

УДК 004.94

**Ю.М. Бердник, О.І. Ролік**

## **МОДЕЛЬ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ДВИГУНА БПЛА**

*Анотація:* У статті розглянуто проблему керування безщітковим двигуном постійного струму, які використовуються в БПЛА. Синтезовано ШІМ-регулятор швидкості обертання двигуна БПЛА. Проведено моделювання, отримано графіки перехідних процесів. Досліджено вплив параметрів ШІМ-сигналу на якість керування. Виконання таких досліджень є актуальним в нинішніх умовах, оскільки виробники комерційних дронів не розголошують критерії налаштування ШІМ-регуляторів, а в науковій літературі приділено недостатньо уваги цій проблемі. Отримані результати можуть бути використані для проєктування власних систем керування двигунами дрона.

*Ключові слова:* безщітковий двигун, ШІМ, БПЛА.

### **Вступ**

У даний час БПЛА знайшли широке застосування у багатьох сферах людської діяльності. Як відомо, у БПЛА використовуються безщіткові двигуни постійного струму. Дуже поширеним є використання ШІМ для керування такими двигунами. Однак, виробники БПЛА не розголошують критерії вибору параметрів керуючого ШІМ-сигналу. У науковій літературі також ШІМ-керуванню двигуном БПЛА приділено недостатньо уваги. Так у роботі [1] розглянута лише модель ПІД-регулятора цілого БПЛА. Розглянуто питання керування креном дрона, однак не розроблено модель типового драйвера безщіткового двигуна дрона та не описано критерії налаштування його параметрів. У статті [2] розроблена модель такого двигуна, однак основна увага приділена проблемі виявлення його несправностей. Робота [3], як і [1] також присвячена лише ПІД-керуванню квадрокоптером. У статті [4] теж наведено модель двигуна, однак автори фокусуються на проблемі подолання впливу поривів вітру на якість керування польотом квадрокоптера. Таким чином у відкритому доступі відсутні як дослідження ШІМ-керування двигуном дрона, так і критерії вибору його параметрів. Це є значною перешкодою для проєктування власних БПЛА, що зараз потрібно в Україні. Тому задача моделювання ШІМ-керування двигуном БПЛА актуальна.

### **Основна частина**

Як відомо, для приведення у рух гвинтів дрона використовуються безщіткові двигуни постійного струму.

Рівняння, що описують динаміку струмів і напруг для обмоток кожної з фаз безщіткового двигуна постійного струму, мають вигляд [5,7]:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = U_a - e_a, \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = U_b - e_b, \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = U_c - e_c, \end{cases} \quad (1)$$

де  $L$  – індуктивність обмоток двигуна;  $R$  – опір обмоток двигуна;  $U_a, U_b, U_c$  – напруга, подана на кожну з фаз відповідно;  $i_a, i_b, i_c$  – струм кожної з фаз відповідно;  $e_a, e_b, e_c$  – зворотна ЕРС самоіндукції кожної з фаз відповідно.

Зворотна ЕРС є функцією кута повороту ротора двигуна та швидкості його обертання:

$$\begin{cases} e_a = C_e \sin\left(\frac{p}{2} \varphi\right) \omega, \\ e_b = C_e \sin\left(\frac{p}{2} \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \omega, \\ e_c = C_e \sin\left(\frac{p}{2} \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \omega, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\varphi$  – кут повороту ротора двигуна;  $\omega$  – кутова швидкість обертання двигуна;  $C_e$  – електромагнітна стала двигуна;  $p$  – число пар полюсів двигуна.

Рівняння для загального моменту двигуна мають вигляд [5,6,7,8]:

$$\begin{cases} M = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega}, \\ M = J \frac{d\omega}{dt} + \mu \omega + M_n, \end{cases} \quad (3)$$

де  $M_n$  – момент навантаження;  $M$  – загальний момент двигуна;  $J$  – момент інерції ротора двигуна з усіма рухомими частинами, включаючи гвинт дрона;  $\mu$  – коефіцієнт тертя в підшипниках двигуна.

Оскільки, момент інерції ротора двигуна набагато менший за момент інерції гвинта дрона, то в подальших розрахунках ним можна знехтувати. Так само можна знехтувати і тертям в підшипниках.

