

безіндуктивних шунтов, делителів напруги і измерительними преобразователями, забезпечують точність измерень 0,002...0,005 %.

В цьому випадку система метрологічного забезпечення засобів измерения електроенергетических величин буде мати вигляд, представлений на рис. 6, то є вона представит собою децентралізовану систему забезпечення єдності измерения.

Список літератури

1. Шапиро Е.З. Перспективні измерительні технології в області измерения і аналізу якості електричної енергії і особливості їх метрологічного забезпечення / Е.З. Шапиро // Законодавча і прикладна метрологія. – 2006. – № 5. – С. 8–16.
2. Власов М. Високовольтні оптичні преобразователи для систем измерения і аналізу якості електричної енергії / М. Власов, А. Сердцев // Энергорынок. – 2006. – № 10. – С. 14–21.
3. Измерительные комбинированные преобразователи тока и напряжения NXVCT-121/145/245/362/420/550/800: справочник покупателя. – 1-е изд. – 2007. – С. 2–9.
4. Гуртовцев А.А. Оптические трансформаторы и преобразователи тока. Физические принципы работы, устройство и технические характеристики / А.А. Гуртовцев // Электрические сети и системы. – 2009. – № 8. – С. 56–71.
5. IEC 60044-7. Трансформаторы измерительные. Часть 7. Электронные преобразователи напряжения. – IEC, 2002.
6. IEC 60044-8. Трансформаторы измерительные. Часть 8. Электронные преобразователи тока. – IEC, 2002.
7. NPC – NIST Inter – comparison of calibration system for current, transducers with a voltage output at power frequencies / E. So, P. Arseneau [et al.] // IEEE Transaction on instrumentation and measurement. – 2003. – Vol. 52, No 2. – P. 6–18.

УДК 621.317.421

АНАЛІЗ ШВИДКОДІЇ ІНДУКЦІЙНИХ МАГНІТОМЕТРІВ

В.О. Проненко, науковий співробітник Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН та НКА України (ЛЦ ІКД)

В.Є. Корепанов, доктор технічних наук, заслужений діяч науки і техніки України, заступник директора ЛЦ ІКД, м. Львів



В.О. Проненко



В.Є. Корепанов

Вперше виконано аналіз швидкодії індукційних магнітометрів та подано рекомендації щодо забезпечення її належного рівня.

The induction magnetometer response speed is analyzed for the first time; recommendations how to assure its required level are given.

Останнім часом у геофізиці щораз більшого поширення набувають імпульсні методи зондування земної кори: в заданому місці розвідування встановлюють потужний генератор імпульсів і мережу вимірювальних приладів – електричних та магнітних давачів. Як правило, магнітні давачі – це індукційні магнітометри (ІМ), що набули широкого

застосування як більш ширококутові й чутливі в діапазоні частот, вищих за доли герца. Потім за допомогою випромінювача, в основному у вигляді довгого кабеля, задають потрібну послідовність імпульсів та, застосовуючи систему давачів, вимірюють відгук досліджуваного середовища на ці імпульси. Зрозуміло, що потужні імпульси генератора струму перевантажують магнітні давачі, яким потрібен деякий час для виходу з насиченого стану. При цьому, чим швидше ІМ зможе почати вимірювання відгуку досліджуваного середовища на імпульси струму, тим менша глибина зондування може бути реалізована. Отже, швидкість відновлення ІМ після перевантаження й виходу на нормальний режим вимірювання відіграє в цих методах дуже важливу роль. Якщо в наземних умовах недоліки вимірювання можна деяким чином компенсувати багаторазовим увімкненням джерела струму, то при використанні рухомого джерела магнітного поля – при морському електророзвідуванні або аероелектророзвідуванні – забезпечення високої швидкодії ІМ особливо важливе через обмежену можливість і високу вартість повторень.

Із цього випливає, що збільшення швидкодії ІМ є важливою умовою їхньої конкурентоспроможності на ринку геофізичних приладів при решті

подібних параметрів. Розглянемо особливості досягнення потрібного рівня швидкодії для ІМ як систем автоматичного регулювання зі зворотним зв'язком у магнітному полі.

