УДК 621.316.72

О.В. Будьонний, канд. техн. наук, М.В. Колотов канд. техн. наук, О.О. Федько

Електроживлення системи орієнтації електронної платформи

Рассмотрены системы ориентации электронной платформы и режимы работы электромагнитных катушек как исполнительных элементов этих систем. Описаны принципы управления электромагнитными катушками в режиме создания максимального механического момента и в экономном режиме.

The orientation system of electronic platform and conditions of operation of electromagnetic coils as executive elements of such system is considered. The modes of the control electromagnetic coils in the conditions of creation a maximum of mechanical moment and in the economy conditions, is described.

Ключові слова: *електронна платформа, система орієнтації, стабілізація платформи, керування електромагнітними котушками, магнітне поле Землі.*

Вступ

Серед електронних платформ виділяють орієнтовані та неорієнтовані. Платформи, у яких за допомогою системи орієнтації забезпечується підтримка близьких до нуля кутів неузгодженості між зв'язаною з корпусом платформи системи координат і орбітальної системи координат називаються орієнтованими [1].

Орієнтовані системи орієнтації електронних платформ поділяються на три групи: 1) пасивні, 2) активні, 3) комбіновані [2] .

Найбільш ефективними для малих електронних платформ є активні системи орієнтації, виконавчими елементами яких виступають електромагнітні котушки. В таких системах орієнтація відбувається за рахунок взаємодії електромагнітних котушок з магнітним полем Землі.

З розвитком потужних мікропроцесорних систем та з підвищенням точності й мініатюризації датчиків виміру станів платформи проблема орієнтації більшою мірою перекладається на математичне забезпечення мікроконтролерних бортових комп'ютерів. Таким чином, розробка ефективних способів керування платформою дозволить підвищити якість орієнтування з одночасним зменшенням енерговитрат.

Розглянемо докладніше роботу виконавчих елементів системи орієнтації, які підключені через перетворювачі постійного струму на змінний до системи електроживлення, для знаходження ефективного способу керування.

Режими роботи електромагнітних котушок як навантаження перетворювачів системи орієнтації

При розташуванні виконавчих елементів у взаємно перпендикулярних площинах щодо центру платформи забезпечується можливість обертання платформи по трьом осям (тривісна орієнтація) [3]. Для виконання тривісної орієнтації перетворювачу електричної енергії необхідно забезпечувати роботу трьох електромагнітних котушок X,Y,Z , кожна з яких відповідає за орієнтацію по відповідній вісі обертання.

При взаємодії електромагнітної котушки платформи з магнітним полем Землі (МПЗ), результуючий обертаючий вектор моменту, що створюється силою Ампера $\vec{F}_a$, дорівнює [4]:

$$\vec{M}_K = \vec{p}_m \times \vec{B} = \left(n_w \cdot I \cdot S \cdot \vec{n}\right) \times \vec{B} \qquad (1)$$

де $\vec{B}$ – вектор магнітної індукції МПЗ, $\vec{p}_m$ – вектор магнітного моменту, n_w – кількість витків проводу зі струмом I в електромагнітній котушці, S – площа перетину котушки, $\vec{n}$ – нормаль, спрямована перпендикулярно перетину котушки.

З урахуванням (1), формула для розрахунку струму в котушці має вигляд:

$$I = \frac{M_K}{n_w \cdot S \cdot (\vec{n} \times \vec{B})} = \frac{M_K}{n_w \cdot S \cdot B \cdot \sin\alpha}, \qquad (2)$$

де α – кут між вектором $\vec{B}$ та вектором $\vec{n}$.

З формули (2) видно, що чим менше кут α, тим більшим є значення струму для створення моменту M_K, а при колінеарності векторів $\vec{n}$ та $\vec{B}$ створення керуючого моменту для цієї котушки є неможливим. Таким чином, у разі обертання платформи робота однієї котушки найбільш ефективна за умови $\alpha = 90^0$. В цьому випадку максимальний механічний момент дорівнює: $M_{K\max} = I \cdot n_w \cdot S \cdot B$.

Застосування трьох взаємно перпендикулярних котушок дозволяє створювати керуючі моменти (M_{KX}, M_{KY}, M_{KZ}). За рахунок роботи двох перпендикулярних котушок до осі обертання, можливо досягти ефективної стабілізації в залежності від обраного способу керування електромагнітними котушками.