Вважаючи у системі (1)  $U - e$  входом, а  $i$  - виходом, а в системі (3)  $M - M_n$  – входом, а  $\omega$  – виходом, після перетворень Лапласа можна отримати наступну систему передавальних функцій безщіткового двигуна постійного струму:

$$\begin{cases} W_e = \frac{1}{Ls + R}, \\ W_m = \frac{1}{Js + \mu}, \end{cases} \quad (4)$$

де  $W_e$  – передавальна функція, що відображає динаміку електричних процесів у

кожній з обмоток двигуна;  $W_m$  – передавальна функція, що відображає динаміку механічних процесів у двигуні.

На рис. 1 наведено модель безщіткового двигуна постійного струму та його драйвера у середовищі Matlab/Simulink. У даній схемі для моделювання динаміки перехідних процесів у двигуні використані передавальні функції системи (4). Використано синусоїдальну модель зворотної ЕРС. У моделі використано параметри поширеного двигуна БПЛА:  $R = 0,5\Omega$ ;  $L = 0,52\text{мГн}$ ;  $p = 6$ ;  $J = 0,003\text{кг} \cdot \text{м}^2$ . Момент інерції  $J = 0,003\text{кг} \cdot \text{м}^2$  двигун має разом з гвинтом. Використано драйвер двигуна без датчиків Холла. Поточне положення ротора відстежується за допомогою схеми виявлення переходу через нуль зворотної ЕРС двигуна [6].

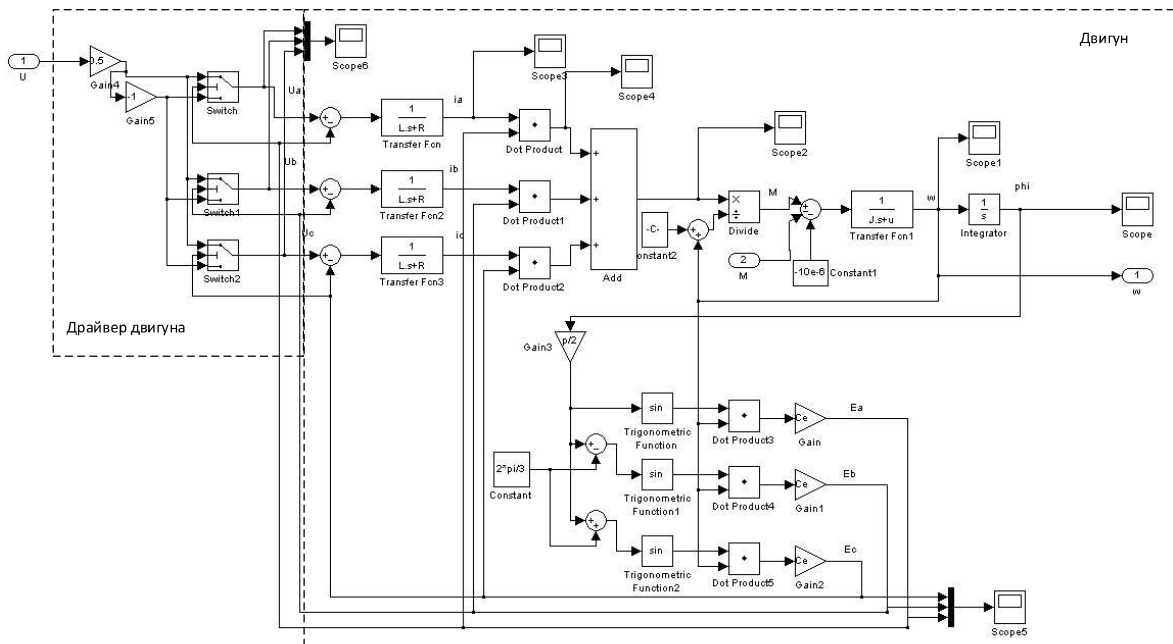


Рисунок 1. Модель двигуна БПЛА з драйвером

На рис. 2 наведено модель системи керування двигуном, яка була розроблена для дослідження особливостей широтно-імпульсного керування двигуном БПЛА та подальшого формулювання критеріїв налаштування регулятора такого типу. Порівняно роботу двигуна з ШІМ-регулятором та без нього. Амплітуда ШІМ-сигналу складає  $U = 15\text{В}$ , а його частота  $f = 10\text{Гц}$ . У момент часу  $4\text{с}$  на двигун подається момент навантаження  $M = 0,5\text{Н}\cdot\text{м}$ . Задана кутова швидкість обертання двигуна  $w = 100\text{рад/с}$ .