З огляду існуючої літератури можна зробити висновок, що аналіз динамічних властивостей ІМ практично не проводився, а відомі публікації [1, 2] ґрунтуються на спрощених еквівалентних схемах, які не дозволяють відобразити всю складність перехідних процесів у реальних ІМ. Першу спробу детального аналізу стійкості ІМ було зроблено в роботі [3], де показано, що відомі методи забезпечення стійкості можуть бути застосовані для запропонованої еквівалентної схеми, яка найповніше описує динамічні характеристики ІМ.

Дослідимо, чи розповсюджується це положення і на регулювання швидкодії ІМ як динамічної системи автоматичного регулювання зі зворотним зв'язком у магнітному полі. Звернемося до еквівалентної схеми такого ІМ, наведеної у згаданій роботі [3] і поданій на рис. 1. У ній прийнято такі позначення: ПП – попередній підсилювач; C_0 – ємність котушки зворотного зв'язку; C_1 – сума власної ємності вимірювальної котушки і вхідної ємності ПП; e – ЕРС, яка наводиться в котушці L_1 під дією зовнішнього змінного магнітного поля; M – взаємна індуктивність основної вимірювальної котушки і котушки зворотного зв'язку, $M = n_{зв} \sqrt{L_0 L_1}$, де $n_{зв}$ – коефіцієнт зв'язку; L_0 – індуктивність котушки зворотного зв'язку; L_1 – індуктивність основної вимірювальної котушки; r_0 – опір котушки зворотного зв'язку; r_1 – опір основної вимірювальної котушки; R_0 – опір у колі загального зворотного зв'язку, який визначає величину струму зворотного зв'язку i_0 ; $R_k C_k$ – коригувальна ланка; $R_1 R_2 C_2$ – коло, що утворює зворотний зв'язок попереднього підсилювача, який використовується для забезпечення необхідного коефіцієнта підсилення; R_{in} – вхідний опір попереднього підсилювача ПП; u_{out} – вихідна напруга ІМ.

Спочатку запишемо рівняння для кожного замкненого кола:

- для кола головної вимірювальної котушки $L_1 r_1 C_1$:

$$(L_1 p + r_1) \cdot i_1 + u_C - M p i_0 = e; \quad (1)$$

- для кола $C_1 R_{in}$:

$$\frac{R_{in}}{R_{in} \cdot C_1 \cdot p + 1} i_1 = u_C; \quad (2)$$

- для вихідного кола:

$$u_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{R_1 R_2}{R_2 C_2 p + 1} u_C; \quad (3)$$

- для кола зворотного зв'язку:

$$\left(\frac{L_0 p + r_0}{L_0 C_0 p^2 + r_0 C_0 p + 1} + \frac{R_0 (R_k C_k p + 1)}{(R_0 + R_k) C_k p + 1} \right) \cdot i_0 = -u_{out}. \quad (4)$$

Використовуючи рівняння (1)–(4), отримаємо:

$$\begin{aligned} & \left[\left(\left(\frac{L_1}{R_{in}} p + \frac{r_1}{R_{in}} \right) (R_{in} C_1 p + 1) + 1 \right) (R_2 C_2 p + 1) \times \right. \\ & \quad \times \left[(L_0 p + r_0) ((R_0 + R_k) C_k p + 1) + R_0 (R_k C_k p + 1) \times \right. \\ & \quad \times \left. (L_0 C_0 p^2 + r_0 C_0 p + 1) \right] + \frac{M (R_1 + R_2)}{R_1} p (L_0 C_0 p^2 + \\ & \quad \left. + r_0 C_0 p + 1) \left(\frac{R_1 R_2 C_2}{R_1 + R_2} p + 1 \right) ((R_0 + R_k) C_k p + 1) \right] \cdot u_{out} = \\ & = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \left(\frac{R_1 R_2 C_2}{R_1 + R_2} p + 1 \right) \left[(L_0 p + r_0) ((R_0 + R_k) C_k p + 1) + \right. \\ & \quad \left. + R_0 (R_k C_k p + 1) (L_0 C_0 p^2 + r_0 C_0 p + 1) \right] \cdot e. \quad (5) \end{aligned}$$

Для спрощення цього рівняння позначимо комбінації компонентів схеми через їхні еквівалентні постійні часу: $\tau_1 = R_{in} C_1$; $\tau_2 = R_2 C_2$; $\tau_3 = R_1 R_2 C_2 / (R_1 + R_2)$; $\tau_4 = L_0 / R_0$; $\tau_5 = L_1 / R_{in}$; $\tau_0 = r_0 C_0$; $\tau_k = R_k C_k$. Також введе-

