

УДК 621.924.7

<sup>1</sup>ПАВЛЕНКО В. М., <sup>2</sup>КУРЛЯК П. О., <sup>1</sup>ВОЛЯНИК О. Ю.

<sup>1</sup> Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

<sup>2</sup> Івано-Франківський національний університет нафти і газу, Україна

## ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМАМИ ЗІ ЗМІННИМ ДИСБАЛАНСОМ

**Мета.** Проведення аналітичного та експериментального дослідження, розробка системи керування механізмами зі змінним дисбалансом. Дослідження режимів роботи, перевірка алгоритму роботи та визначення стійких станів незбалансованої мехатронної системи. Визначення залежностей, які описують характер впливу навантаження на робочі органи.

**Методика.** Використані методи математичного моделювання мехатронних систем методом побудови Bond Graph, алгоритмічного проєктування, експериментального дослідження зі збором даних.

**Результати.** Проведено аналітичний огляд природи утворення та методів боротьби з дисбалансом у нестабільних мехатронних системах, розроблено та запропоновано систему автоматичного керування балансуванням роторів за допомогою цифрових моніторів у центрифугах зі змінним дисбалансом. Система керування включає мікроконтролер, датчик Холла, BondGraph модель для моделювання роботи асинхронного двигуна. Розроблено алгоритм для керуючої програми, яка, відповідно до встановлених параметрів, перевіряє номінальне та критичне значення струму у приводі центрифуги. При цьому, значення струму фіксується і ведеться моніторинг коливань. У разі збільшення струму система знижує оберти на 10% для зменшення амплітуди коливань в перехідних режимах її обертання, продовжуючи при цьому контролювати допустиму межу струму і навантаження на двигун.

**Наукова новизна.** Проведено аналіз аспектів виникнення та дослідження регулювання незбалансованих систем. Запропоновано структурну схему системи керування роторними механізмами із застосуванням засобів цифрового моніторингу. Розроблено алгоритм керування системою. Проведено дослідження нестабільних станів із застосуванням методів комп'ютерного моделювання BondGraph.

**Практична значимість.** У результаті проведеного аналітичного дослідження було розглянуто явище дисбалансу в мехатронних системах. Спроектовано та реалізовано експериментальну модель для керування дисбалансом у роторних відцентрових механізмах. Отримані результати та висновки можуть бути використані при проєктуванні відцентрових машин у різних галузях промисловості.

**Ключові слова:** система керування дисбалансом; вібрації; BondGraph; балансування.

**Вступ.** Розглядаючи проблему балансування систем, варто зазначити, що розвиток сучасних методів керування надає широкі можливості для дослідження нестійких станів і пов'язаних з ними проблем [1]. Рівень дисбалансу ротора, який є допустимим на низькій швидкості, може бути неприпустимим на більш високій швидкості, оскільки відцентрова сила, викликана дисбалансом, може бути поєднана з пружною деформацією ротора. Дисбаланс у системі, що обертається, може мати руйнівні наслідки під час запуску, уповільнення або під час роботи на критичній частоті, або на такій, що наближена до неї [2].

В процесі розгону або гальмування з'являються коливання з великими амплітудами при проходженні через резонанс [3]. Їх спричиняє розбалансування центрифуг, в результаті чого руйнуються конструктивні елементи роторів.

У всіх конструкціях діють сили, що виникають внаслідок звичайних робочих процесів, і такі сили, як правило, також залежать від підходів до керування. Тому розробка нових або модернізація існуючих систем керування з покращеними характеристиками та параметрами є

основою до розрахунків для працездатності та довговічності елементів конструкцій побутових та промислових центрифуг [4].

**Постановка завдання.** З метою подовження терміну служби опорних підшипників у центрифугах необхідно розробити власну систему керування приводом такої відцентрової машини, яка б унеможливила її перехід в режим дисбалансу. Одним з перспективних шляхів удосконалення процесу є регулювання кількості обертів після досягнення першої критичної швидкості обертання, при якій відбувається розбалансування. Сигнал можна отримати за допомогою датчика струму, підключеного до джерела живлення, що дає можливість зменшити вібрації на валу з мінімальними змінами в конструкції центрифуг.

В результаті руху деталей зі змінною швидкістю на них діють інерційні сили, які викликають появу додаткових динамічних навантажень на елементи з'єднання і підшипникові опори. Ці навантаження є джерелом інших механічних напружень, які викликають підвищене зношування окремих деталей і складальних одиниць, коливання і вібрації. Припустимо, що амплітуда цих коливань досить велика, що відбувається в області частот, близьких до резонансу. Тоді виникаючі напруження можуть зруйнувати підшипникові опори і підвіски центрифуг [5].

**Результати дослідження.** Для вирішення поставленої задачі було розроблено комп'ютерно-інтегровану систему для керування врівноваженням роторів центрифуг зі змінним дисбалансом. На рис. 1 показано структурну схему розробленої системи, яка побудована на базі приводу вертикальної центрифуги.

Досліджувана система складається з двигуна Д, центрифуги Ц, датчика струму ДС, датчика Холла ДХ, мікроконтролера МК, блоку комунікації БК, силового блоку СБ, блоку живлення БЖ.

Датчик струму і датчик Холла встановлені на приводі двигуна, який посиляє сигнали на мікроконтролер, в який завантажена програма управління.

Блок живлення був обраний з урахуванням запасу по струму і має такі характеристики: напруга – 12 В, струм – 5 А. Оскільки він працює в імпульсному режимі, то під час роботи може давати на виході сигнал з шумами, тому довелося додатково встановити конденсатори-фільтри 4700 мкФ х 25 В і 220 нФ х 25 В.