На графіках перехідних процесів (рисунок 3) видно, що без регулятора двигун обертається зі швидкістю майже  $w \approx 200 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \approx 2000 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ , а під навантаженням зменшує швидкість до  $w \approx 120 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

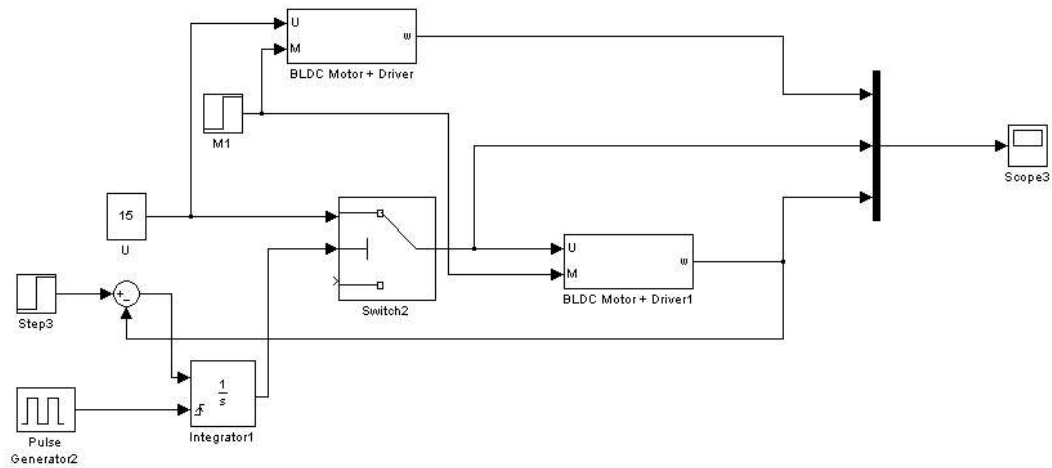


Рисунок 2. Модель системи керування двигуном БПЛА з ШІМ-регулятором та без нього

Таким чином показники якості керування в системі без регулятора є незадовільними. Усталена похибка складає майже 100%, крім того система не здатна компенсувати вплив зовнішніх збурень. Тобто очевидною є необхідність регулятора.

Також на рис. 3 наведено графік керуючого ШІМ-сигналу, на якому видно зміну шпаруватості імпульсів у відповідні моменти часу, зокрема при подачі навантаження на вал двигуна. Видно, що система із ШІМ-регулятором достатньо швидко реагує на зміну навантаження на двигун, змінюючи шпаруватість імпульсів, що дозволяє підтримувати задану кутову швидкість обертання. Цей графік підтверджує доцільність використання регулятора даного типу у системах керування БПЛА. Цей факт, а також простота і дешевизна регуляторів цього типу робить очевидними переваги вибору саме ШІМ-регуляторів для керування двигунами дронів.

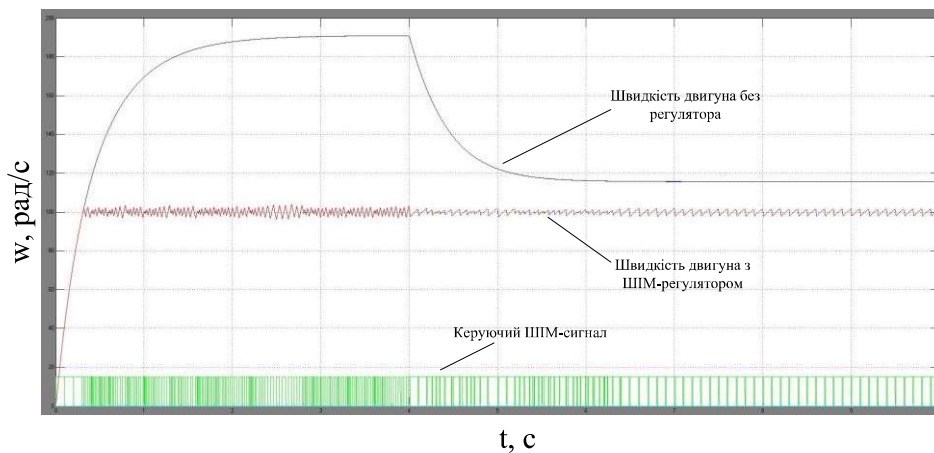


Рисунок 3. Графіки швидкості двигуна та керуючого ШІМ-сигналу

На рис. 4 наведено графіки напруги керування та зворотної ЕРС на кожній обмотці двигуна.