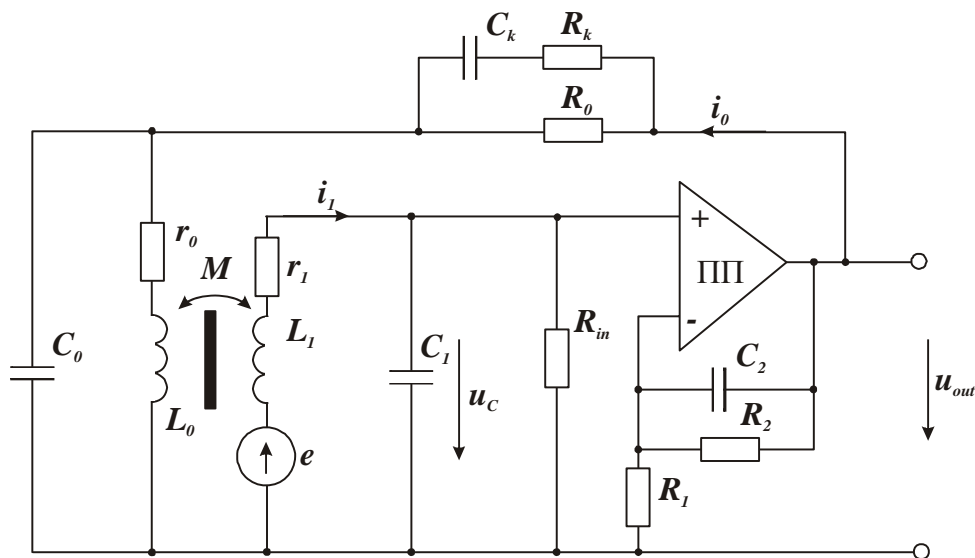


Рис. 1. Еквівалентна схема ІМ зі зворотним зв'язком у магнітному полі з коригувальною ланкою

мо безрозмірні співвідношення: $k=(R_1+R_2)/R_1$; $\beta = R_{in}/R_0$; $\gamma=r_1/R_{in}$; $\delta=r_0/R_0$; $\alpha=R_0/R_k$.

Застосовуючи до обох частин рівняння (5) перетворення Лапласа при нульових початкових умовах, подамо передаточну функцію замкненої системи $W(p)$ у вигляді

$$W(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = [k(\tau_0\tau_4p^2 + \delta\tau_0p + 1)(\tau_kp + 1) + (\tau_4p + \delta)((1 + \alpha)\tau_kp + 1)](\tau_3p + 1) / [((\tau_5p + \gamma) \times (\tau_1p + 1) + 1)(\tau_2p + 1)[(\tau_0\tau_4p^2 + \delta\tau_0p + 1)(\tau_kp + 1) + (\tau_4p + \delta)((1 + \alpha)\tau_kp + 1)] + pk_0((1 + \alpha)\tau_kp + 1) \times (\tau_0\tau_4p^2 + \delta\tau_0p + 1)(\tau_3p + 1)], \quad (6)$$

де $k_0 = kn_{зв} \sqrt{\beta\tau_4\tau_5}$.

Зазвичай на практиці виконуються такі нерівності: $\tau_1 \gg \tau_2 \gg \tau_3 \gg \tau_4 \gg \tau_5 \gg \tau_0$; $\beta \gg 1$; $\gamma \ll 1$; $k_0 < 1$. Їх урахування дозволяє знехтувати малими величинами і отримати характеристичне рівняння системи у формі

$$\tau_0\tau_1\tau_2\tau_4\tau_5\tau_kp^6 + (\tau_1\tau_2\tau_4\tau_5(\tau_0 + (1 + \alpha)\tau_k) + k_0(1 + \alpha)\tau_0\tau_3\tau_4\tau_k)p^5 + (\tau_1\tau_2\tau_5(\tau_4 + \tau_k) + k_0\tau_0\tau_3\tau_4)p^4 + (\tau_1\tau_5(\tau_2 + \tau_k) + k_0(\tau_0\tau_4 + (1 + \alpha)\tau_3\tau_k))p^3 + (\tau_1\tau_5 + k_0(\tau_3 + (1 + \alpha)\tau_k))p^2 + (\tau_2 + \tau_k + k_0)p + 1 = 0. \quad (7)$$

На жаль, розв'язати рівняння шостого порядку (7) в загальному вигляді неможливо, отже, спробуємо це зробити шляхом моделювання на комп'ютері.

