ОПТИМІЗАЦІЯ НЕЛІНІЙНИХ ІМПУЛЬСНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З АСТАТИЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

О. Ю. Синявський, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

В. Г. Кістеня, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Н. О. Соломко, викладач-методист

ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний коледж»

E-mail: sinyavsky2008@ukr.net

Анотація. Нині нелінійні імпульсні системи автоматичного регулювання набули значного поширення, тому виникає необхідність у розробці методів їх дослідження.

Імпульсні регулятори створюються на базі позиційних з додаванням імпульсних переривників. Їх можна представити у вигляді послідовно з'єднаних нелінійного елемента, найпростішого імпульсного елемента та формуючого кола.

Метою дослідження було визначення оптимальних параметрів налагодження релейно-імпульсного регулятора для астатичного об'єкта з запізненням.

При визначенні параметрів налагодження релейно-імпульсного регулятора за показник якості при оптимізації системи автоматичного регулювання було прийняте сумарне квадратичне відхилення. Застосувавши цей критерій, визначається тривалість імпульсу регулятора.

Інтервал квантування за часом визначається із умови забезпечення абсолютної стійкості системи автоматичного регулювання.

Були отримані аналітичні залежності для визначення тривалості імпульсу та інтервалу квантування за часом, які дають можливість визначити параметри налагодження релейно-імпульсного регулятора для астатичного об'єкта першого порядку із запізненням. При цьому забезпечується мінімальна похибка регулювання, а система регулювання є стійкою.

Ключові слова: *нелінійна імпульсна система автоматичного регулювання, релейно-імпульсний регулятор, тривалість імпульсу, інтервал квантування за часом, стійкість системи автоматичного регулювання*

Актуальність. Нині імпульсні системи автоматичного регулювання набули значного поширення, що обумовлене широким застосуванням мікропроцесорної техніки.

Імпульсний закон регулювання застосовується для об'єктів, які мають великий час запізнення. Такі системи автоматичного регулювання застосовуються, наприклад, для автоматичного регулювання рН та концентрації розчинів мінеральних добрив у змішувальних резервуарах [1, 2].

Тому розробка методів дослідження нелінійних імпульсних систем автоматичного регулювання є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Імпульсні регулятори створюються на базі позиційних з додаванням імпульсних переривників [3]. Перевагою такою релейно-імпульсного регулятора є те, що він дає можливість обслуговувати декілька об'єктів управління, маючи всі властивості позиційного регулятора [4].

Релейно-імпульсний регулятор можна представити у вигляді послідовно з'єднаних нелінійного елемента, найпростішого імпульсного елемента та формуючого кола .

Методики визначення оптимальних параметрів релейно-імпульсних регуляторів не існує. Нелінійні імпульсні системи автоматичного керування розраховують, користуючись теорією нелінійних імпульсних систем, викладену у монографії Я. З. Ципкіна [4].

Мета дослідження – визначити оптимальні параметри налагодження релейно-імпульсного регулятора для астатичного об'єкта з запізненням.

Матеріали і методи дослідження. Найчастіше астатичний об'єкт апроксимується інтегрувальною і запізнювальною ланкою [5]:

$$W(p) = \frac{K_{ок}}{p} e^{-p\tau}, \quad (1)$$

де $K_{ок}$ – коефіцієнт передачі об'єкта керування; τ – час запізнення, с.

Рівняння нелінійних імпульсних систем складається із [4]:

- рівняння нелінійного елемента:

$$X_1(t) = \begin{cases} U_{нпу} / x(t) / > \gamma \\ 0_{нпу} / x(t) / \leq \gamma \end{cases}, \quad (2)$$

де γ – зона нечутливості регулятора;

- найпростішого імпульсного елемента:

$$X_2(t) = \delta(t) = \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \delta(t - mT), \quad (4)$$

де T – інтервал квантування за часом;

- формуючого кола

$$X_3(t) = \begin{cases} 1; 0 \leq t < S \\ 0; S \leq t < \infty \end{cases}; \quad (5)$$