На рис. 5 наведено модель дослідження впливу частоти ШІМ на якість керування двигуном. Щоб розділити зображення графіків кутової швидкості двигуна на різних частотах ШІМ, їх помножено на різні коефіцієнти.

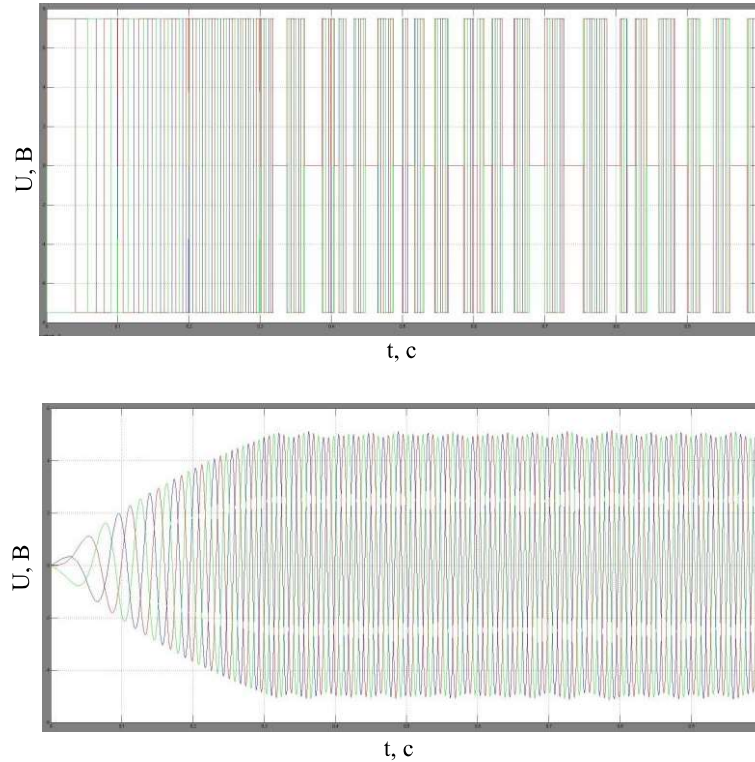


Рисунок 4. Графіки напруги керування та зворотної ЕРС на кожній обмотці двигуна

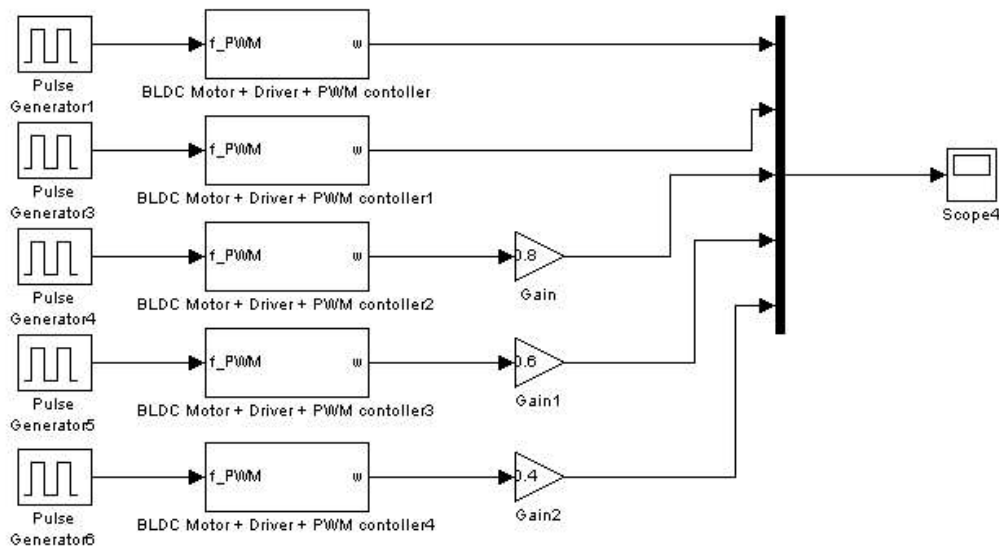


Рисунок 5. Модель дослідження впливу частоти ШІМ на якість керування двигуном

З рис. 6 видно, що при частоті ШІМ  $f = 1\text{кГц}$  перегулювання складає 0,1%. Значення перегулювання на різних частотах ШІМ наведено в табл. 1.