Звернемо увагу, що відмінністю даної моделі від загальноприйнятих є наявність диференційної ланки в колі зворотного зв'язку. Приймавши, що величина активного опору зворотного зв'язку R_0 значно перевищує імпеданс обмотки зворотного зв'язку ωL_0 , а також що вихідна напруга підсилювача завжди набагато більша, ніж ЕРС, яка наводиться в обмотці зворотного зв'язку вимірюваним полем, отримуємо таке рівняння:

$$\frac{R_0(R_kC_kp + 1)}{(R_0 + R_k)C_kp + 1} \cdot i_0 = -u_{out}. \quad (8)$$

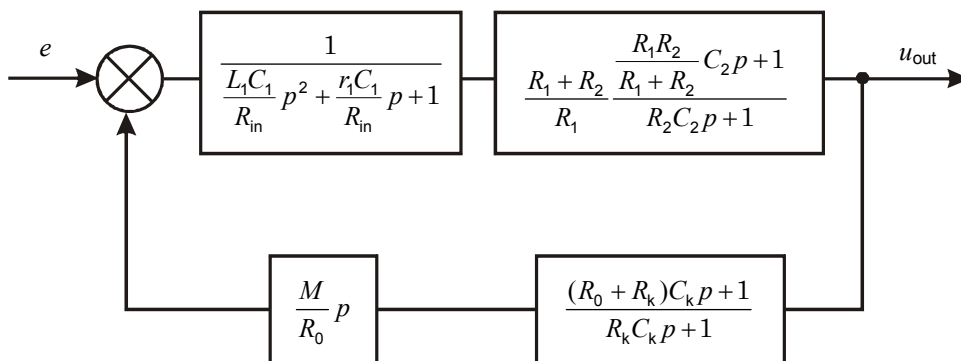


Рис. 2. Спрощена динамічна модель ІМ із замкнутим зворотним зв'язком

З урахуванням отриманого виразу (8) передаточна функція замкненої системи матиме вигляд

$$u_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{\frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} C_2p + 1}{R_2C_2p + 1} \cdot \frac{1}{\frac{L_1C_1}{R_{in}} p^2 + \frac{r_1C_1}{R_{in}} p + 1} \left[1 + \frac{M}{R_0} p \frac{(R_0 + R_k)C_kp + 1}{R_kC_kp + 1} \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{\frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} C_2p + 1}{R_2C_2p + 1} \times \frac{1}{\frac{L_1C_1}{R_{in}} p^2 + \frac{r_1C_1}{R_{in}} p + 1} \right] \cdot e.$$

На підставі цього виразу можемо тепер побудувати еквівалентну схему динамічної моделі ІМ зі зворотним зв'язком у магнітному полі (рис. 2).

Відмінністю цієї динамічної моделі є наявність у колі зворотного зв'язку диференційної ланки Mp/R_0 у чистому вигляді. Пошук у фаховій літературі не виявив робіт, присвячених забезпеченню швидкодії систем автоматичного регулювання з диференційною ланкою в колі зворотного зв'язку. Це викликає необхідність проведення детального аналізу можливості підвищення швидкодії в такій системі.

Як уже було показано вище, прийнята модель описується рівнянням шостого порядку, що робить неможливим отримання аналітичного розв'язку. Тому для спрощення процедури розрахунку розв'яжемо рівняння (6) чисельним методом для конкретної версії широкосмугового ІМ типу LEM1-120.

Для аналізу впливу змін параметрів коригувальної ланки на швидкодію ІМ будемо задавати різні значення опорів R_k і R_0 і скористаємося програмою, написаною в середовищі MATLAB, для отримання реакції системи на степеневу та імпульсну функції.