Розглянемо, на прикладі обертання платформи навколо вісі S_X, варіанти включення перетворювачем електромагнітних котушок та оберемо ефективний спосіб керування ключами перетворювача.

Початкові умови при обертанні платформи навколо вісі S_X за годинниковою стрілкою представлені на рис. 1. Кут a_Y між вектором нормалі $\vec{n}_Y$ та вектором $\vec{B}$ дорівнює нулю. Очевидно, що тоді кут a_Z між вектором нормалі $\vec{n}_Z$ та вектором $\vec{B}$ буде дорівнювати 90^0. У разі повороту платформи на 180^0, відносно початкових умов, кут між векторами $\vec{n}_Z$ та $\vec{B}$ дорівнює $a_Z = -90^0$, тому перетворювач повинен переключити напрямок струму в котушці Z. Переключення струму за аналогією повинно відбуватися і в котушці Y зі зсувом фази на 90^0 відносно переключень в котушці Z [5].

Таким чином, керування системою орієнтації реалізується шляхом визначення вектора індукції МПЗ $\vec{B}$ в кожен момент часу та зміни полярності напруги на двох перпендикулярних котушках (Y, Z) до осі обертання (S_X) в моменти колінеарності векторів $\vec{n}$ ($\vec{n}_Y;\vec{n}_Z$) та $\vec{B}$.

На рис. 2, *а* зображено графік зміни значень $\sin\alpha_Y$ та $\sin\alpha_Z$ в залежності від кута обертання. З урахуванням напруги на котушках Y (рис. 2, *б*) та Z (рис. 2, *в*) графіки обертових механічних моментів M_{KY} та M_{KZ} будуть мати вигляд, представлений на рис. 2, *є*.

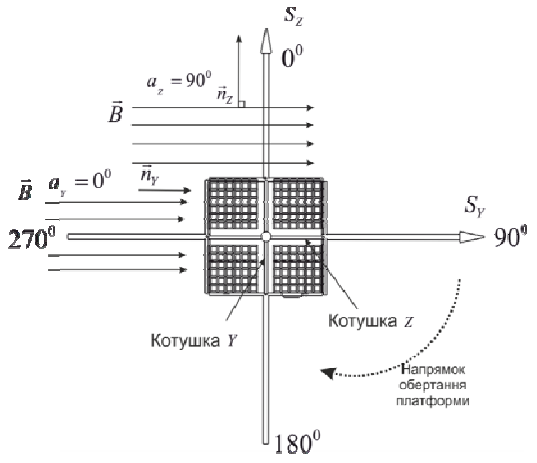

Рис. 1. Початкові умови для обертання платформ

З графіку сумарного обертового механічного моменту (рис. 2, *ж*), значення по модулю $|M_{KY} + M_{KY}|$ у точках 135^0 та 315^0 дорівнюють нулю. Це пов'язане із взаємною компенсацією моментів M_{KY} та M_{KZ} на інтервалах $90^0 - 180^0$ та $270^0 - 360^0$, оскільки котушки працюють в противофазі. Таким чином, на цих ділянках варто відключати одну з котушок.

В моменти зміни полярності напруги на котушках Y та Z струм в них (при знехтуванні втратами на активному та індуктивному опорах котушок) буде наближатися до нескінченності (рис. 2, *г,д*), тому такий процес керування системою орієнтації не є ефективним. Для ефективного використання енергії котушками слід вимикати котушки в деяких межах від моментів комутації $(0;\frac{\pi}{2};\pi;\frac{3\pi}{4};2\pi)$. Нові моменти комутації електромагнітних котушок прийматимуть значення $\left(0\pm\lambda_1;\frac{\pi}{2}\pm\lambda_1;\pi\pm\lambda_1;\frac{3\pi}{4}\pm\lambda_1;2\pi\pm\lambda_1\right)$.

Кут λ_1 приймаємо рівним $\lambda_1 = \frac{\pi}{4}$ (рис. 4) з графіку $M_{K\,cep} = f(\lambda_1)$ (рис. 3, *а*), де $M_{K\,cep}$ – середнє значення сумарного механічного моменту, оскільки $M_{K\,cep}$ на інтервалі $\lambda_1 \in \left[0;\frac{\pi}{4}\right]$, не змінюється, а значення сумарної споживаної потужності при збільшенні кута λ_1 зменшується (рис. 3, *б*).