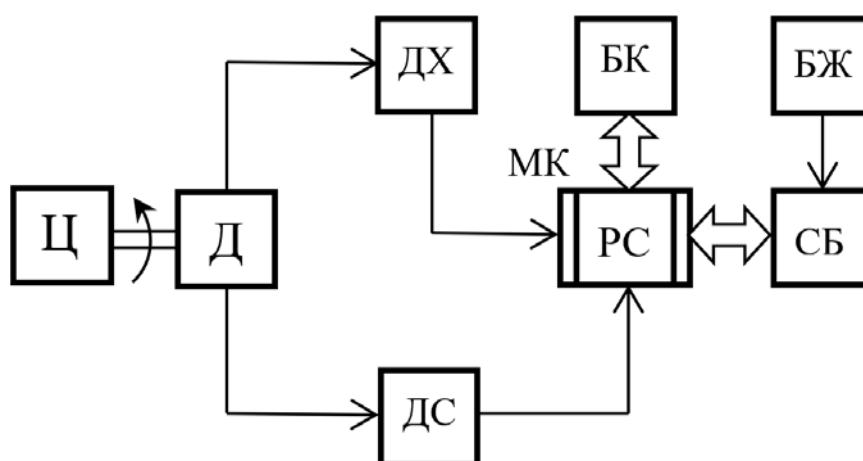


Рис. 1. Структурна схема системи керування балансуванням роторів

Мікроконтролер (АТmega328) з периферійними пристроями та датчиками і підключені через окремий лінійний стабілізатор, вихідна напруга становить 5 В, а струм – 0,8 А. Двигун і блок живлення підключені до основної лінії живлення. Комунікаційний блок має окремий роз'єм USB type B для передачі даних на ПК.

Після подачі живлення система починає працювати відповідно до заданого алгоритму роботи, показаного на рис. 2.

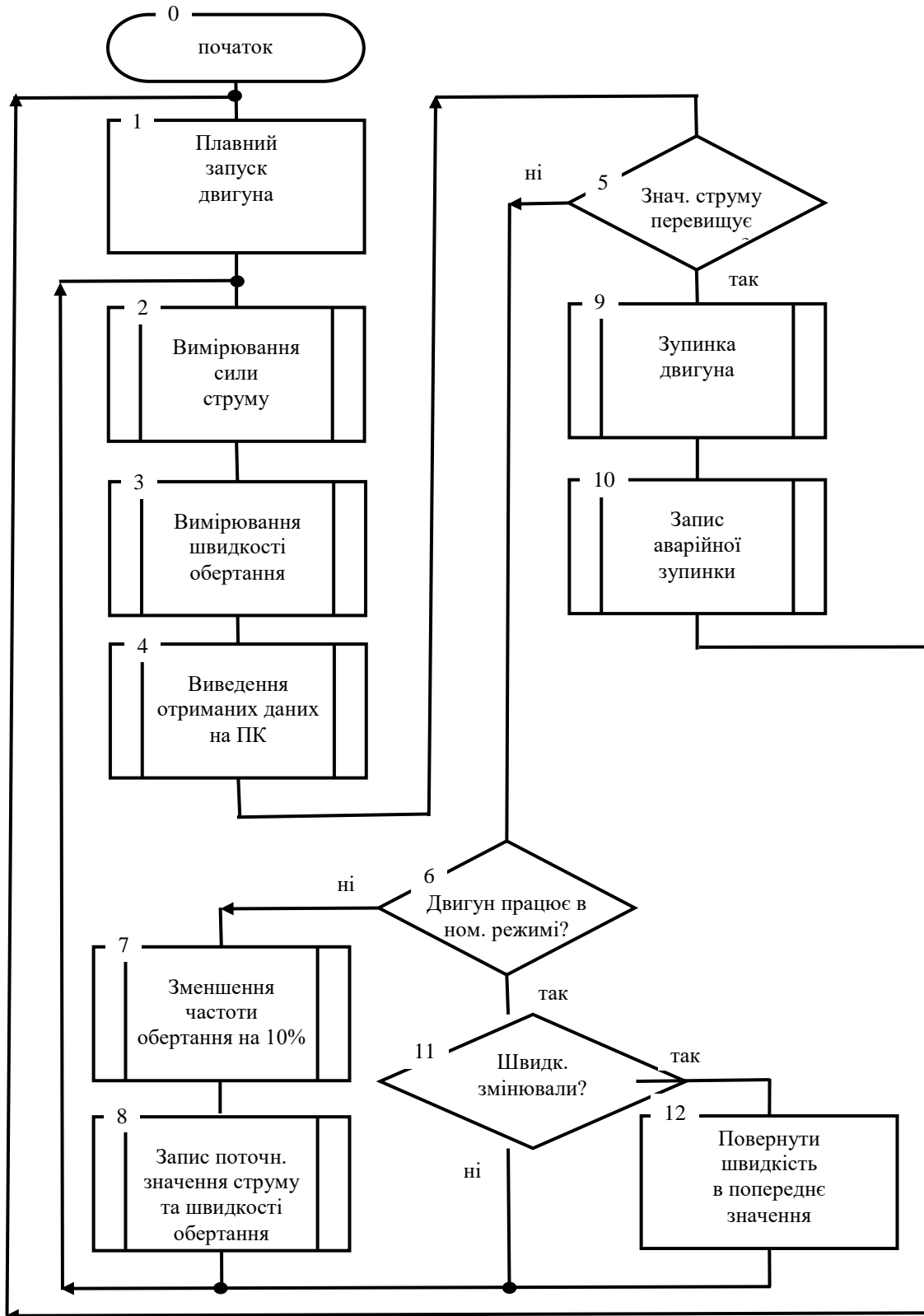


Рис. 2. Спрощена блок-схема системи керування

Електрообладнання складається з колекторного двигуна постійного струму МА-40, датчика струму, датчика Холла, мікроконтролера АТmega328, вольтметра, амперметра, лінійного стабілізатора напруги, польового транзистора IRF44N, динаміка та елементів кріплення.

Система активується шляхом підключення зовнішнього джерела живлення з напругою 12 В. Потім, завдяки стабілізатору, напруга знижується до 5 В і живить мікроконтролер та периферійні пристрої. Динамік необхідний для сигналізації наявності процесу перевантаження, а також виходу з нього. Вольтметр і амперметр встановлені для перевірки точності показань датчиків під час експлуатації та експериментального дослідження системи. Мікроконтролер працює на частоті 16 МГц від зовнішнього кварцового резонатора. Датчик Холла підключений до порту PD2 мікроконтролера. Датчик струму видає аналоговий сигнал, і він підключений до аналогового порту МК. Далі система обробляє цифрові дані, отримані через АЦП. Польовий транзистор IRF44N керує двигуном за допомогою ШІМ.