Передусім, необхідно визначити положення полюсів передаточної функції при різних значеннях R_k і R_0 , оскільки відомо, що в загальному випадку для підвищення швидкодії системи автоматичного регулювання з коригувальною ланкою в колі зворотного зв'язку необхідно так вибирати значення елементів коригувальної ланки, щоб найближчий

$R_0, \text{кОм}$	$R_k, \text{Ом}$			
	0	100	1000	5000
5	$-6,0341e+000$	$-6,0341e+000$	$-6,0341e+000$	$-6,0341e+000$
1	$-1,2111e+000$	$-1,2111e+000$	$-1,2111e+000$	$-1,2111e+000$
0,25	$-3,0430e-001$	$-3,0430e-001$	$-3,0430e-001$	$-3,0430e-001$

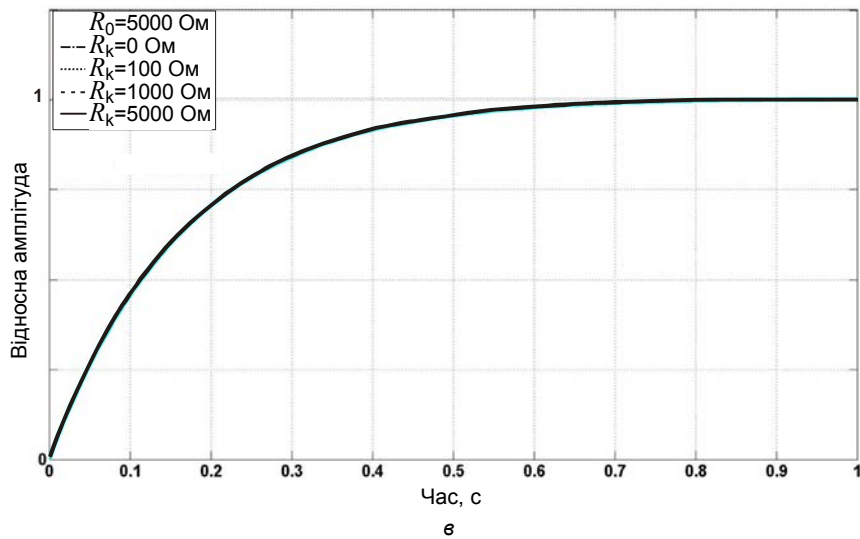
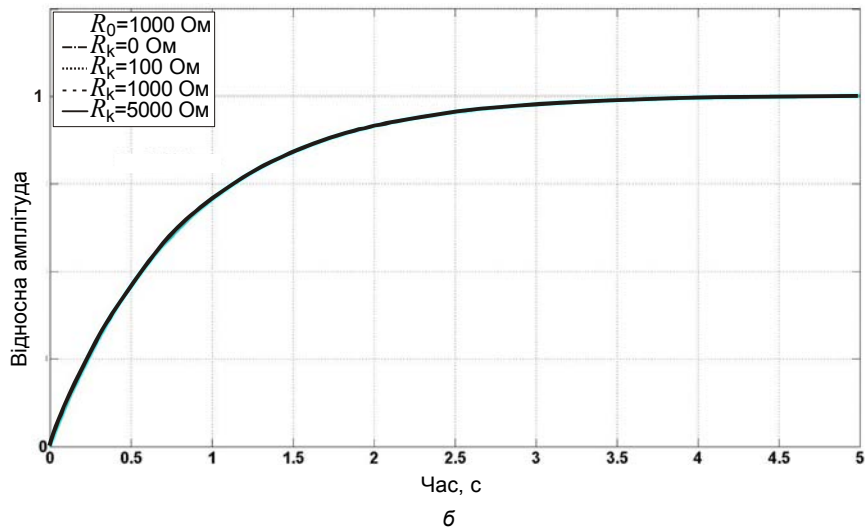
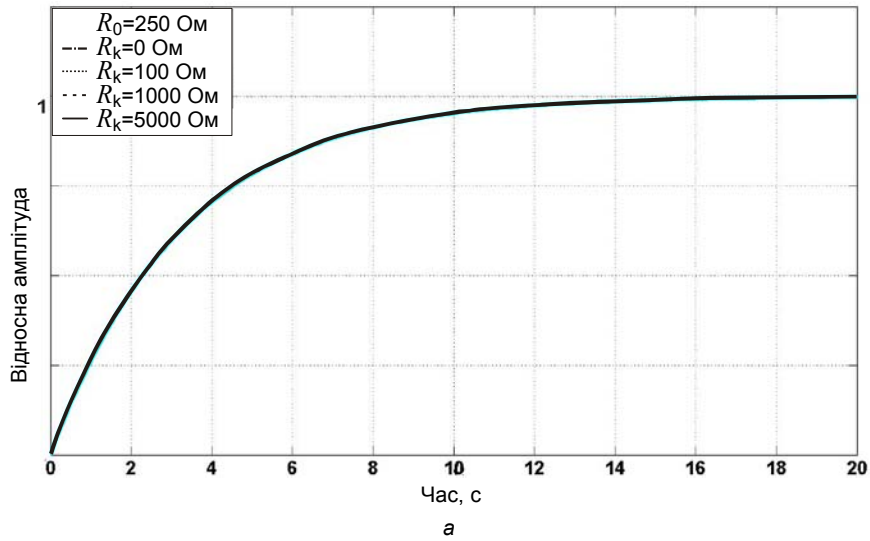