Такий спосіб перемикання котушок є економним та найбільш енергоощадним, оскільки в один і той самий момент працює тільки одна з котушок. Розрахуємо середнє значення напруг кожної котушки $U_Y = f(t)$, $U_Z = f(t)$ (рис. 4, *б,в*), струмів $I_Y = f(t)$, $I_Z = f(t)$ (рис. 4, *г,д*), та середнє значення споживаної потужності двома котушками в економному режимі $P_{YZ} = f(t)$ (рис.4, *е*):

$$U_{cep}(t) = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} U_{\max} dt = \frac{\omega}{\pi}\int_{\frac{0+\lambda_1}{\omega}}^{\frac{\pi-\lambda_1}{\omega}} U_{\max} dt = 0{,}5\cdot U_{\max} \quad (3)$$

$$I_{cep}(t) = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \frac{M_{K\,max}}{n_w \cdot S \cdot B \cdot \sin(\omega t)} dt =$$

$$= \frac{\omega}{\pi}\int_{\frac{0+\lambda_1}{\omega}}^{\frac{\pi-\lambda_1}{\omega}} \frac{M_{K\,max}}{n_w \cdot S \cdot B \cdot \sin(\omega t)} dt = \quad (4)$$

$$= \frac{1}{\pi}\cdot\left(\frac{M_{K\,max}}{n_w \cdot S \cdot B}\right)\cdot \ln\left|tg\left(\frac{\omega t}{2}\right)\right|\Bigg|_{\frac{\pi-\lambda_1}{\omega}}^{\frac{\pi-\lambda_1}{\omega}} = 0{,}561\cdot I_{\min}$$