При запуску двигуна привід центрифуги має повільний запуск з попередньою перевіркою струму на заклинювання центрифуги. Потім дані, зібрані з датчиків, використовуються контролером для аналізу процесу і передаються на ПК. Далі відбувається перевірка номінального і критичного значення струму, а також запис їх поточних значень і контроль змін, що відбулися.

При виникненні зовнішнього навантаження струм приводу центрифуги починає збільшуватися, система автоматично скидає обороти на 10% для зменшення дисбалансу центрифуги. Якщо струм продовжує зростати після декількох послідовних скидань, перевіряється критичне значення струму, і якщо воно перевищено, двигун зупиняється. Коли значення струму знижується до допустимої межі, двигун починає повільний запуск і переходить в робочий режим.

Для моделювання режимів роботи двигуна центрифуги використано комп'ютерну Bond Graph модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором [6], [7].

Структура Bond Graph моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором містить трифазну обмотку статора, яка живиться від симетричного джерела синусоїдальної напруги  $u_a, u_b, u_c$ .

$$\begin{aligned} u_a &= U_m \sin(\omega t); \\ u_b &= U_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); \\ u_c &= U_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}). \end{aligned} \quad (1)$$

З метою зменшення кількості диференціальних рівнянь модель розроблено у двофазній системі координат  $\alpha\beta$ . Координатний перехід від трифазної системи a,b,c до двофазної системи  $\alpha\beta$  здійснюється за допомогою трансформаторних елементів TF1-TF5, двох 0- і двох 1-з'єднань (рис. 3) і виражається наступним чином:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{4\pi}{3} \\ \sin 0 & \sin \frac{2\pi}{3} & \sin \frac{4\pi}{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Процеси електромеханічного перетворення енергії в Bond Graph моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором описуються системою диференціальних рівнянь балансу напруг за другим законом Кірхгофа (3), рівнянням електромагнітного моменту двигуна за законом Ленца (4), та рівнянням руху електропривода (5)

$$\begin{cases} u_{\alpha}^s = R_{\alpha}^s i_{\alpha}^s + L_{\alpha}^s \frac{di_{\alpha}^s}{dt} + M \frac{di_{\alpha}^r}{dt}, \\ u_{\beta}^s = R_{\beta}^s i_{\beta}^s + L_{\beta}^s \frac{di_{\beta}^s}{dt} + M \frac{di_{\beta}^r}{dt}, \\ 0 = R_{\alpha}^r i_{\alpha}^r + L_{\alpha}^r \frac{di_{\alpha}^r}{dt} + M \frac{di_{\alpha}^s}{dt} + \omega^r (L_{\beta}^r i_{\beta}^r + M i_{\beta}^s), \\ 0 = R_{\beta}^r i_{\beta}^r + L_{\beta}^r \frac{di_{\beta}^r}{dt} + M \frac{di_{\beta}^s}{dt} - \omega^r (L_{\alpha}^r i_{\alpha}^r + M i_{\alpha}^s); \end{cases} \quad (3)$$

$$T_e = p [i_{\alpha}^r (M i_{\beta}^s + L^r i_{\beta}^r) - i_{\beta}^r (M i_{\alpha}^s + L^r i_{\alpha}^r)] \quad (4)$$

$$T_e = J \frac{d\omega^r}{dt} + c\omega^r + T_L \quad (5)$$

де  $u_{\alpha}^s, u_{\beta}^s$  –  $\alpha, \beta$  складові напруги обмоток статора;  $i_{\alpha}^s, i_{\beta}^s, i_{\alpha}^r, i_{\beta}^r$  –  $\alpha, \beta$  складові струму в обмотках статора і ротора;  $R_{\alpha}^s, R_{\beta}^s, R_{\alpha}^r, R_{\beta}^r$  – активні опори обмоток статора і ротора;  $L_{\alpha}^s, L_{\beta}^s, L_{\alpha}^r, L_{\beta}^r$  – повні індуктивності обмоток статора і ротора;  $\omega^r$  – кутова швидкість обертання ротора;  $T_e$  – електромагнітний момент двигуна;  $p$  – кількість пар полюсів;  $J$  – момент інерції ротора двигуна;  $M$  – взаємна індуктивність;  $c$  – коефіцієнт тертя валу в підшипниках;  $T_L$  – момент навантаження на валу.