- об'єкта керування

$$y_{\text{вих}}(t) = K_{\text{ок}}(t - \tau). \quad (6)$$

На основі рівнянь (2) – (6) отримуємо рівняння відносно вихідної величини при

$$|x(t)| \succ \gamma:$$

$$y_{\text{вих}}(t) = \begin{cases} \frac{K_{\text{ок}} U(t - \tau - n(T - s))}{K_{\text{ок}} U s(n + 1)} \text{ при } nT + \tau \leq t \leq nT + \tau + s, \\ \text{при } nT + \tau + s \leq t \leq (n + 1)T + \tau \end{cases}, \quad (7)$$

$$\text{де } n = \left\lfloor \frac{t - \tau}{T} \right\rfloor.$$

Замінивши в рівнянні (7) t на nT , отримаємо рівняння, яке характеризує стан системи в дискретні моменти часу:

$$y_{\text{вих}}(mT) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} K_{\text{ок}}(m - m_{\tau}) s U. \quad (8)$$

До систем автоматичного регулювання ставиться вимога підтримувати на заданому рівні контрольовану величину. Тому показником якості при оптимізації системи автоматичного регулювання приймаємо сумарне квадратичне відхилення:

$$I = \sum_{m=0}^{\infty} (y - y_3)^2 \quad (9)$$

при обмеженні

$$|y - y_3| \leq \Delta, \quad (10)$$

де y – усталене значення вихідної величини; y_3 – її задане значення; Δ – допустима похибка регулювання.

Результати досліджень та їх обговорення. Використовуючи рівняння (9), знаходимо

$$I = \sum_{m=m_3}^{m_3} (y - y_3)^2 + \sum_{m=m_3}^{m_y} (y - y_3)^2 + \sum_{m=m_y}^{\infty} \Delta^2. \quad (11)$$

Перша складова обумовлена дією на об'єкт керування зовнішніх збурень, останні – похибкою, яка виникає в системі регулювання. Тому необхідно розглядати дві останні складові:

$$I = \sum_{m=m_3}^{\infty} (y - y_3)^2 + \sum_{m=m_y}^{\infty} \Delta^2. \quad (12)$$

Першу складову цього рівняння можна записати у вигляді

$$\sum_{m=m_3}^{m_y} (y - y_3)^2 = \sum_{m=m_3}^{m_y} (y - y_y \pm \Delta^2)^2. \quad (13)$$

Тоді

$$I = \sum_{m=m_3}^{m_y} (y - y_y \pm \Delta^2)^2 + \sum_{m=m_y}^{\infty} \Delta^2. \quad (14)$$

Використовуючи вираз (8), отримаємо

$$I = \sum_{m=m_3}^{m_y} [(m - m_y) K_{OK} U s \pm \Delta]^2 + \sum_{m=m_3}^{\infty} \Delta^2. \quad (15)$$

Як впливає з виразу (15), показник оптимальності I є функцією параметра s . Умову його мінімуму отримаємо, коли

$$\frac{\partial I(s)}{\partial s} = 0. \quad (16)$$

Частинна похідна

$$\frac{\partial I}{\partial s} = \sum_{m=m_3}^{m_y} (m - m_y) [(m - m_y) K_{OK} U s \pm \Delta] \quad (17)$$

Враховуючи, що в системі з запізненням

$$m_y = m_3 + m_\tau, \quad (18)$$

отримаємо

$$\frac{\partial I}{\partial S} = m_{\tau}^2 K_{OK} U s \mp \Delta. \quad (19)$$

Прирівнявши вираз (19) до нуля і розв'язавши його, знаходимо формулу для визначення тривалості імпульсу:

$$S = \pm \frac{\Delta}{K_{OK} U m_{\tau}}. \quad (20)$$

Коли $m_{\tau}=1$

$$S = \pm \frac{\Delta}{K_{OK} U}. \quad (21)$$

Інтервал квантування за часом знаходимо із умови забезпечення стійкості нелінійної імпульсної системи автоматичного регулювання.

