

УДК 62.83.52

О.А. Дерев'янка, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-3602-2055)

О.М. Литвяк, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-0242-1859)

В.О. Дурєєв, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-7981-6779)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОГО УПРАВЛІННЯ ІНЕРЦІЙНИМИ ОБ'ЄКТАМИ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ

Дана робота присвячена розробці структури та оцінці точності застосування широтно-імпульсно модульованих сигналів при управлінні інерційними об'єктами (насосами, ресиверами, змішувачами і ін.) в перспективних адаптивних системах безпеки. Розроблено структурно-динамічну модель перетворювача, що дозволяє перетворювати неперервний нормований аналоговий управляючий сигнал в пропорційний широтно-імпульсний модульований сигнал. Отримано та наведено приклад широтно-імпульсної модуляції вихідного сигналу з урахуванням частоти вхідного сигналу. Виконано дослідження помилки сигналу інерційного виконавчого механізму з широтно-імпульсним управлінням. Розроблено структурно-динамічну модель перетворювача широтно-імпульсного модульованого сигналу з урахуванням моделі інерційного пропорційного виконавчого механізму. Виконано дослідження помилки та розкиду вихідного сигналу інерційного виконавчого механізму з широтно-імпульсним управлінням в залежності від величини управляючого вхідного сигналу. Наведено припустимі значення вхідного нормованого сигналу та зміну скважності вихідного сигналу. На прикладі розрахунків показано, що величина розкиду значно залежить від співвідношення частоти широтно-імпульсного модульованого сигналу та постійної часу виконавчого механізму. Збільшення частоти широтно-імпульсного модульованого сигналу або постійної часу виконавчого механізму приводить до зменшення розкиду вихідного сигналу, що продемонстровано у логарифмічних координатах. Розроблено та наведено рекомендації щодо вибору параметрів роботи елементів автоматичних систем: постійної часу виконавчого механізму та частоти широтно-імпульсного сигналу.

Ключові слова: адаптивна система безпеки, інерційність, помилка регулювання, об'єкт управління, автоматична система управління, виконавчий механізм, скважність, широтно-імпульсна модуляція

1. Вступ

В даний час, запобігання і ліквідація надзвичайних ситуацій, пов'язаних з горінням або викидом речовин, які становлять загрозу для повітряної, водяний або земельної середовища є важливою актуальною науково-практичною проблемою. Сучасні системи безпеки дозволяють домогтися зниження часу на виявлення, локалізацію та ліквідацію таких надзвичайних ситуацій. Однак, застосування дорогих компонентів – добавок, піноутворювачів, спеціальних газових вогнегасних складів, речовин для осадження і нейтралізації агресивних і токсичних продуктів, значно здорожує або ускладнює ліквідацію таких надзвичайних ситуацій в повному обсязі, особливо якщо запас таких компонентів обмежений. Так збільшення зони горіння призводить до спрацьовування додаткових органів системи пожежогасіння, що вимагає як зміни режиму роботи основного водоживлювача, так і додаткового збільшення подачі піноутворювача і добавок до рідкої вогнегасної речовини системою дозування. Підтримка необхідної концентрації добавок і піноутворювача в рідкому вогнегасній речовині, при обмеженому запасі добавок, дозволить локалізувати і ліквідувати надзвичайну ситуацію в повному обсязі.

Для зниження витрат і раціонального використання дорогих компонентів, застосовуються клапанні виконавчі механізми, що працюють в імпульсному ре-

жимі. Алгоритм і режим їх спрацьовування визначається тривалістю імпульсу, яка формується блоком перетворення від керуючого вхідного сигналу, що залежить від інтенсивності протікання надзвичайної ситуації.

З цієї причини системи безпеки все ширше застосовують в своїй роботі цифрові технології з широтно-імпульсними керуючими сигналами. Це стосується не тільки автоматичних систем пожежної сигналізації та оповіщення, а й гідромеханічних систем пожежогасіння. Ще більш актуальними стають питання не просто детермінованого включення систем безпеки при виникненні надзвичайної ситуації, а саме управління елементами адаптивних систем безпеки в умовах зміни інтенсивності протікання надзвичайної ситуації.