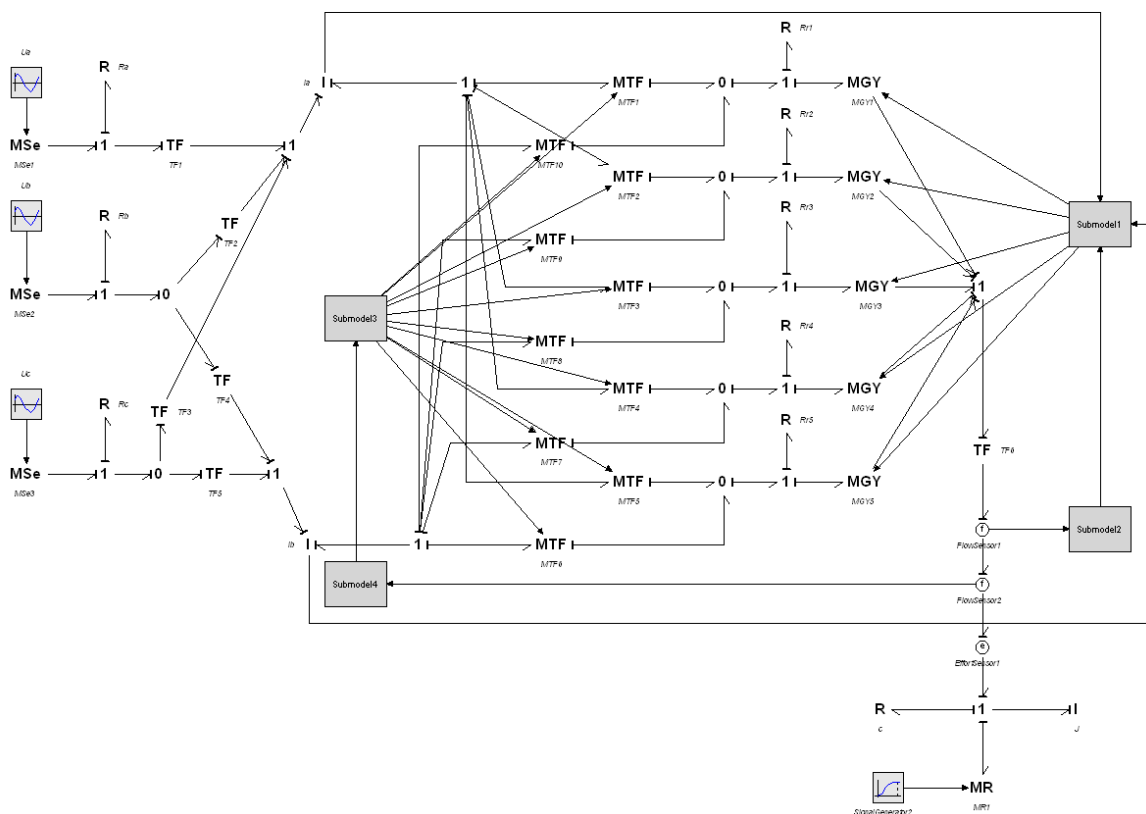


Рис. 3. Модель Bond Graph асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Електромагнітна взаємодія між статором і ротором здійснюється за допомогою поточкозчеплення  $\psi$ , яке в моделі Bond Graph асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором виражається через індуктивності  $I_{\alpha}, I_{\beta}$ :

$$\begin{cases} \psi_{\alpha}^s = L_{\alpha}^s i_{\alpha}^s + M i_{\alpha}^r, \\ \psi_{\beta}^s = L_{\beta}^s i_{\beta}^s + M i_{\beta}^r, \\ \psi_{\alpha}^r = M i_{\alpha}^s + L_{\alpha}^r i_{\alpha}^r, \\ \psi_{\beta}^r = M i_{\beta}^s + L_{\beta}^r i_{\beta}^r, \end{cases} \quad (6)$$

де  $\psi_{\alpha}^s, \psi_{\beta}^s, \psi_{\alpha}^r, \psi_{\beta}^r$  –  $\alpha, \beta$  складові потокозчеплення обмоток статора і ротора.

Кількість стрижнів короткозамкнутого ротора залежить головним чином від потужності та габаритів двигуна. Для двигуна центрифуги в моделі Bond Graph ми розглядаємо короткозамкнений ротор, що містить п'ять стрижнів з активними опорами R1-R5. Кожен стрижень з'єднаний на кінцях поворотними кільцями. Струми, індуковані обертовим магнітним полем, проходять через кожен стрижень і замикаються на кільцях. Таким чином, п'ять струмів ротора протікають у п'яти стрижнях, що відображено на графіку зв'язків моделі. Враховуючи, що під час роботи двигуна ротор обертається, струми в кожному стрижні залежать від його кутового положення  $\theta$  відносно статора. Залежність струмів у стрижнях ротора від складових струмів  $\alpha, \beta$ :

$$i_k^r = m \begin{bmatrix} i_{\alpha}^r \cos \left( \theta + \frac{2(k-1)\pi}{n} \right) + \\ + i_{\beta}^r \sin \left( \theta + \frac{2(k-1)\pi}{n} \right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

де  $m = \sqrt{\frac{2}{n}}$ ;  $n$  – кількість стержнів ротора;  $k = 1, 2, \dots, n$ .

На Bond Graph моделі асинхронного двигуна співвідношення (7) представлено двома 1- з'єднаннями  $(i_{\alpha}^r, i_{\beta}^r)$ , а трансформатори MTF1-MTF10 з модульованими коефіцієнтами трансформації, розрахованими в Submodel3, відповідають виразам:

$$\begin{aligned} t_k &= m \cos \left( \theta + \frac{2(k-1)\pi}{n} \right) \\ t_{k+n} &= m \sin \left( \theta + \frac{2(k-1)\pi}{n} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

та 0- з'єднаннями, на яких узагальнюються струми ротора вздовж осей  $\alpha, \beta$ :

$$\begin{aligned} \psi_{\alpha}^r + t_1 \psi_1 + t_2 \psi_2 + t_3 \psi_3 + t_4 \psi_4 + t_5 \psi_5 &= 0 \\ \psi_{\beta}^r + t_6 \psi_6 + t_7 \psi_7 + t_8 \psi_8 + t_9 \psi_9 + t_{10} \psi_{10} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Рівняння струмів ротора в матричній формі:

$$\begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \\ i_{r4} \\ i_{r5} \end{bmatrix} = m \times \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{5} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{5} \right) \\ \cos \left( \theta + \frac{4\pi}{5} \right) & \sin \left( \theta + \frac{4\pi}{5} \right) \\ \cos \left( \theta + \frac{6\pi}{5} \right) & \sin \left( \theta + \frac{6\pi}{5} \right) \\ \cos \left( \theta + \frac{8\pi}{5} \right) & \sin \left( \theta + \frac{8\pi}{5} \right) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{\alpha}^r \\ i_{\beta}^r \end{bmatrix} \quad (10)$$

Обертний електромагнітний момент двигуна з урахуванням струмів ротора дорівнює:

$$T_e = \sum_{k=1}^n T_k = \frac{p}{2} \sum_{k=1}^n m \cdot \begin{bmatrix} \psi_{\beta}^r \cos\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) - \\ -\psi_{\alpha}^r \sin\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) \end{bmatrix} \quad (11)$$

У моделі Bond Graph співвідношення (11) представлено MGY1-MGY5 з модульованими коефіцієнтами (Submodel1), які відповідають виразу:

$$r_k = m \cdot \begin{bmatrix} \psi_{\beta}^r \cos\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) - \\ -\psi_{\alpha}^r \sin\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Навантажувальний момент на валу  $T_L$  на Bond Graph (рис. 3) формується активним опором  $R_{\text{навант}}$ , який відображає передачу механічної енергії від двигуна до приводного механізму. Значення цього опору для номінального навантаження з короткозамкненим ротором визначається зі співвідношення:

$$R_{\text{навант}} = \frac{P_n}{(\omega_n^r)^2} \quad (13)$$

де  $P_n$ ,  $\omega_n^r$  – потужність і кутова швидкість обертання валу при номінальному навантаженні двигуна.