$$P_{cep}(t) = 2\cdot U_{cep}(t)\cdot I_{cep}(t) =$$

$$= 0{,}561\cdot U_{\max}\cdot I_{\min} = 0{,}561\cdot P_{UI}$$

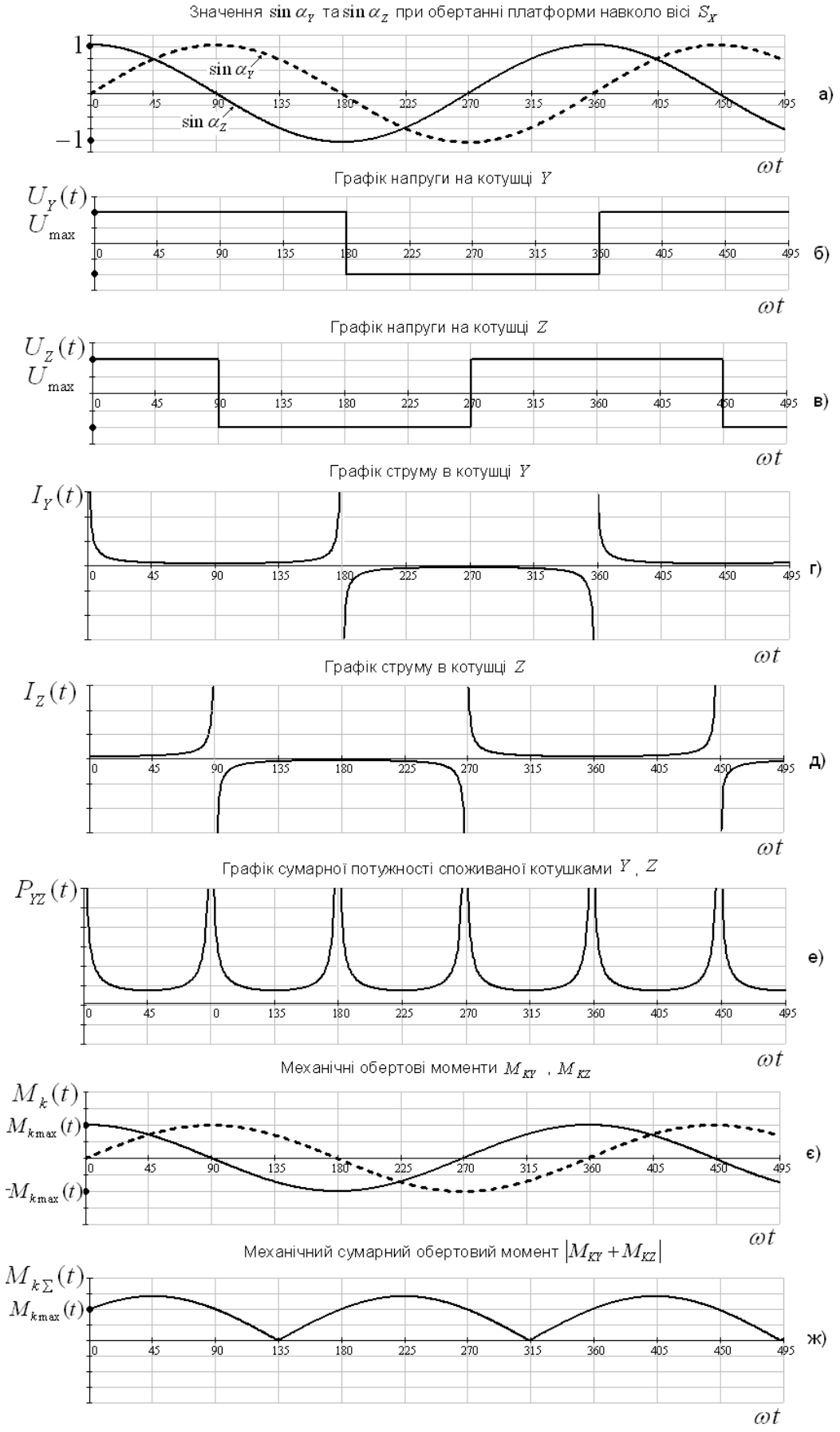

Рис. 2. Графіки роботи електромагнітних котушок системи орієнтації в залежності від кута обертання α в режимі з постійною роботою котушок

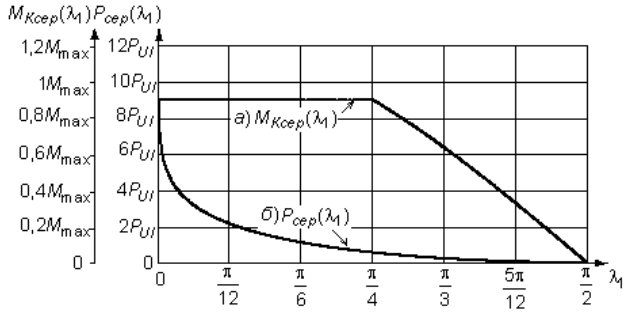

Рис. 3. Графіки залежностей від кута λ_1 середніх значень: а) механічного моменту $M_{K\ cep}$, б) споживаної потужності двома котушками P_{cep}