Таким чином, існує проблема розробки адаптивних систем ліквідації надзвичайних ситуацій, що включають в себе інерційні об'єкти з широтно-імпульсним управлінням.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В сучасних автоматичних системах управління, які використовують цифрові обчислювальні пристрої, широко застосовуються виконавчі елементи у вигляді клапанних керуючих механізмів і асинхронних електричних двигунів, що працюють в імпульсному режимі. Для відтворення широтно-імпульсної модуляції вихідного сигналу розроблена достатня кількість електронних схем, які застосовуються для управління таких електричних виконавчих механізмів.

Так в [1] розглянуто вимір вихідного сигналу інерційного виконавчого механізму при ризькій зміні параметрів вхідного впливу. В якості виконавчого приладу розглядалася модель клапанного керуючого механізму, що працює в заданому діапазоні зміни вхідного сигналу, характерному широтно-імпульсній модуляції. Проте моделі блоку широтно-імпульсної модуляції вхідного сигналу та параметрів виконавчого механізму не наведено.

В [2] розглянуто вибір робочих параметрів виконавчих механізмів та шляхи контролю стійкості їх роботи при зміні рівнів вхідних сигналів. Проте, структурно-динамічну схему блоку широтно-імпульсної модуляції не наведено, а зміна загрузочних параметрів приладів та їх адаптація до характеристик реальних виконавчих механізмів не представлена.

В [3] наведено приклади математичних моделей і електронні схеми машин змінного струму для задач управління. Розглянуто принцип широтно-імпульсної модуляції, який представляє собою зміну тривалості імпульсу сигналу в залежності від величини керуючого сигналу. При цьому, відношення тривалості імпульсу сигналу до періоду проходження імпульсів називається скважністю. Розглянуто автономні інвертори з широтно-імпульсною модуляцією напруги, модифіковані алгоритми і режими управління інверторами з широтно-імпульсною модуляцією, системи широтно-імпульсної модуляції струму. У вигляді виконавчих механізмів розглядаються асинхронні двигуни. Але при цьому не розглядаються структурно-динамічні моделі елементів, що реалізують широтно-імпульсну модуляцію для керуючих сигналів.

В [4] була розглянута можливість застосування у якості блоку широтно-імпульсної модуляції випрямлячі на основі польових транзисторів. В якості переваги їх застосування відмічено висока потужність та швидкість перемикавання. Проте їх застосування формує значні поміхи для вхідного сигналу, що впливає на роботу блоку широтно-імпульсної модуляції.

В [5] запропонована аналітична модель роботи трьохрівневого широтно-імпульсного модульованого перетворювача, в умовах зміни рівня вхідного сигналу. Проте, для надійної роботи такого модулятора, його структура повинна мати додатковий контур управління вхідним сигналом. А принцип дії заснований на усередненні значенні управляючих сигналів і точної структурної схеми не містить.

В [6] наведено схеми однофазного широтно-імпульсного модульованого перетворювача та представлено моделювання їх роботи за один цикл. Показано шляхи зменшення втрат перетворювача за рахунок комутації складових елементів. Проте застосування інерційної моделі виконавчого механізму не розглядалося

В [7] визначено можливість застосування асинхронних електроприводів виконані на основі автономного інвертора струму з широтно-імпульсною модуляцією в загальнопромислових електроприводах. Показано недоліки асинхронних електроприводів на основі автономного інвертора струму з широтно-імпульсною модуляцією, які полягають в низькому значенні мережевого коефіцієнта потужності і збільшеному значенні коефіцієнта гармонік струму мережі. Але, параметричні дослідження точності відтворення виконавчим механізмом керуючого сигналу в роботі не розглядалися. Крім того, не розглядаються структурно-динамічні моделі елементів, що реалізують широтно-імпульсну модуляцію керуючих сигналів.

В [8] представлено метод виявлення несправностей елементів блоку широтно-імпульсної модуляції. Проте, в роботі не розглядаються структурно-динамічні моделі елементів, що реалізують широтно-імпульсну модуляцію керуючих сигналів, а тип та параметри інерційний виконавчий механізм, що підлягає управлінню, не наведено.

При моделюванні роботи виконавчих механізмів широко застосовуються пакети програм Maple, MatCad, VisSim [9], що дозволяють виконувати дослідження характеристик динамічних систем. Однак в зазначених пакетах не представлені елементи, що дозволяють моделювати сигнали широтно-імпульсної модуляції в залежності від величини аналогового сигналу, що управляє.