За допомогою цієї моделі та програми 20-sim 4.0 Professional було проведено дослідження пускових режимів роботи при номінальному навантаженні центрифуги. На рис. 4–5 наведено результати моделювання. Зокрема, на рис. 4 – залежності фазного струму статора  $i_a^s = f(t)$  та індукованого струму в обмотці ротора  $i_1^r = f(t)$ . Отримані криві фазних струмів статора і ротора підпорядковані відомому співвідношенню частот цих струмів від ковзання –  $f_2 = f_1 s$ . На рис. 5 – залежності зміни моменту  $T_e = f(t)$  і кутової швидкості  $\omega = f(t)$  під час пуску двигуна за номінального навантаження на валу.

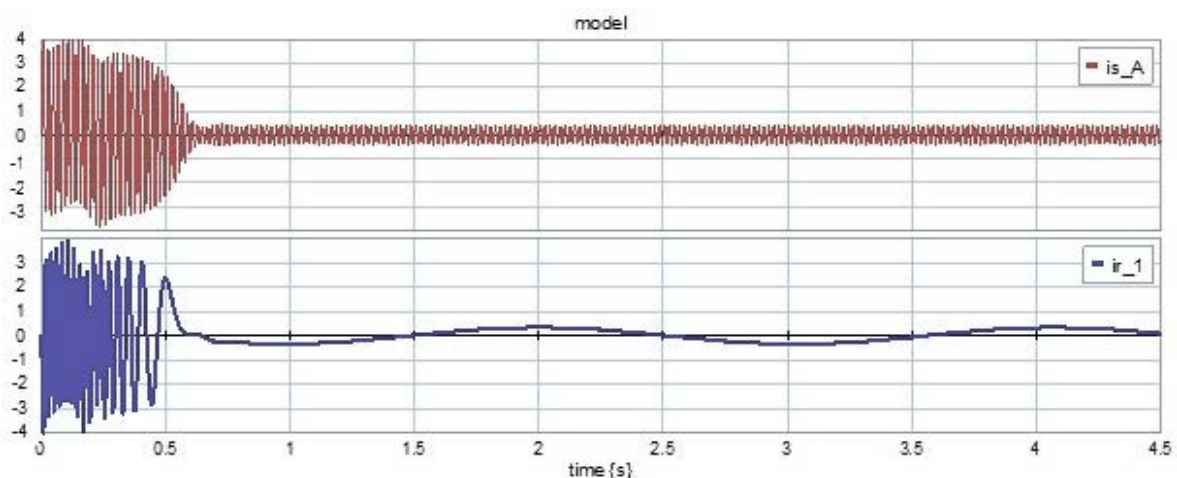


Рис. 4. Залежності зміни фазного струму статора  $i_a^s$  та індукованого струму в обмотці ротора  $i_1^r$  під час пуску двигуна

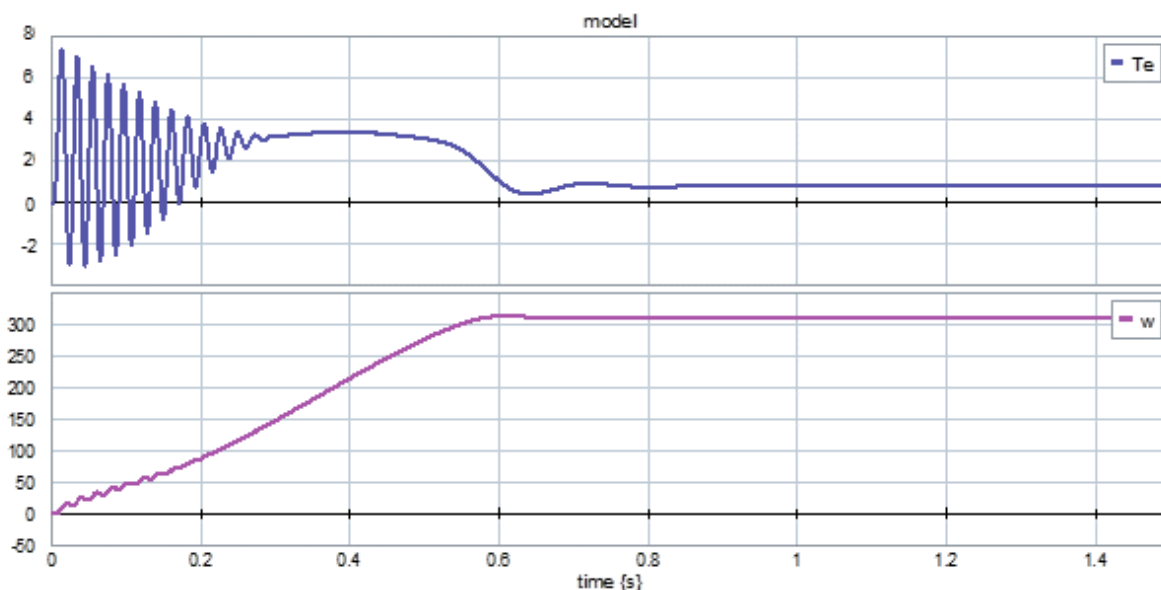


Рис. 5. Залежності крутного моменту  $T_e$  та кутової швидкості  $\omega$  під час запуску двигуна

Для дослідження роботи системи керування приводом центрифуги було проведено декілька експериментів: без навантаження, з навантаженням та в режимі дисбалансу.

На рис. 6 зображено лабораторний стенд, на якому реалізовано розроблену систему керування зрівноваженням роторів центрифуг зі змінним дисбалансом.

