОВА ПОШТА"	
38.	<i>Бабала Л. В., Данилюк І. В., Процько Р. А.</i>	183
	ПРОЄКТУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ДОТРИМАННЯ ВИМОГ БЕЗПЕКИ	
39.	<i>Бабала Л. В., Данилюк І. В., Бабівський Ю. І.</i>	186
	ПРОЄКТУВАННЯ ГІС АНАЛІЗУ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПОСТАЧАННЯ ТОВАРІВ ТМ АТБ ПО ТЕРНОПІЛЬЩИНІ	
40.	<i>Варданян А. О., Гараніна О. О., Редько Я. В., Романюк Є. О.</i>	190
	ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АНТИБАКТЕРІАЛЬНОЇ ОБРОБКИ НА РОЗРИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ТКАНИН ЗМІШАНОГО СКЛАДУ	
41.	<i>Воскобійник В.</i>	194
	ПУЛЬСАЦІЇ ПРИСТІННОГО ТИСКУ ТУРБУЛЕНТНОГО ПРИМЕЖОВОГО ШАРУ	
42.	<i>Кирисов І. Г., Гонтар І. В., Федченко-Галаган Є. С.</i>	201
	АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОВЕРХНІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	
43.	<i>Кирисов І. Г., Левченко М. І., Сук І. В., Хватова С. В.</i>	205
	ВПЛИВ МІКРОТРИЩИН НА ПОВЕРХНІ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ НА ЇХ ПАРАМЕТРИ	
44.	<i>Кобзев О. В., Носальський Д. В., Бацаєв Б. М., Дейнека Д. М.</i>	209
	СУЧАСНИЙ СТАН ВИРОБНИЦТВА СОДИ КАЛЬЦІНОВАНОЇ В УКРАЇНІ	
45.	<i>Кротюк О. І., Дворкін Л. Й.</i>	213
	ВПЛИВ АЛЮМІНАТНОЇ ФАЗИ, ТОНІНИ ПОМЕЛУ ТА ВМІСТУ ГПСУ НА ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ТАМПОНАЖНОГО ЦЕМЕНТУ	
46.	<i>Луценко Х. В., Роман А. І.</i>	220
	ПОЯСНЮЮЧИЙ ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ ЯК ЧАСТИНА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТРЕТЬОГО ПОКОЛІННЯ	
47.	<i>Скочинський Б. Д.</i>	228
	МОЖЛИВОСТІ ГЕЙМІФІКАЦІЇ НАВЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ	

GENERAL INFORMATION ABOUT THE PRINCIPLES OF TACHOMETERS

Sanieiev Denys,
master student

Allakhveranov Rauf,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Kharkiv National University of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine

Introduction. The concept of tachometers is vital to many industries. They are used to measure the speed of rotation of motors, machinery, and other rotating devices.

Tachometers can be of different types and function in different conditions. In this paper, we will look at the general principles of different types of tachometers:

- mechanical tachometers are used to measure the speed of rotation of engines and mechanisms. They work on the basis of mechanical contact with a rotating device. This can be a cable connected to the device or a mechanical sensor that detects rotation;

- electronic tachometers are used to measure the speed of rotation of engines and mechanisms. They work on the basis of electronic processing of signals coming from a speed sensor. Electronic tachometers can be analog or digital;

- optical tachometers are used to measure the speed of rotation of engines and mechanisms. They work on the basis of optical contact with a rotating device. This can be a laser sensor that detects reflected light or an optical sensor that detects changes in light flux;

- magnetic tachometers are used to measure the speed of rotation of motors and mechanisms. They work on the basis of magnetic contact with a rotating device. It can be a magnetic sensor that detects a magnetic field or a magnetic sensor that detects changes in the magnetic field;

– ultrasonic tachometers are used to measure the rotational speed of motors and machinery. They work based on measuring the time it takes for an ultrasonic signal to travel through a rotating device. Ultrasonic tachometers can be portable or stationary.

How tachometers work.

The principle of tachometers is based on the conversion of rotational speed into mechanical or electrical output signals. Accordingly, mechanical and electric tachometers are widely used. A mechanical tachometer is a simple portable device that is widely used to measure the speed of rotation [1, 2].