В [10] представлений процес формування чотирирівневого інвертора напруги на основі комп'ютерної моделі інвертора в середовищі Matlab Simulink. Розглянуто поліпшення характеристик перетворювача частоти шляхом використання чотирирівневого інвертора напруги з «плаваючими» конденсаторами. Запропоновано і апробовано алгоритмічний метод стабілізації напруг на «плаваючих» конденсаторах. Але структурно-динамічні моделі елементів, що реалізують широтно-імпульсну модуляцію керуючих сигналів, не розглядаються.

Аналіз досліджень і публікацій показав, що застосування виконавчих механізмів у вигляді клапанів і асинхронних електричних двигунів, які працюють в імпульсному режимі, забезпечує зручне сполучення цифрових обчислювальних машин з гідромеханічними регулюючими органами сучасних технічних засобів управління систем безпеки.

Але разом з тим, не розкрита проблема впливу інтенсивності протікання надзвичайної ситуації на алгоритм спрацьовування і конструктивні параметри виконавчих механізмів систем її ліквідації.

Невирішеною частиною проблеми є відсутність досліджень з моделювання сигналів широко-імпульсної модуляції в залежності від величини аналогового сигналу, що управляє. Крім того, відсутні методи вибору параметрів сигналу широтно-імпульсної модуляції і конструктивних параметрів виконавчих механізмів для отримання заданих статичних властивостей елементів систем ліквідації надзвичайних ситуацій.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є дослідження впливу параметрів широтно-імпульсного модульованого сигналу на точність управління інерційним об'єктом адаптивної системи безпеки.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити структурно-динамічну схему блоку широтно-імпульсної модуляції;
- дослідити вплив широтно-імпульсної модуляції на вихідний сигнал інерційного об'єкту.

4. Методи досліджень впливу широтно-імпульсної модуляції на інерційний об'єкт

Структурно-динамічне моделювання широтно-імпульсного керуючого сигналу виконано з використанням математичного пакета прикладних програм.

Дослідження впливу параметрів широтно-імпульсного модульованого сигналу на вихідний сигнал інерційного об'єкта адаптивної системи безпеки виконано на основі параметричних досліджень точності відтворення виконавчим механізмом керуючого сигналу.

5. Розробка структурно-динамічної схеми блоку широтно-імпульсної модуляції

Для розробки структурно-динамічної схеми блоку, що забезпечує перетворення аналогового сигналу в пропорційний сигнал широтно-імпульсної модуляції, використовується математичний пакет прикладних програм VisSim.

На рис. 1 представлена структурно-динамічна схема блоку перетворення аналогового вхідного сигналу X в вихідний сигнал Y з пропорційною широтно-імпульсною модуляцією.

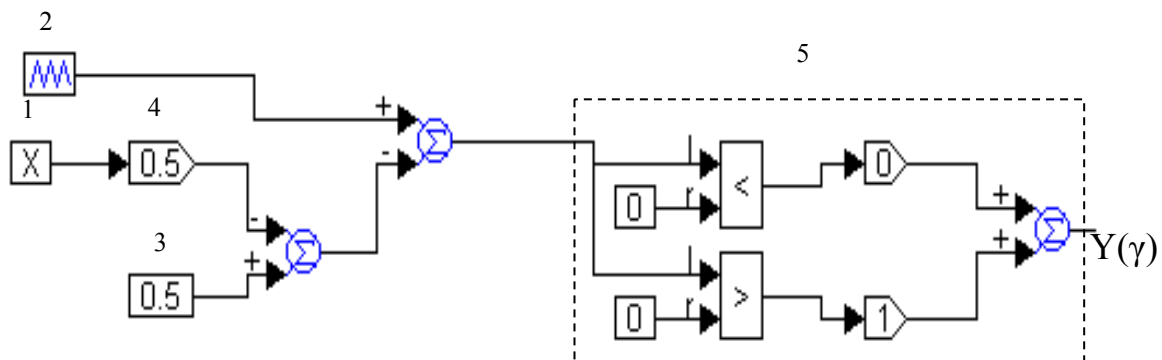


Рис. 1. Структурно-динамічна схема блоку широтно-імпульсної модуляції: 1 – блок завдання величини вхідного сигналу X ; 2 – блок формування пілкоподібного сигналу з заданою частотою ω ; 3 – блок формування рівноважної скважності, що дорівнює 50 %; 4 – блок нормування вхідного сигналу; 5 – блок вихідного сигналу Y широтно-імпульсної модуляції