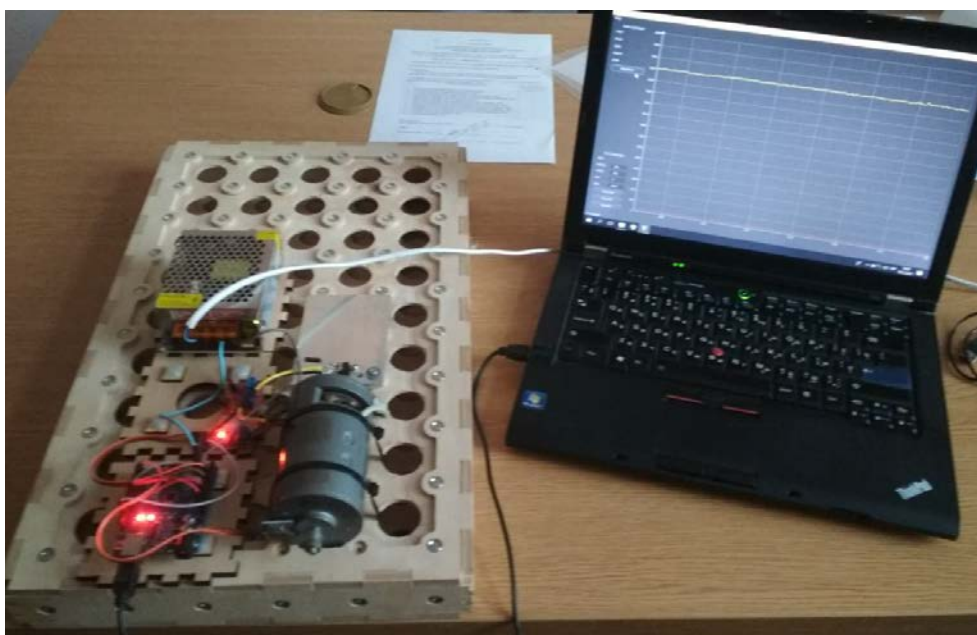


Рис. 6. Лабораторний стенд для дослідження приводу центрифуги

Значення струму при запуску – 2 А, а при виході на номінальний режим роботи – 0,9 А. Кількість обертів на номінальному режимі – 2800 об/хв.

На рис. 7 наведено результати дослідження роботи системи під впливом зовнішнього навантаження під час роботи. Після того, як привод вийшов на номінальний режим роботи (про що свідчить струм і швидкість його обертання), на вал почало діяти навантаження. У зв'язку з цим струм також почав зростати.

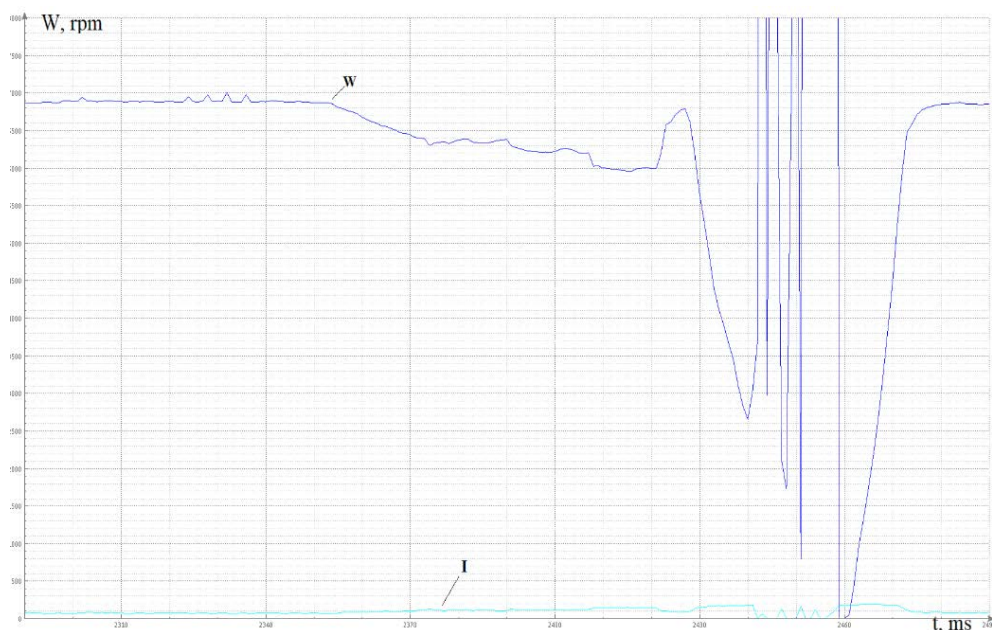


Рис. 7. Графік запуску приводу в режимі навантаження

В результаті система почала знижувати оберти, щоб поступово вийти на номінальний режим роботи. Однак навантаження продовжувало зростати, і відбулося гальмування двигуна. Потім відбувся повільний пуск приводу, і він вийшов на номінальний режим роботи. Оберти зросли до 2800 об/хв, струм – до 0,9 А.

Результати досліджень роботи системи керування в умовах дисбалансу наведені на рис. 8.