Для цього визначимо передатну функцію лінійної частини:

$$W_{\lambda}(p) = W_{OK}(p)W_{\phi}(p), \quad (22)$$

або

$$W_{\lambda}(p) = \frac{K_{OK}}{p^2} (1 - e^{-ps}) e^{-p\tau}. \quad (23)$$

Дискретну передатну функцію лінійної частини одержуємо з передатної функції неперервної частини шляхом D -перетворення:

$$W^*(p) = \frac{K_{OK} T e^{p(T-\tau)}}{(e^{pT} - 1)^2} - \frac{K_{OK} T e^{p(T-\tau-S)}}{(e^{pT} - 1)^2}. \quad (24)$$

Замінивши у виразі (24) p на $j\omega$, отримаємо амплітудно-фазову частотну характеристику лінійної частини:

$$W^*(j\omega) = \frac{K_{OK} T e^{j\omega(T-\tau)}}{(e^{j\omega T} - 1)^2} - \frac{K_{OK} T e^{j\omega(T-\tau-S)}}{(e^{j\omega T} - 1)^2}, \quad (25)$$

де

$$\operatorname{Re}^*(\omega) = \frac{K_{OK} T}{\cos \omega T - 1} \sin \omega(\tau + \frac{S}{2}) \sin \omega \frac{S}{2}; \quad (26)$$

$$\operatorname{Im}^*(\omega) = \frac{K_{OK} T}{\cos \omega T - 1} \sin \omega \frac{S}{2} \cos \omega(\tau + \frac{S}{2}). \quad (27)$$

Коефіцієнт статичної лінеаризації нелінійного елемента K_c визначається за формулою:

$$K_c = \frac{U}{x}. \quad (28)$$

Максимальне значення він має тоді, коли $x=\gamma$.

Зону нечутливості регулятора визначають за формулою:

$$\gamma = K_{nn}\Delta, \quad (29)$$

де Δ - допустима статична похибка регулювання.

Умова абсолютної стійкості системи записується у вигляді нерівності

$$Re^*(\omega) > -\frac{1}{K_{c\max}} \quad (30)$$

при $Im^*(\omega) = 0$ і $0 \leq \omega \leq \frac{\omega_0}{2}$,

де ω_0 – частота квантування за часом. Вона визначається за формулою:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}. \quad (31)$$

Для знаходження частоти ω_0 , прирівнюємо вираз (27) до нуля:

$$\frac{K_{ок}T}{\cos \omega T - 1} \sin \omega \frac{T}{2} \cos \omega(\tau + \frac{T}{2}) = 0. \quad (32)$$

Звідси

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2\tau + s}. \quad (33)$$

Підставивши у вираз (27) значення частоти ω_0 , отримаємо

$$\frac{K_{ок}T}{\cos \frac{\pi T}{2\tau + s} - 1} \sin \frac{\pi s}{2(2\tau + s)} + \frac{1}{K_{c\max}} > 0. \quad (34)$$

Як впливає із рівняння (21)

$$\Delta = K_{ок}Us. \quad (35)$$

Тоді

$$K_{c \max} = \frac{1}{K_{ок} s}. \quad (36)$$

Підставивши вираз (36) у (34), після перетворень отримаємо:

$$\frac{K_{ок} T \sin \frac{\pi s}{2(2\tau + s)} + K_{ок} s \left(\cos \frac{\pi T}{2\tau + s} - 1 \right)}{\cos \frac{\pi T}{2\tau + s} - 1} > 0. \quad (37)$$

Оскільки знаменник менший за нуль, для виконання нерівності (37) необхідно, щоб

$$\frac{T}{s} \sin \frac{\pi s}{2(2\tau + s)} + \cos \frac{\pi T}{2\tau + s} - 1 \leq 0. \quad (38)$$

Як впливає з нерівності (38), на стійкість системи впливає час чистого запізнювання об'єкта керування, тривалість імпульсу та інтервал квантування за часом. Отже, при виборі параметра T необхідно виходити з умови забезпечення стійкості системи.

Рис. Области стійкості системи автоматичного регулювання для астатичного об'єкта першого порядку із запізненням

Розв'язки нелінійної нерівності (38) будуть визначати область значень T , при яких зберігається умова абсолютної стійкості системи (рисунок).

Висновки і перспективи. Отримані залежності для визначення тривалості імпульсу (21) та інтервалу квантування за часом (38) дають можливість визначити параметри налагодження релейно-імпульсного регулятора для астатичного об'єкта першого порядку із запізненням. При цьому забезпечується мінімальна похибка регулювання, а система регулювання є стійкою.