Результати роботи блоку вихідного сигналу Y широтно-імпульсної модуляції для виконуючого механізму ВМ-47 показані на рис. 2:

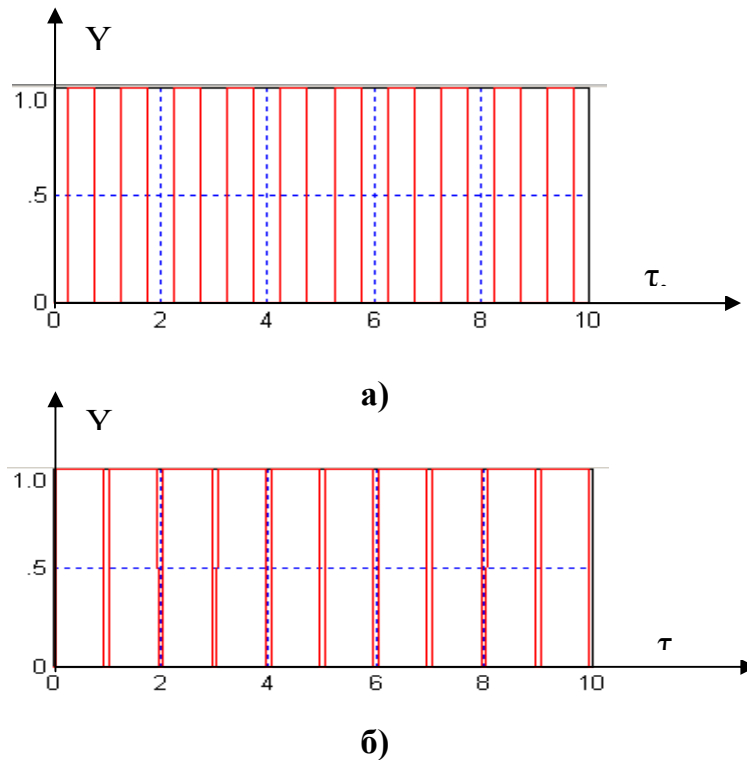


Рис. 2. Результати роботи блоку вихідного сигналу Y широтно-імпульсної модуляції:
а) $\omega = 1$; $X = 0$; $\gamma = 0,5$; б) $\omega = 1$; $X = 0,8$; $\gamma = 0,8$

Широтно-імпульсна модуляція вихідного сигналу представлена на рис. 3:

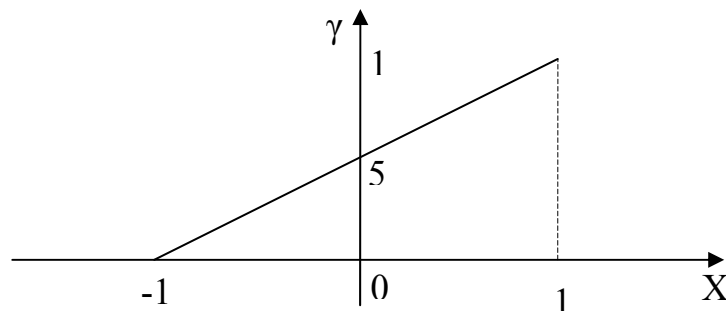


Рис. 3. Широтно-імпульсна модуляція вихідного сигналу

6. Дослідження впливу широтно-імпульсної модуляції на вихідний сигнал інерційного об'єкту

Застосування широтно-імпульсної модуляції сигналу призводить до коливань вихідного сигналу виконавчого механізму на рівноважних режимах.

Позначимо відносну величину вихідного сигналу виконавчого механізму. Тоді, максимальний розкид вихідного сигналу щодо точки рівноваги визначимо за формулою:

$$\bar{\sigma} = \left| \bar{y}_{\max} - \bar{y}_{\min} \right|. \quad (1)$$

При проектуванні технічних засобів, що забезпечують задану точність управління системами безпеки, необхідно знати залежність розкиду вихідного сигналу виконавчого механізму від конструктивних параметрів застосовуваних елементів. Виконаємо параметричні дослідження статичних характеристик інер-

ційного пропорційного виконавчого механізму двосторонньої дії з широтно-імпульсною модуляцією керуючого сигналу.

Передавальна функція інерційного пропорційного виконавчого механізму має вигляд:

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1}, \quad (2)$$

де K – коефіцієнт посилення виконавчого механізму; T – постійна часу виконавчого механізму, с.