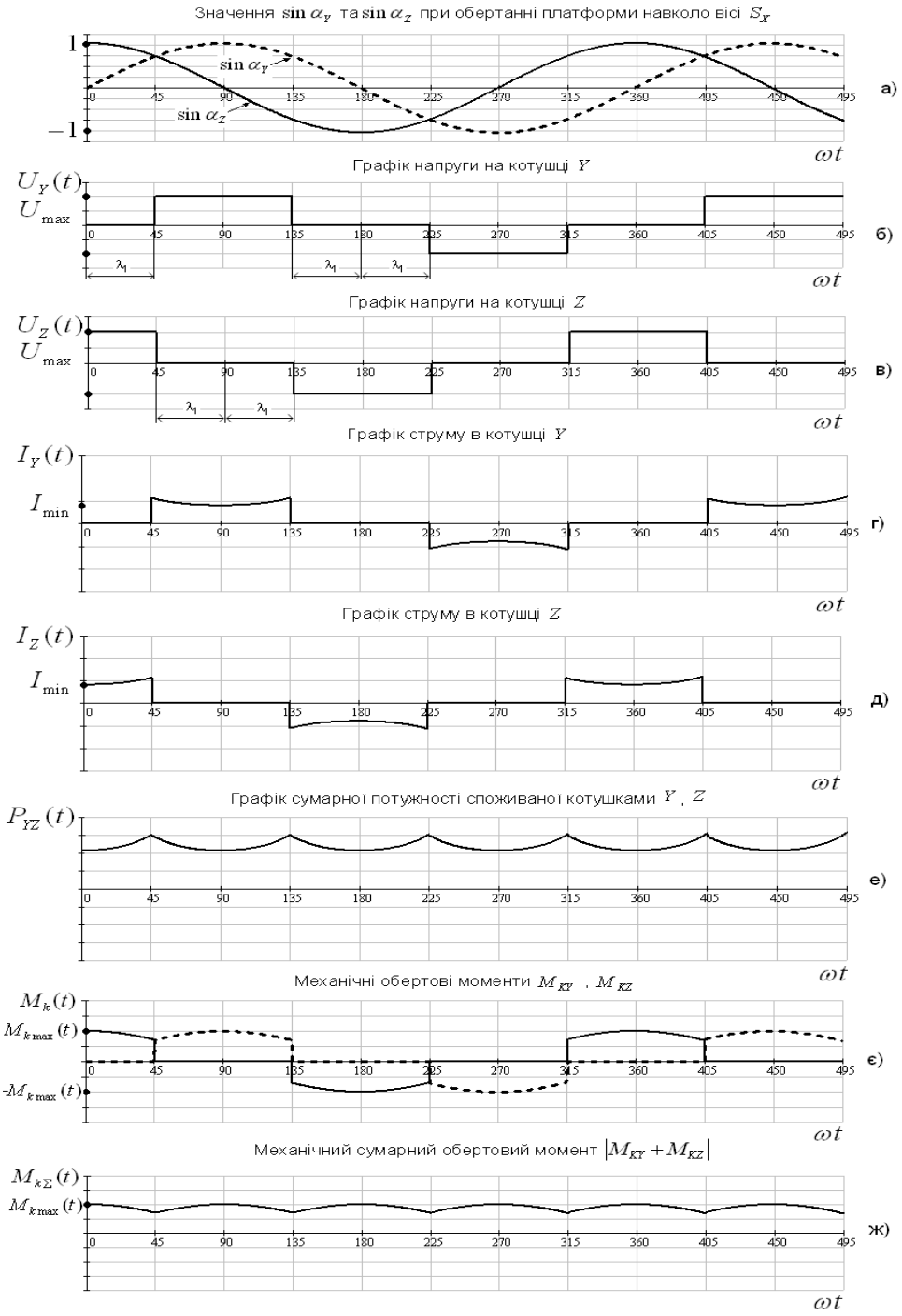

Рис. 4. Графіки роботи котушок системи орієнтації в залежності від кута обертання α в економному режимі

З урахуванням напруги на котушках Y (рис. 4, *б*) та Z (рис. 4, *в*) графіки обертових механічних моментів M_{KY} та M_{KZ} будуть мати вигляд, представлений на рис. 4, *є*. Середнє значення сумарного механічного моменту роботи електромагнітних котушок розраховується за формулою:

$$M_{K\ cep} = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} M_{K\ max}\cdot\left|\sin(\omega t)+\sin\left(\frac{\pi}{2}-\omega t\right)\right|dt = \\ = \frac{M_{K\ max}}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{\omega}}\left|\sin(\omega t)+\sin\left(\frac{\pi}{2}-\omega t\right)\right|dt = \\ = 0{,}9\cdot M_{K\ max} \qquad (5)$$

На рис. 5 наведені графіки роботи котушок в режимі створення максимального сумарного