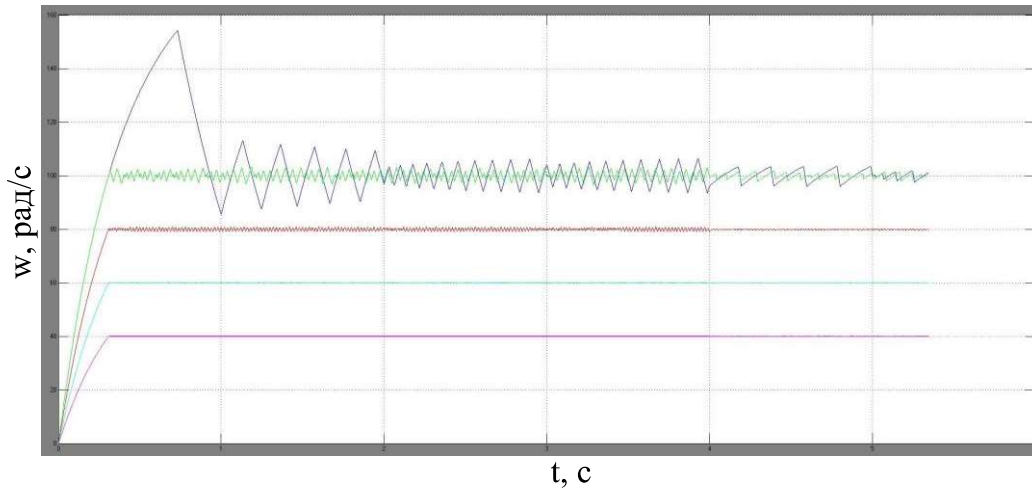


Рисунок 6. Графіки дослідження впливу частоти ШІМ на якість керування двигуном

Таблиця 1. Залежність перегулювання від частоти ШІМ

Частота ШІМ, Гц	Перегулювання, %
1	55
10	2
100	1
1000	0,15
10000	0,01

На рис. 7 наведено графік залежності перегулювання від частоти ШІМ. З графіка видно, що зі збільшенням частоти ШІМ перегулювання зменшується експоненційно до нуля.



Рисунок 7. Графік залежності перегулювання від частоти ШІМ

Дослідження виконувались у межах проєкту Національного фонду досліджень України №2023.04/0077 «Дрон для забору проб води».

### Висновки

У статті отримано модель безщіткового двигуна постійного струму, які широко використовуються в БПЛА. Розроблено моделі керування швидкістю такого двигуна за допомогою ШІМ. Досліджено вплив параметрів ШІМ-сигналу на якість керування. З'ясовано, що зі збільшенням частоти ШІМ перерегулювання зменшується експоненційно до нуля. Таким чином оптимальними частотами ШІМ є частоти орієнтовно 1-5кГц.

Отримані результати можуть бути використані для проєктування власних систем керування двигунами дрона, що необхідно в умовах зростання впливу дронів як у військовій сфері, так і різноманітних цивільних прикладних задачах.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhou, Lirong, Pljonkin, Anton and Singh, Pradeep Kumar. "Modeling and PID control of quadrotor UAV based on machine learning" Journal of Intelligent Systems, vol. 31, no. 1, 2022, pp. 1112-1122. <https://doi.org/10.1515/jisys-2021-0213>
2. Lee, Jun-yong, et al. "Fault classification and diagnosis of UAV motor based on estimated nonlinear parameter of steady-state model." Int. J. Mech. Eng. Robot. Res 10.1 (2020): 22-31.
3. Bouaiss, Oussama, Raihane Mechgoug, and Riadh Ajgou. "Modeling, control and simulation of quadrotor UAV." 2020 1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP). IEEE, 2020.
4. Li, Fan, et al. "Dynamic modeling, simulation, and parameter study of electric quadrotor system of Quad-Plane UAV in wind disturbance environment." International journal of micro air vehicles 13 (2021): 17568293211022211.
5. Tibor, Balogh, Viliam Fedak, and František Durovský. Modeling and simulation of the BLDC motor in MATLAB GUI. 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 2011.
6. Yedamale, Padmaraja. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals. Microchip Technology Inc 20.1 (2003): 3-15.
7. Elakkia, E., et al. Design and modelling of bldc motor for automotive applications. International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications 1.1 (2015): 42-48.
8. Налева, Г. В., Онищенко О. А. Побудова математичних моделей безконтактних електродвигунів суднових електроприводів на основі структурних схем. Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика: 48.