Рис. 3. Відгук системи на степеневу функцію: а – при $R_0=250 \text{ Ом}$; б – при $R_0=1 \text{ кОм}$; в – при $R_0=5 \text{ кОм}$

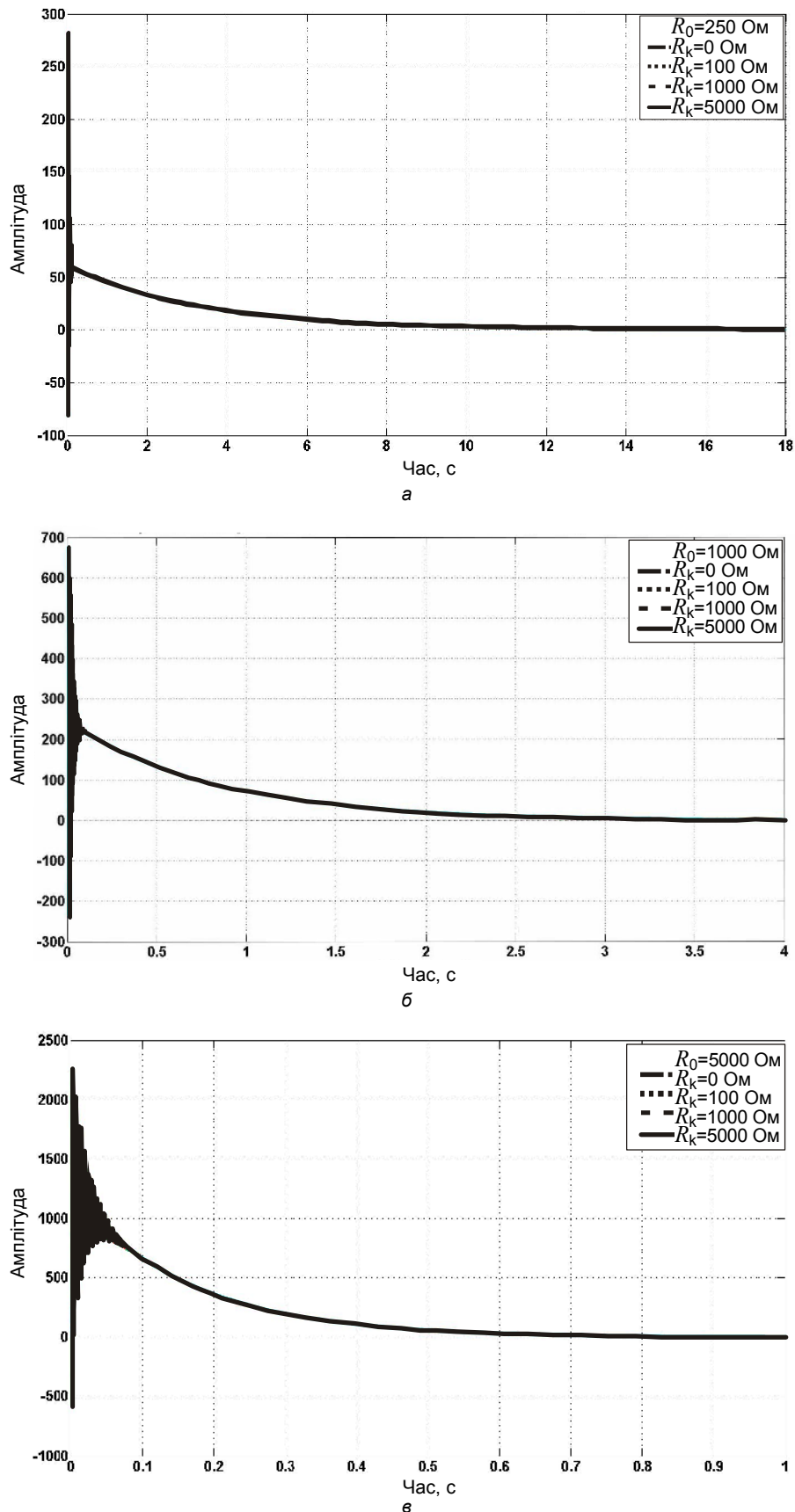


Рис. 3. Відгук системи на імпульсну функцію: а – при $R_0=250 \text{ Ом}$; б – при $R_0=1 \text{ кОм}$; в – при $R_0=5 \text{ кОм}$