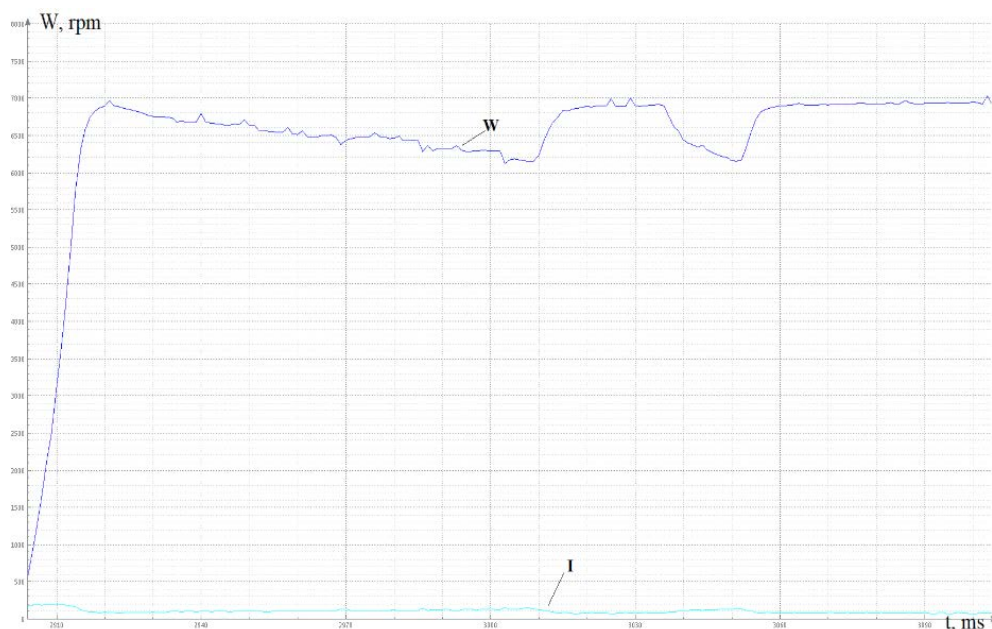


Рис. 8. Графік запуску системи та відпрацювання в умовах дисбалансу

Після запуску приводу центрифуги відбувається перевантаження. Система зменшує кількість обертів зі збільшенням струму. Ця дія повторюється двічі, після чого привод виходить на робочий режим. Максимальне значення струму під час перевантаження становить 1,5 А.

На рис. 9 наведено результати досліджень роботи системи в умовах розбалансування та при виникненні перевантаження. Розбалансування відбувається протягом 8 секунд. Після виходу приводу на номінальний режим роботи струм і оберти стабілізуються.

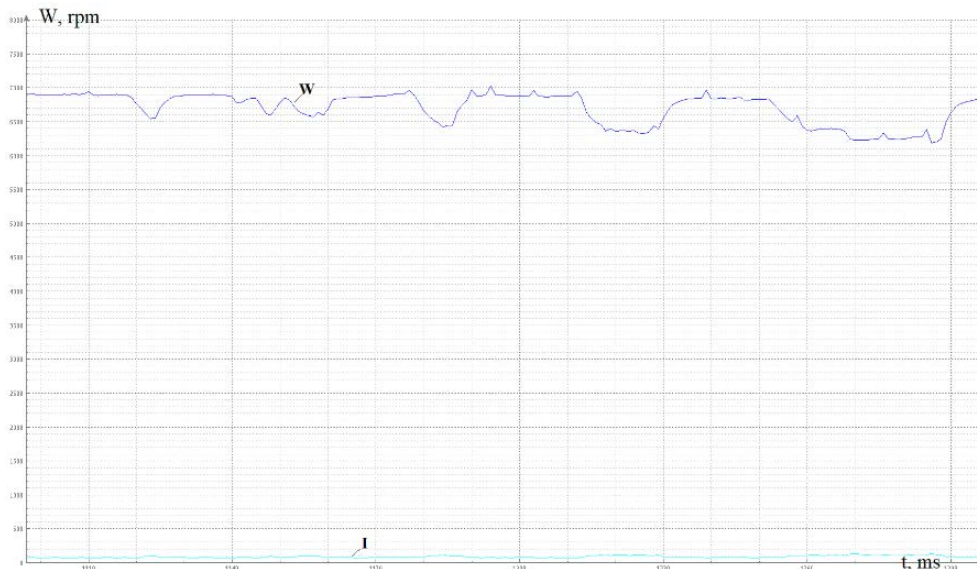


Рис. 9. Графік роботи системи в умовах дисбалансу

**Висновки.** Розроблена комп'ютерно-інтегрована система керування дозволяє стабілізувати роботу центрифуги в умовах дисбалансу. Одночасно зменшується негативний вплив вібрацій на елементи конструкції вертикальних центрифуг за рахунок підтримки кількості обертів на межі з першою критичною швидкістю. Ця дія особливо актуальна при зміні маси робочого тіла центрифуги.

Розроблений алгоритм системи керування зрівноваженням роторів центрифуг в режимі дисбалансу та перевантаження дозволяє поступово стабілізувати кількість обертів, що також унеможливує роботу приводу з перевантаженням, та подовжує період безаварійної роботи приводу.

Експериментальні дослідження системи керування на виготовленому лабораторному стенді підтвердили працездатність системи керування приводом центрифуги. Дослідження роботи системи керування приводом центрифуги показали високу стабільність роботи наведеного алгоритму, особливо в умовах розбалансування.

#### References

1. Li, L., Cao, S., Li, J., Nie, R., Hou, L. (2021). Review of Rotor Balancing Methods. *Machines*, 9(5):89.
2. Oke, W., Abido, M., Asafa, T. (2015). Mechanics & Industry Balancing of flexible rotors based on evolutionary algorithms. *Mechanics and Industry*.
3. Myklestad, N. (2018). Fundamentals of vibration analysis. Courier Dover Publications.
4. Burmistenkov, O. P., Pavlenko, V. M. (2017). Analitичне doslidzhennia pralnykh mashyn z tsentryfuhamy, shcho maiut vertykalnu vis obertannia [Analytical study of washing machines with centrifuges

#### Література

1. Li L., Cao S., Li J., Nie R., Hou L. Review of Rotor Balancing Methods. *Machines*. 2021. 9(5):89.
2. Oke W., Abido M., Asafa T. Mechanics & Industry Balancing of flexible rotors based on evolutionary algorithms. *Mechanics and Industry*. 2015.
3. Myklestad N. O. Fundamentals of vibration analysis. Courier Dover Publications, 2018.
4. Бурмістенков О. П., Павленко В. М. Аналітичне дослідження пральних машин з центрифугами, що мають вертикальну вісь обертання. *Мехатронні системи: інновації*