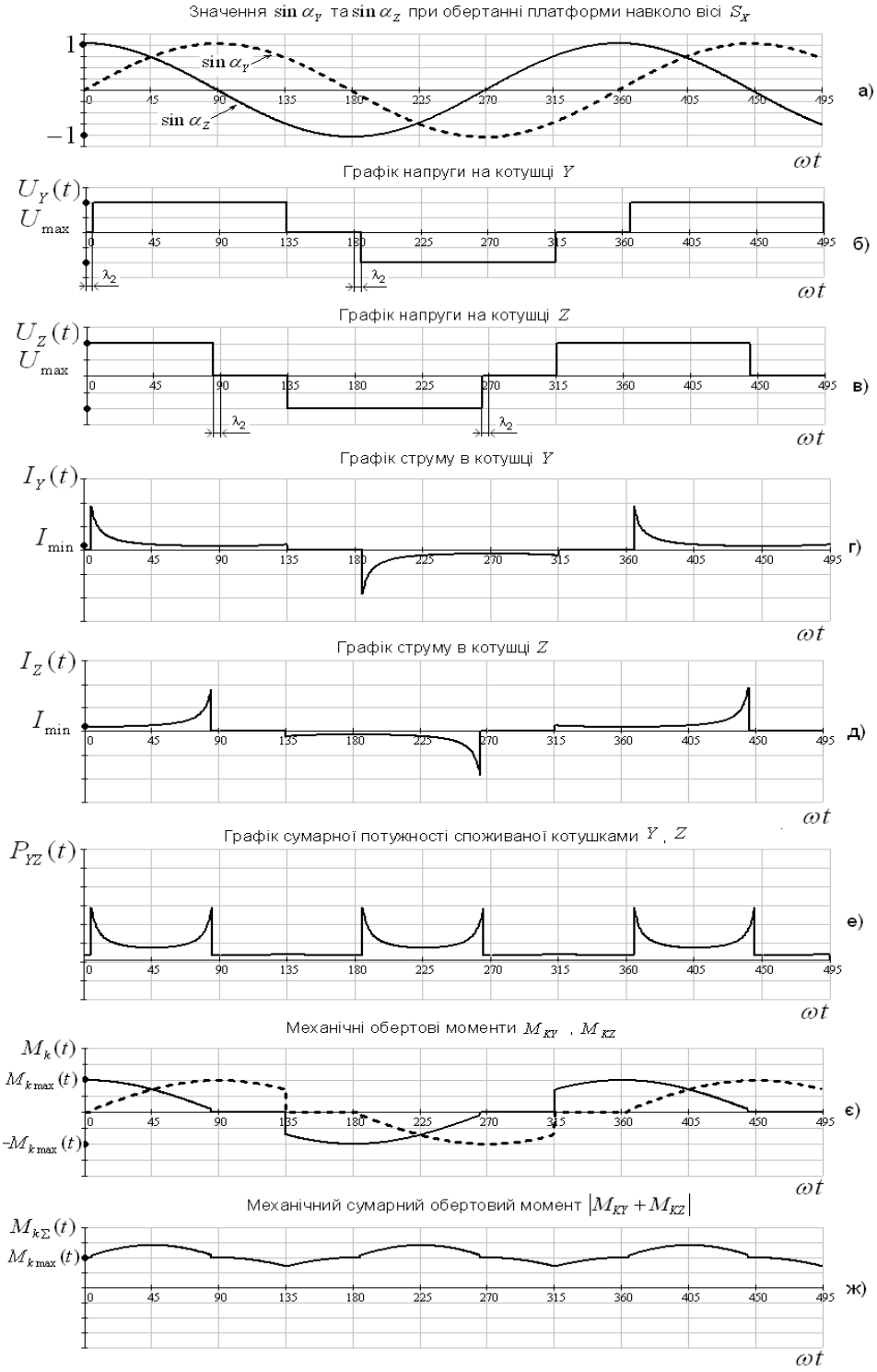

Рис. 5. Графіки роботи котушок системи орієнтації в залежності від кута обертання α в режимі створення максимального механічного моменту

обертового механічного моменту $|M_{KY}+M_{KZ}|=\max$ (рис. 5, *ж*) з урахуванням усунення взаємної компенсацією моментів M_{KY} та M_{KZ} на інтервалах $\left(90^0-180^0\right)$ та $\left(270^0-360^0\right)$ методом включення на даних інтервалах тільки однієї котушки. На інших інтервалах працюють дві котушки. Тим самим, сумарний механічний момент доповнюється механічним моментом, що створюють обидві котушки одночасно. За рахунок такого включення котушок досягається максимально велике значення сумарного моменту, а отже, швидкодія системи орієнтації є максимальною.

В даному режимі, для ефективного енергоспоживання, також потрібно вимикати котушки в межах моментів комутації $(0;\frac{\pi}{2};\pi;\frac{3\pi}{4};2\pi)$. Нові моменти комутації електромагнітних котушок прийматимуть значення:

$$\left(0\pm\lambda_2;\frac{\pi}{2}\pm\lambda_2;\pi\pm\lambda_2;\frac{3\pi}{4}\pm\lambda_2;2\pi\pm\lambda_2\right).$$

Таким чином, механічний момент створюється тільки однією котушкою (рис.5, є) на ділянках $\left(\left(90^0-\lambda_2\right)-\left(180^0+\lambda_2\right)\right)$ та $\left(\left(270^0-\lambda_2\right)-\left(360^0+\lambda_2\right)\right)$.

Значення кута λ_2 приймаємо рівним $\lambda_2=\frac{\pi}{36}$ (рис. 5) з графіку $M_{K\,cep}=f(\lambda_2)$ (рис. 6, *а*), оскільки $M_{K\,cep}$ на інтервалі $\lambda_2\in\left[0;\frac{\pi}{36}\right]$, майже не змінюється, а значення сумарної споживаної потужності при збільшенні кута λ_2 зменшується (рис. 6, *б)*.