The physical quantity m that characterizes the object of measurement (temperature, pressure, etc.) is called the measured quantity. The set of operations involved in determining the numerical value of a physical quantity is the measurement process.

If electronic signal processing equipment is used during the measurement, it is first necessary to convert the measured parameter into an equivalent electrical value, and as accurately as possible.

This means that the resulting electrical value must contain all the information about the measured parameter [3].

In Fig. 1 shows an example of a change in the measured value m and the corresponding sensor response s .

A sensor is a device that, when exposed to a physical measured value, produces an equivalent signal, usually of an electrical nature (charge, current, voltage, or impedance), which is a function of the measured value:

$$s = F(m), \quad (1)$$

where s – output value of the sensor;

m – input value.

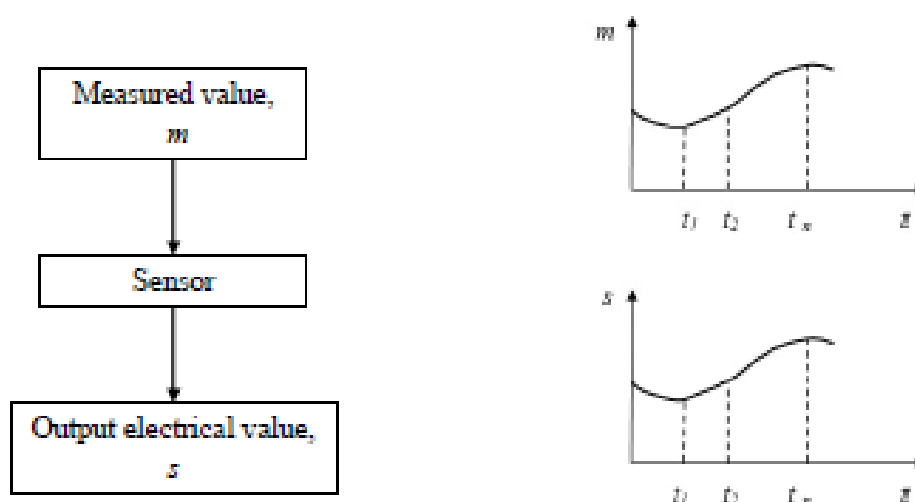
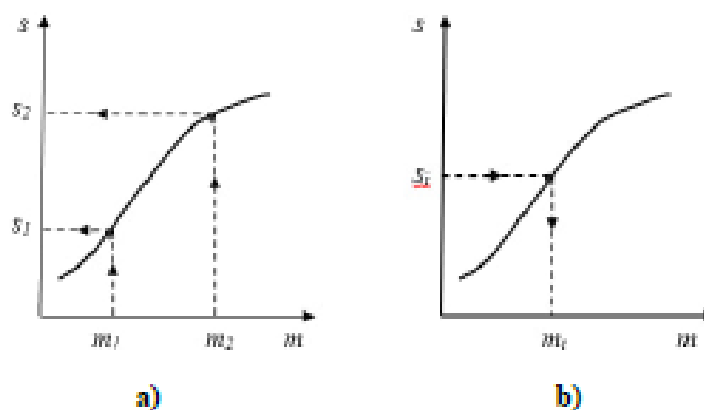


Fig. 1. An example of a change in the measured value m and the corresponding response of the sensor s

By measuring the value of s , you can determine the value of m (Fig. 2).



- a – obtaining a calibration curve from known values of the measured value m ;
 b – use of a graduation curve to determine m

Fig. 2. Graduation characteristics of the sensor

Relationship (1) expresses in a general theoretical form the physical laws underlying the operation of sensors. When expressed numerically, these laws determine the choice of structures (geometry and dimensions) and materials for their

manufacture, the permissible environmental characteristics under which the sensors can operate, and the conditions of use. For all sensors, the transformation characteristic – the relation (1) – is determined numerically as a result of calibration, during which the corresponding values of s are measured for a number of precisely known values of t , which allows you to build a calibration curve (Fig. 2, a). From this curve, for all the values of s obtained as a result of the measurement, the corresponding values of the desired value m can be found (Fig. 2, b) [3].