Для формування широтно-імпульсної модуляції сигналу, скористаємось структурно-динамічною схемою рис. 1 з урахуванням (2), рис. 4:

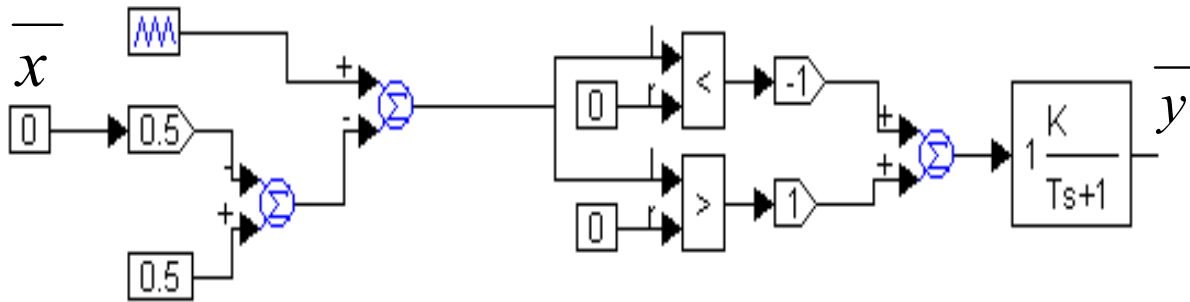


Рис. 4. Структурно-динамічна модель блоку широтно-імпульсної модуляції з виконавчим механізмом: \bar{x} – вхідний аналоговий відносний сигнал; \bar{y} – вихідний відносний сигнал

Для спрощення дослідження і аналізу отриманих результатів, приймаємо коефіцієнт посилення виконавчого механізму: $K = 1$.

7. Результати досліджень впливу широтно-імпульсної модуляції на сигнал виконавчого механізму

На рис. 5 показано отриману величину вихідного сигналу \bar{y} при заданих значеннях частоти f широтно-імпульсної модуляції сигналу та інерційності T виконавчого пристрою, при нульовому вхідному сигналі X .

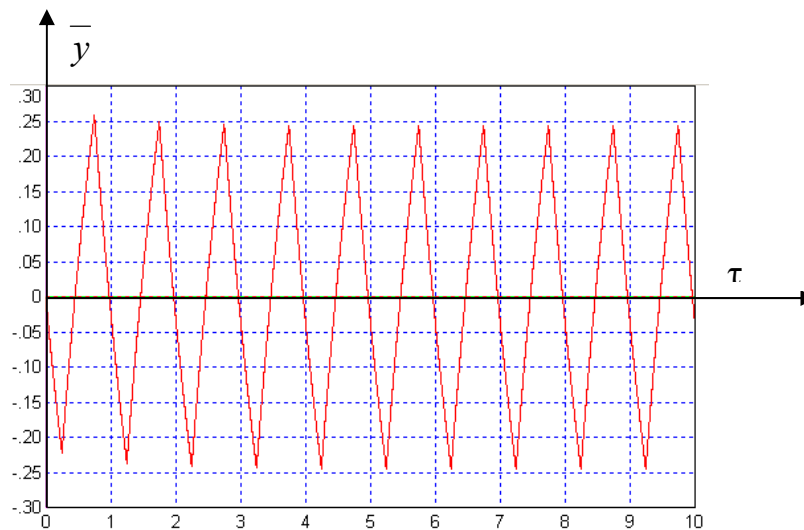


Рис. 5. Величина вихідного сигналу \bar{y} при заданих значеннях частоти широтно-імпульсної модуляції сигналу та інерційності виконавчого пристрою: $\bar{x} = 0$; $f = 1$, Гц; $T = 1$, с.

Залежність розкиду $\bar{\sigma}$ вихідного сигналу від величини керуючого сигналу \bar{X} показана на рис. 6.