Середнє значення сумарного механічного моменту, що розраховане за формулою аналогічною (5), в режимі максимального механічного моменту, дорівнює:

$$M_{K\,cep}=1{,}084\cdot M_{K\,max}.$$

Розрахуємо енергоспоживання за аналогією економного режиму роботи електромагнітних котушок, використовуючи формули (3, 4):

- середнє значення напруги на котушках *Y* та *Z* - $U_Y=f(t)$, $U_Z=f(t)$ (рис. 5, *б,в*): $U_{cep}(t)=0{,}722\cdot U_{\max}$,
- середнє значення струму в котушках *Y* та *Z* - $I_Y=f(t), I_Z=f(t)$ (рис. 5, *г,д*): $I_{cep}(t)=1{,}277\cdot I_{\min}$.

За результатами розрахованих значень струму та напруги розраховуємо середнє значення споживаної потужності в режимі максимального механічного моменту:

$$P_{cep}(t)=2\cdot U_{cep}(t)\cdot I_{cep}(t)=$$
$$=1{,}844\cdot U_{\max}\cdot I_{\min}=1{,}844\cdot P_{UI}.$$

Середня споживана потужність в режимі створення максимального механічного моменту в 3,3 рази більша, ніж в економному режимі, але в даному режимі середнє значення механічного моменту в 1,2 рази більше.

Висновки

Основними перевагами активних систем є висока точність орієнтації та невеликі габарити, а недоліком – додаткові витрати енергії у зв'язку з необхідністю її постійної роботи для орієнтації.

Робота перетворювача та його системи керування зводиться до формування струму в електромагнітних котушках в залежності від потрібного керуючого моменту M_K.

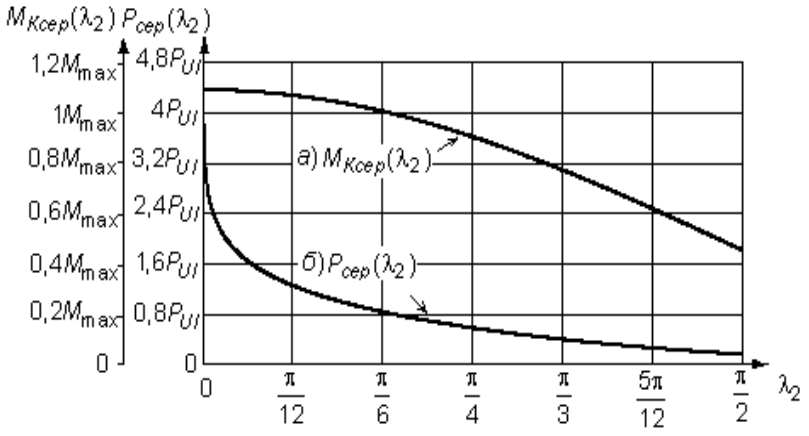

Рис. 6. Графік залежностей від кута λ_2 середніх значень: а) механічного моменту $M_{K\,cep}$, б) споживаної потужності двома котушками P_{cep}

Для найбільш швидкої стабілізації платформи по одній вісі обертання необхідно використовувати режим максимального механічного моменту за допомогою двох перпендикулярних котушок, що включається певним чином відносно геомагнітного поля. При роботі котушок в економному режимі забезпечується найбільша енергоощадність, але даний режим поступається режиму з максимальним механічним моментом за швидкодією.

Література

1. *Сингер С.Ф.* Проблемы ориентации искусственных спутников Земли / С.Ф. Сингер. – М.:Наука, 1966.- 247 с.
2. *Иванов Н.М.* Баллистика и навигация космических аппаратов / Н.М. Иванов, Л.Н. Лысенко. – М.:Дрофа, 2004. – 544 с.
3. *Коваленко А.П.* Магнитные системы управления космическими аппаратами / А.П. Коваленко. – М.:Машиностроение, 1975. – 248 с.
4. *Ovchinnikov M.* Methods to control the attitude motion of a satellite by Earth's magnetic field usage / M. Ovchinnikov // Proceeding of the Euro-Asian Space Week on Cooperation in Space. – 1998. – P. 475-483.
5. *Колотов М.В.* Керування перетворювачаси системи орієнтації електронної платформи: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.09.12 / Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т". – К., 2010. – 194 с.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»