до уявної осі полюс або пара комплексних полюсів передаточної функції системи якомога далі віддалилися від цієї осі [4].

Отримані положення найближчого полюса передаточної функції при зміні в широких межах значень R_k і R_0 наведено в таблиці. При розгляді

даних таблиці можна побачити, що загальновизначений спосіб підвищення швидкодії за допомогою зміни параметрів коригувальної ланки в системі автоматичного регулювання, яка містить диференційну ланку в колі зворотного зв'язку, не може бути застосований: при зміні значень R_k у широких межах положення найближчого комплексного кореня не змінюється, а зміна опору зворотного зв'язку R_0 суттєво впливає на положення найближчого комплексного полюса – чим більший R_0 , тим далі цей полюс від уявної осі і тим вищою буде швидкодія системи.

Для ілюстрації цього положення з використанням тієї ж математичної моделі побудуємо відгук системи при зміні значень R_k і R_0 на степеневу (рис. 3) та імпульсну функції (рис. 4).

Розглядаючи отримані на цих рисунках дані про відгук ІМ на степеневу та імпульсну функції, які відображають типовий режим роботи методом перехідних процесів, знаходимо, що зміна коригувального опору R_k не впливає на швидкодю ІМ – значення цього опору повинно визначатися з міркувань забезпечення стійкості [3]. А значення опору R_0 в колі зворотного зв'язку, який визначає струм у котушці зворотного зв'язку, суттєво впливає на швидкість перехідного процесу: збільшення R_0 прискорює реакцію системи на степеневу та імпульсну функції.

Із вищевикладеного випливає важливий висновок: підвищення швидкодії системи, яка містить у замкненому колі диференційну ланку, не може бути забезпечене за допомогою змін параметрів коригувальної ланки, як це звичайно досягається в системах автоматичного регулювання зі статичним та астатичним зрівноважуванням [5, 6]. Оскільки решта сталих часу системи визначається при проектуванні ІМ і змінити їх досить складно, дуже важливо мати на увазі, що зміна швидкодії ІМ можлива шляхом регулювання величини R_0 . Така можли-

вість була досліджена експериментально і показала ефективність цього способу.

Цей результат отриманий вперше і має суттєве практичне значення для побудови сучасних ІМ: з нього випливає, що при проектуванні ІМ можна вибирати необхідні параметри коригувальної ланки для забезпечення максимальної стійкості ІМ без урахування іноді суперечливих вимог до забезпечення максимальної швидкодії. А потрібну швидкодю теж можна вибирати незалежно за допомогою опору зворотного зв'язку.

Список літератури

1. Аппаратура для аэрогеофизической разведки с магнитным и электромагнитным информационными каналами / А.А. Вакульский, Л.Я. Мизюк, Р.В. Проць, Ю.Ю. Сикачевский. – Киев: Наукова думка, 1985. – 253 с.
2. *Séran H.C.* An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research / H.C. Séran, P. Ferreau // *Rev. of Sci. Instr.* – 2005. – 76. – 044502.
3. Проненко В.О. Забезпечення стабільності індукційних магнітометрів / В.О. Проненко, Є.Д. Васильєв // *Український метрологічний журнал.* – 2010. – № 4. – С. 21–24.
4. Измерительные преобразователи постоянного тока / под ред. Л.А. Синицкого. – Киев: Наукова думка, 1965. – 376 с.
5. *Блажкевич Б.И.* Об устойчивости астатического измерительного преобразователя / Б.И. Блажкевич, Е.Д. Васильев, В.Е. Корепанов // *Отбор и передача информации.* – 1971. – Вып. 28. – С. 73–78.
6. *Корепанов В.Е.* Измерительный преобразователь с астатическим уравновешиванием / В.Е. Корепанов // *Измерительная техника.* – 1973. – № 10. – С. 91–95.