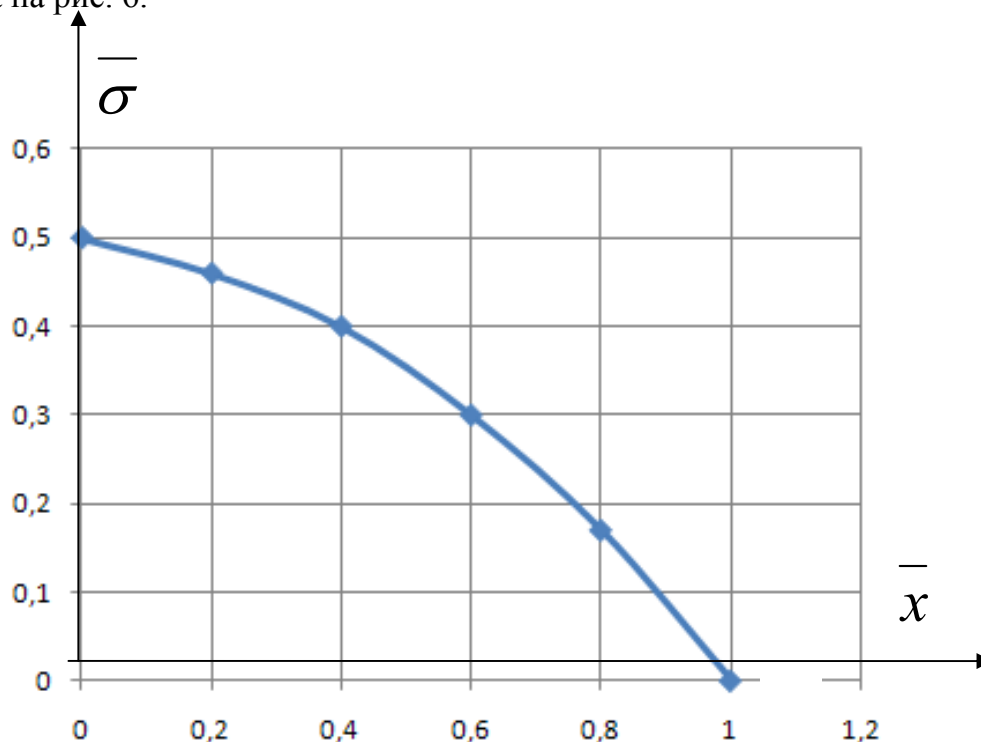


Рис. 6. Залежність розкиду вихідного сигналу від вхідного сигналу

Залежність розкиду $\bar{\sigma}$ вихідного сигналу від інерційності T виконавчого механізму та частоти коливань f вхідного сигналу в логарифмічних координатах представлено на рис. 7.

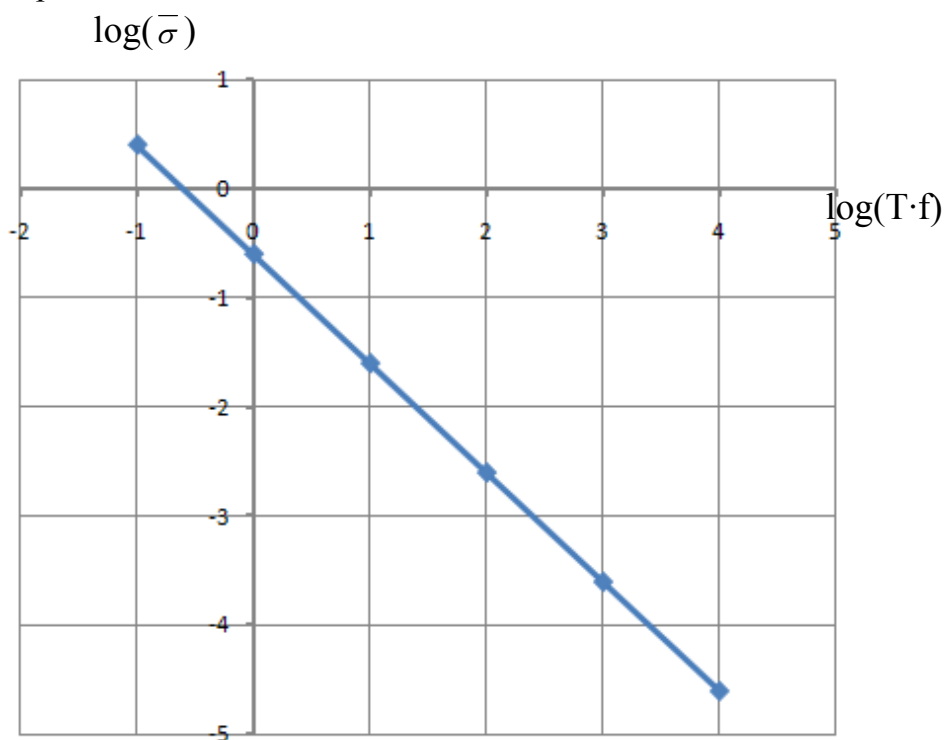


Рис. 7. Залежність розкиду вихідного сигналу від управляючого сигналу в логарифмічних координатах