- having a vertical axis of rotation]. *Mekhatronni systemy: innovatsii ta inzhynirynh: Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia = International Scientific and Practical Conference* (June 15, 2017, Kyiv). Kyiv: KNUTD. P. 211–212 [in Ukrainian].
5. Volianyk, O., Gladchuk, O. (2019). Analiz kolyvalnykh protsesiv u vidtsentrovii barabannii pralnoi mashyni [Analysis of vibrational processes in a centrifugal drum washing machine]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dizainu. Seriia Tekhnichni nauky = Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design, Technical Sciences*, No. 3 (134), P. 18–25 [in Ukrainian].
6. Kostyshyn, V., Kurliak, P. (2011). Bond Graph model asynkronnoho dvyhuna z vrakhuvanniam nasychennia mahnitoprovodu ta efektu vytisnennia strumu v rotorі [Bond Graph model of an asynchronous motor with the saturation of the magnetic field and the effect of current displacement in the rotor]. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu = Scientific Bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, № 4 (30), P. 32–37 [in Ukrainian].
7. Kurliak, P. (2020). Application of bond graph method for study of dynamic behavior of electrotechnological complexes. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, Iss. 12, Part 1, P. 59–65.
8. Rodkin, D., Nozhenko, V., Bohatyrov, K. (2017). Electric drive operation modes of above resonance vibration machine. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, P. 140–143.
9. Volianyk, O. (2020). Doslidzhennia vzaiemodii robochykh orhaniv barabana vidtsentrovoy mashyny z obrobluваным materialom [Investigation of interaction of drum operation device of the centrifugal machine with the processed material]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dizainu. Seriia Tekhnichni nauky = Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design, Technical Sciences*, No. 5 (150), P. 14–23 [in Ukrainian].
10. Device for automatic balancing of central machines: pat. 153420 Ukraine, G01M 1/14, G01M 1/30, G01M 1/38. No. u202202982; announced on 08/17/2022; published on 07/05/2023, Bull. No. 27/2023
11. Borutzky, W. (2011). Bond graph modelling of engineering systems (Vol. 103). New York: Springer.
- та інжиніринг: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. (15 червня 2017 р., м. Київ). К.: КНУТД, 2017. С. 211–212.
5. Воляник О. Ю., Гладчук О. З. Аналіз коливальних процесів у відцентровій барабанній пральній машині. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2019. № 3 (134). С. 18–25.
6. Костишин В. С., Курляк П. О. Bond Graph модель асинхронного двигуна з врахуванням насичення магнітопроводу та ефекту витіснення струму в роторі. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2011. № 4(30). С. 32–37.
7. Kurliak P. Application of bond graph method for study of dynamic behavior of electrotechnological complexes. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2020. Iss. 12. Part 1. P. 59–65.
8. Rodkin D., Nozhenko V., Bohatyrov K. Electric drive operation modes of above resonance vibration machine. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 140–143.
9. Воляник О. Ю. Дослідження взаємодії робочих органів барабана відцентрової машини з оброблюваним матеріалом. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2020. № 5 (150). С. 14–23.
10. Пристрій автоматичного балансування відцентрових машин: пат. 153420 Україна, G01M 1/14, G01M 1/30, G01M 1/38. № u202202982; заявлено 17.08.2022; опубліковано 05.07.2023, бюл. № 27/2023.
11. Borutzky W. Bond graph modelling of engineering systems (Vol. 103). New York: Springer, 2011.

**PAVLENKO VOLODYMYR**

Candidate of Sciences in Engineering,  
Assistant Professor, Dean, Faculty of Mechatronics  
and Computer Engineering, Kyiv National  
University of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-2163-8508>  
Scopus Author ID: 57357228600  
Researcher ID: B-7133-2017  
E-mail: [pavlenko.vm@knuutd.edu.ua](mailto:pavlenko.vm@knuutd.edu.ua)

**KURLIAK PETRO**

Candidate of Sciences in Engineering,  
Assistant Professor, Head of Department of Electrical  
Power Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical  
University of Oil and Gas, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-8113-5211>  
Scopus Author ID: 57214242215  
E-mail: [petro.kurliak@nung.edu.ua](mailto:petro.kurliak@nung.edu.ua)

**VOLIANYK OLEKSII**

Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor,  
Head of Department of Mechanical Engineering, Kyiv National  
University of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-7278-0910>  
Scopus Author ID: 57915800600  
Researcher ID: I-7967-2018  
E-mail: [volianyko.oy@knuutd.edu.ua](mailto:volianyko.oy@knuutd.edu.ua)

<sup>1</sup> PAVLENKO V., <sup>2</sup> KURLIAK P., <sup>1</sup> VOLIANYK O.

<sup>1</sup> Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<sup>2</sup> Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine

**DESIGNING A CONTROL SYSTEM FOR MECHANISMS  
WITH VARIABLE IMBALANCE**

**Purpose.** Conducting analytical and experimental research, developing a control system for mechanisms with a variable imbalance. Investigation of operating modes, verification of the operation algorithm and determination of steady states of the unbalanced mechatronic system. Determination of dependencies that describe the nature of the load on the working bodies.

**Methodology.** Methods of mathematical modelling of mechatronic systems by constructing Bond Graph, algorithmic design, experimental study with data collection were used.

**Results.** An analytical review of the nature of formation and methods of decreasing imbalance in unstable mechatronic systems is carried out, and a system for automatic control of rotor balancing using digital monitors in centrifuges with variable imbalance is developed and proposed. The control system includes a microcontroller, a Hall sensor, and a BondGraph model for modelling the operation of an induction motor. An algorithm was developed for the control program, which, according to the set parameters, checks the nominal and critical current values in the centrifuge drive. The current value is recorded and fluctuations are monitored. If the current increases, the system reduces the speed by 10% to reduce the amplitude of oscillations in transient rotation modes, while continuing to monitor the permissible current limit and motor load.

**Scientific novelty.** The article analyses aspects of emergence and studies regulation of unbalanced systems. A structural diagram of the control system for rotary mechanisms with the use of digital monitoring is proposed. The system control algorithm is developed. The study of unstable states using BondGraph computer modelling methods was carried out.

**Practical significance.** As a result of the analytical study, the phenomenon of imbalance in mechatronic systems was considered. An experimental model for controlling unbalance in rotary centrifugal mechanisms was designed and implemented. The results and conclusions obtained can be used in the design of centrifugal machines in various industries.

**Keywords:** unbalance control system; vibrations; BondGraph; balancing.