For the convenience of measurements, they try to build a sensor or at least use it in such a way that there is a linear relationship between a small increase in the output and input values:

$$\Delta s = S \Delta m, \quad (2)$$

where S – sensor sensitivity.

The most important problem in the design and use of a sensor is to ensure the stability of sensitivity, which should depend as little as possible on the values of m (determining the linearity of the transformation characteristic) and the frequency of their changes, on time, and on the influence of other physical quantities that characterize not the object itself but its environment (they are called quantities that affect the measurement results).

Depending on the type of signal, the sensor output can be equipped with an active generator that outputs a charge, voltage, or current, or a passive generator with an output resistance, inductance, or capacitance that varies according to the input value [4].

The difference between active and passive sensors is due to their equivalent electrical circuits, which reflect fundamental differences in the nature of the physical phenomena used in sensors [1, 2].

An electrical signal is a variable component of a current or voltage that carries information related to the measured quantity; the amplitude and frequency of the signal must be directly related to the amplitude and frequency of the measured

quantity. The active sensor is the source of the output electrical signal, and the measurement of changes in the impedance parameters of the passive sensor is carried out indirectly, changes in current or voltage as a result of its mandatory inclusion in a circuit with an external power supply. The electrical circuit is directly connected to the passive sensor, it generates its signal, and thus the set of sensors of this electrical circuit is a source of an electrical signal [2, 5].

In industry, speed measurement is mostly limited to measuring the rotational speeds of rotating parts and assemblies when they have to be monitored for safety reasons or to ensure that they operate in the desired mode. In the case of straight-line motion, speed measurement can often be reduced to measuring rotational speed. Therefore, tachometric sensors are predominantly angular velocity sensors [1, 3].

Industrial sensors designed specifically for speed measurement are based on Faraday's law:

$$e = -d\varphi / dt, \quad (3)$$

from which it follows that the magnetic flux crossing the contour is described by a function of the form:

$$\varphi(x) = \varphi_0 F(x), \quad (4)$$

where x – linear or angular position variable.

Therefore, any relative displacement between the flow source (inductor) and the circuit induces an electromotive force in the latter, the amplitude of which is proportional to the displacement speed, resulting in a signal at the output of such a sensor:

$$e = -\varphi_0 \left(\frac{dF(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \right). \quad (5)$$

This type of tachometry is called electrodynamic.

When a moving body under study performs periodic motion, such as rotation, the determination of its speed can be replaced by frequency measurement: for example, a proximity sensor located near an object whose distance to the object changes periodically emits a signal whose frequency is equal to or a multiple of the object's frequency of motion, depending on the object's configuration. For example, to measure the angular velocity of a rotating shaft, you can use a disk mounted on it, equipped with alternating transparent and opaque parts, which, during rotation, will interrupt the flow of rays recorded by an optical detector.

Thus, a sequence of electrical pulses with a frequency proportional to the speed will be generated. Tachometers of this type are called pulse tachometers [4].

In the case of too slow rotation, for example, less than one degree per hour, the methods described above become inapplicable, in which case the speed measurement can be effectively performed by a laser gyrometer [5].

The principle of its operation is based on the existence of a difference in the travel time of two waves emitted by the same laser propagating in opposite directions in the same rotating medium. This difference in travel time, proportional to the angular velocity, is detected by an interferometer.

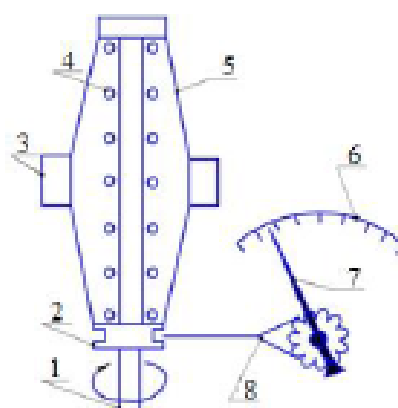
Relationships that combine velocity and position, on the one hand, and velocity and acceleration, on the other, allow velocity to be determined by processing the sensor signals of each of these two quantities.