8. Обговорення результатів дослідження впливу широтно-імпульсної модуляції на вихідний сигнал

Як показали проведені дослідження, застосування широтно-імпульсної модуляції керуючого сигналу для управління інерційним виконуючим механізмом призводить до коливань вихідного сигналу виконавчого механізму на рівноважних режимах (рис. 5). При цьому розкид вихідного сигналу σ залежить від величини вхідного сигналу. При нульовому сигналі на вході величина розкиду вихідного параметру максимальна, а при максимальному сигналі на вході – мінімальна (рис. 6). Крім того, величина розкиду вихідного сигналу σ суттєво залежить від співвідношення частоти f широтно-імпульсної модуляції управляючого сигналу та постійної часу T виконуючого механізму. Показано, що величина σ залежить від безрозмірного критерію $f \cdot T$ (рис. 7). З наведеної залежності випливає, що при зменшенні інерційності виконуючого механізму необхідно пропорційно зменшувати частоту широтно-імпульсного модульованого сигналу для зберігання заданої величини розкиду вихідного сигналу.

9. Висновки

1. Розроблено структурно-динамічну модель перетворювача, що дозволяє перетворювати неперервний нормований аналоговий управляючий сигнал в пропорційний широтно-імпульсний модульований сигнал. Модель що розроблено дозволяє моделювати широтно-імпульсні модульовані керуючі сигнали реальних динамічних систем. Отримано та наведено приклад широтно-імпульсної модуляції сигналу для управління електромагнітним клапаном ВМ-47.

2. Виконано дослідження помилки та розкиду вихідного сигналу інерційного виконавчого механізму з широтно-імпульсним управлінням в залежності від величини управляючого вхідного сигналу. Показано, що величина розкиду значно залежить від співвідношення частоти широтно-імпульсного модульованого сигналу та постійної часу виконавчого механізму. Наведено рекомендації щодо вибору параметрів роботи елементів автоматичних систем постійної часу виконавчого механізму та частоти широтно-імпульсного сигналу. Розроблено безрозмірний критерій який дозволяє обирати параметри широтно-імпульсного модульованого сигналу для управління інерційним об'єктом при заданій величині розкиду вихідного сигналу. Залежність розкиду вихідного сигналу інерційного виконуючого механізму від безрозмірного критерію продемонстровано у логарифмічних координатах.

Література

1. Passenbrunner T. E., Sassano M., Trogmann H., del Re L., Paulweber M., Schmidt M., Kokal H. Inverse Torque Control of Hydrodynamic Dynamometers for Combustion Engine Test Benches // Proceedings of the American Control Conference. 2011. P. 4598–4603.

2. Torabnia S., Banazadeh A. Development of a water brake dynamometer with regard to the modular product design methodology, Proceedings of the ASME 2014 // 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. 2014. № 15. P. 20229–20232.

3. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковым преобразователями частоты // УРО РАН. 2010. 654 с.

4. Li Z., Wang Z., Zheng T., Li H., Huang, B., Shao T. Efficiency Optimization for All-Silicon Carbide (SiC) PWM Rectifier Considering the Impact of Gate-Source Voltage Interference. *Energies* 2020. 13. 1421.

5. Lee K.-J. Analytical Modeling of Neutral Point Current in T-type Three-level PWM Converter. *Energies* 2020. № 13. P. 1320–1324.

6. Song M.-S., Cho I.-H., Lee, J.-B. $\pm 180^\circ$ Discontinuous PWM for Single-Phase PWM Converter of High-Speed Railway Propulsion System. *Energies* 2020. № 13. 1550.

7. Косенко И. А. Асинхронный электропривод с автономным инвертором тока и усовершенствованным управлением // Вісник КНУТД. Машини легкої промисловості, обладнання та системи управління. 2012. № 1. С 16–21.

8. Abo-Khalil A. G. Al-Qawasmi A.-R. Eltamaly A. M. Yu B. G. Condition Monitoring of DC-Link Electrolytic Capacitors in PWM Power Converters Using OBL Method. *Sustainability* 2020. № 12. P. 719–726.