Список літератури

1. Синявський О. Ю., Савченко В. В. Автоматичне керування приготуванням живильного розчину в гідропонних теплицях. Енергетика і автоматика. 2017. №1. С. 16-27.
2. Синявський О. Ю., Савченко В. В. Автоматичне керування мінеральним живленням рослин у гідропонних теплицях. К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2016. 249 с.
3. Дубровный В. А., Забокрицкий Е. И., Трегуб В. Г. и др. Справочник по наладке автоматических систем контроля и регулирования. К.: Наукова думка, 1981. 940 с.
4. Цыпкин Я. З., Попков Ю. С. Теория нелинейных импульсных систем. М.: Наука, 1973. 416 с.
5. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование. М.: Машиностроение, 1978. 736 с.

References

1. Sinyavsky, O. Yu., Savchenko, V. V. (2017). Avtomatychnе keruvannia pryhotuvanniam zhyvylnoho rozchynu v hidropennykh teplytsiakh [Automatic control of nutrient solution preparation in hydroponic greenhouses]. Enerhetyka i avtomatyka, 1, 16-27.
2. Sinyavsky, O. Yu, Savchenko, V. V. (2016). Avtomatychnе keruvania mineralnym zhyvleniam roslyn u hidropennykh teplytsiakh [Automatic control for mineral nutrition of plants in hydroponic greenhouses]. Kyiv: KOMPRYNT, 249 .
3. Dubrovnyy, V. A., Zabokritskiy, E. I., Tregub, V. G. (1981). Spravochnik po naladke avtomaticheskikh sistem kontrolya i regulirovaniya [Handbook for setting up automatic control and regulation systems]. K.: Naukova dumka, 940.
4. Tsypkin, Ya. Z., Popkov, Yu. S. (1973). Teoriya nelineynykh impul'snykh sistem [Theory of nonlinear impulse systems]. Moskow: Nauka, 416.
5. Ivashchenko, N. N. (1978). Avtomaticheskoye regulirovaniye [Automatic regulation]. M.: Mashinostroyeniye, 736.

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С АСТАТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

А. Ю. Синявский, В. Г. Кистень, Н. А. Соломко

Аннотация. *В настоящее время нелинейные импульсные системы автоматического регулирования получили широкое распространение, поэтому возникает необходимость в разработке методов их исследования.*

Импульсные регуляторы создаются на базе позиционных с добавлением импульсных прерывателей. Их можно представить в виде последовательно соединенных нелинейного элемента, простейшего импульсного элемента и формирующей цепи.

Целью исследования было определение оптимальных параметров настройки релейно-импульсного регулятора для астатического объекта с запаздыванием.

При определении параметров настройки релейно-импульсного регулятора в качестве показателя качества при оптимизации системы автоматического регулирования было принято суммарное квадратичное отклонение. Применяв этот критерий, определяется длительность импульса регулятора.

Интервал квантования по времени определяется из условия обеспечения абсолютной устойчивости системы автоматического регулирования.

Были получены аналитические зависимости для определения длительности импульса и интервала квантования по времени, позволяющие определить параметры настройки релейно-импульсного регулятора для астатического объекта первого порядка с запаздыванием. При этом обеспечивается минимальная погрешность регулирования, а система регулирования является устойчивой.

Ключевые слова: *нелинейная импульсная система автоматического регулирования, релейно-импульсный регулятор, длительность импульса, интервал квантования по времени, устойчивость системы автоматического регулирования*

OPTIMIZATION OF NONLINEAR PULSE SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL WITH ASTATIC OBJECTS

O. Sinyavsky, V. Kisten, N. Solomko

Abstract. *Currently, nonlinear pulse automatic control systems have become widespread, so there is a need to develop methods for their study.*

Pulse regulators are created on the basis of positional with the addition of pulse breakers. They can be represented as a non-linear element, a simple impulse element and a forming circle connected in series.

The aim of the study was to determine the optimal parameters for setting up a relay-pulse controller for an astatic object with a delay.

When determining the parameters of adjustment of the relay-pulse regulator for the quality indicator in the optimization of the automatic control system was taken as the total square deviation. Applying this criterion, the pulse duration of the regulator was determined.

The time quantization interval is determined from the condition of ensuring the absolute stability of the automatic control system.

Analytical dependences were obtained to determine the pulse duration and time quantization interval, which make it possible to determine the debugging parameters of the relay-pulse controller for a first-order astatic object with a delay. This ensures a minimum control error, and the control system is stable.

Key words: *nonlinear pulse automatic control system, relay-pulse regulator, pulse duration, time quantization interval, stability of automatic control system*