The time derivative of the analog position sensor signal determines the velocity value. However, this method is associated with the appearance of interference (for example, due to the discreteness of the wire potentiometer) and an increase in high-frequency noise.

Integrating the acceleration sensor signal is another method of determining speed; used in navigation, it requires sophisticated equipment (inertial platform).

Consider the principle of operation of a mechanical tachometer.

Two weights with equal masses are placed on flat springs, which are attached to a rotating shaft at one end and to a sliding sleeve at the other (Fig. 3).



1 – drive roller; 2 – sliding clutch; 3 – load; 4 – cylindrical spring;
5 – flat spring; 6 – scale; 7 – arrow; 8 – drive mechanism

Fig. 3. Mechanical tachometer

The sliding bushing is connected to the indicating arrow on the instrument via a toothed sector. Changing the shaft speed causes a change in the centrifugal force of the weights, which is balanced by the compression force of the cylindrical and flat springs during the sliding sleeve movement. The movement of the sliding sleeve is proportional to the change in rotational speed and is recorded on the scale of the device, which is graduated in units of rotational speed.

Foucault sensors. This type of sensor is used when the rotating body is metal, but not ferromagnetic. The coil, which is the sensing element, forms the inductance of the resonant circuit of a sinusoidal oscillator. When a metal conductor approaches, the coil's L and R characteristics change, resulting in the generation being stopped. When each tooth of the rotating gear passes in front of the coil, the oscillation is interrupted, which is detected, for example, by a change in the generator supply current. The frequency of the corresponding signal is proportional to the rotational speed, the amplitude of which depends on the latter, since it is not determined in this case by Faraday's law. Hence, this type of sensor has no dead band and is therefore suitable for measuring very low speeds [5].

Optical tachometer. In its simplest form, it consists of a light source and an optical receiver, such as a photodiode or phototransistor.

The rotating body is either provided with reflective marks arranged regularly around the circumference, on which the light beam is directed, or connected to a disk with alternately transparent and opaque sectors that are placed between the light source and the receiver. Receiving a flux modulated by abrupt changes in reflection or transmission, the photodetector outputs an electrical signal with a frequency proportional to the rotational speed and an amplitude that does not depend on this speed. The range of measured velocities depends, on the one hand, on the number of jumps in optical properties (risks, slits, transparent sectors applied to a disk or rotating body), and on the other hand, on the bandwidth of the receiver and associated electrical circuits. For measurements of low speeds, for example, disks with a large number of slits (from 500 to several thousand) are used; in measurements of high speeds in the case of ultracentrifuges, the disk has only one slit, and the maximum measurement speed is determined by the upper limit frequency of the electrical circuit. Use of a disk with two tracks offset by a quarter of the space period (optical incremental generator, allows determining the direction of rotation) [6].

Conclusions. This paper discusses the general principles of operation and use of different types of tachometers. Each type has its own advantages and disadvantages, and the choice of tachometer depends on the specific conditions of use. It is important to remember that tachometers are essential tools for ensuring safety and efficiency in various industries.

REFERENCES

1. Бурштінський М. В., Хай М. В., Харчишин Б. М. Давачі. – Львів: ТзОВ «Простір М», 2013. – 184 с.
2. Бабак В. П. Обробка сигналів: Підручник // В. П. Бабак, В. С. Хандельський, Е. Шрюфер. – К.: Либіль, 1999. – 392 с.
3. Кухарчук В. В. Основи метрології та електричних вимірювань: Підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.

4. R. Bonert. Design of a high performance digital tachometer with a microcontroller // *Instrumentation and Measurement*, Volume 38, 1989. pp. 1104-1108
5. S. Das. Contactless Speed Monitoring and Displaying // *International Research Journal of Engineering and Technology*, Volume 3, 2016.
6. *Tatiya Padang Tunggal, Lailicia Anggi Kirana, Afif Zuhri Arfianto, Elsayed T.Helmy, Farhad Waseel*. The Design of Tachometer Contact and Non-Contact Using Microcontroller // *Journal of Robotics and Control (JRC)*, Volume 1, №3 (2020) pp. 972 – 981, ISSN 2715-5072

Додаток Д
Демонстраційний матеріал