9. Дьяконов В. П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование // СОЛОН-Пресс. 2015. 384 с.

10. Кудрявцев А. В. Исследование преобразователя частоты регулируемого электропривода на базе четырехуровневого инвертора напряжения // Записки Горного института. 2017. Т. 173. С. 86–90.

O. Derevyanko, PhD, Associate Professor, Head of Department

O. Lytviak, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

V. Durieiev, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

RESEARCH OF APPLICATION OF WIDE-PULSE CONTROL OF INERTIAL OBJECTS OF ADAPTIVE SAFETY SYSTEMS

This work is devoted to developing the structure and assessing the accuracy of using pulse-width modulated signals for controlling inertial objects (pumps, receivers, mixers, etc.) in advanced adaptive security systems. A structural-dynamic model of the converter has been developed, which makes it possible to turn a continuous normalized analogue control signal into a proportional pulse-width modulated signal. An example is obtained and given of pulse-width modulation of the output signal, taking into account the frequency of the input signal. A study was made of the signal error of the inertial actuator with pulse-width control. A structural-dynamic model of a pulse-width modulated signal converter has been developed, based on a model of inertial proportional actuator. Errors and scatter of the output signal of the inertial actuator with pulse-width control depending on the magnitude of the control input signal were studied. The acceptable values of the input normalized signal and the change in the duty cycle of the output signal are given. On the example of calculations it is shown that the scatter value significantly depends on the ratio of the frequency of the pulse-width modulated signal and the time constant of the actuator. An increase in the frequency of the pulse-width modulated signal or the time constant of the actuator leads to a decrease in the spread of the output signal shown in logarithmic coordinates. Recommendations on the selection of the operating parameters of elements of automatic systems are developed and given: the time constant of the actuator and the frequency of the pulse-width signal.

Keywords: adaptive security system, inertia, regulation error, control object, automatic control system, actuator, duty cycle, pulse-width modulation

References

1. Passenbrunner, T. E., Sassano, M., Trogmann, H., del Re L., Paulweber, M., Schmidt, M., Kokal, H. (2011). Inverse Torque Control of Hydrodynamic Dynamometers for Combustion Engine Test Benches. *Proceedings of the American Control Conference*, 4598–4603.

2. Torabnia, S., Banazadeh, A. (2014). Development of a water brake dynamometer

with regard to the modular product design methodology. 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, doi: 10.1115/esda 2014–20232.

3. Shrejner R. T. Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovym preobrazovatel'nyimi chastoty (2010). URO RAN, 654.

4. Li, Z., Wang, Z., Zheng, T., Li, H., Huang, B., Shao, T. (2020). Efficiency Optimization for All-Silicon Carbide (SiC) PWM Rectifier Considering the Impact of Gate-Source Voltage Interference. *Energies*, 13, 1421.

5. Lee, K.-J. (2020). Analytical Modeling of Neutral Point Current in T-type Three-level PWM Converter *Energies*, 13, 1320–1324.

6. Song, M.-S.; Cho, I.-H.; Lee, J.-B. (2020). $\pm 180^\circ$ Discontinuous PWM for Single-Phase PWM Converter of High-Speed Railway Propulsion System. *Energies*, 13, 1550.

7. Kosenko, I. A. (2012). Asinkhronnyj elektroprivod s avtonomnym invertorom toka i usovershenstvovannym upravleniem. *Visnik KNUTD. Mashini legkoyi promislovosti, obladnannya ta sistemi upravlinnya*, № 1, 16–21.

8. Abo-Khalil, A. G., Al-Qawasmi, A.-R., Eltamaly, A. M., Yu, B.G. (2020). Condition Monitoring of DC-Link Electrolytic Capacitors in PWM Power Converters Using OBL Method. *Sustainability*, 12, 719–726.

9. Dyakonov, V. P. (2015). *VisSim+Mathcad+MATLAB. Vizual'noe matematicheskoe modelirovanie SOLON-Press*, 384.

10. Kudryavtsev, A. V. (2017). Issledovanie preobrazovatelya chastoty reguliruemogo elektroprivoda na baze chety'rekhurovneвого invertora napryazheniya. *Zapiski Gornogo instituta*, 173, 86–90.

Надійшла до редколегії: 13.02.2020

Прийнята до друку: 24.02.2020