

Електронні системи

УДК 621.43.044

М. П. Драган

Програмна оптимізація електронного регулювання швидкості холостого ходу двигуна внутрішнього згорання, керуючи кутом випередження запалювання

Проводиться програмна параметрична оптимізація електронного регулювання швидкості холостого ходу в двигателі внутрішнього згорання шляхом управління кутом опереження запалювання з використанням методів мінімальної середньоквадратичної помилки та оцінкою максимального перерегулювання з допомогою пакетів VisSim та SIMULINK з метою визначення оптимальних параметрів пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора без використання складних аналітичних розрахунків.

The program parametric optimization of the idle speed control in SI engine using by spark advance is designed. The average least-square error and the maximum overshoot methods were used. The algorithms were implemented in VisSim and SIMULINK. The programs calculate the optimal parameters of the PID controller without using of the complex analytic calculations.

Ключевые слова: *угол опережения зажигания, двигатель внутреннего сгорания, оптимизация, ПИД регулятор, скорость холостого хода, среднеквадратическая ошибка.*

Вступ

В даній роботі розв'язується задача аналізу різних методів програмної оптимізації в пакетах VisSim та SIMULINK щодо можливостей їх застосування в системі регулювання швидкістю холостого ходу (ШХХ). Це надає можливість знайти оптимальні параметри без використання складних аналітичних розрахунків. Оскільки система регулювання ШХХ є двоконтурною, яка передбачає дросельне керування та керування кутом випередження запалювання, то вибрані методи оптимізації значно прискорюють процес синтезу системи.

В роботі [1] був проведений синтез замкненої системи регулювання ШХХ в двигуні внутрішнього згорання. Були визначені попередні настроювальні параметри ПІД регуляторів методом логарифмічних амплітудо-частотних харак-

теристик. На основі результатів цієї роботи ставиться задача проведення програмної оптимізації та знаходження оптимальних параметрів.

1. Вибір методів оптимізації системи електронного регулювання швидкістю холостого ходу, керуючи кутом випередження запалювання

Замкнене регулювання ШХХ, керуючи кутом випередження запалювання (КВЗ) забезпечує швидший перехідний процес встановлення заданої швидкості, ніж використання тільки дросельного керування, оскільки цей процес має меншу затримку в керуючому сигналі. Через керування КВЗ швидше встановлюється задане значення та досягається менша реакція на вплив збурення, що забезпечує високу рівномірність обертання колінчатого валу. В результаті цього можна отримати мінімальну витрату палива (найбільшу паливну ефективність), яка є критерієм оптимальності синтезу системи регулювання ШХХ. При цьому слід враховувати, що значна коливальність перехідного процесу регулювання ШХХ являється негативним явищем, оскільки режим холостого ходу не являється плавним повільним процесом, коли коливальність відбувається один раз і подальше не впливає на якість роботи, оскільки система перебуває постійно в встановленому режимі. В процесі своєї роботи двигун навпаки постійно переходить або в робочий режим або в режим холостого ходу.

Таким чином, для отримання мінімальної витрати палива, перехідний процес регулювання ШХХ має забезпечувати максимальну швидкість перехідного процесу при мінімальному перерегулюванні. Тому вибір методів оптимізації даної системи полягає в забезпеченні її оптимальних критеріїв якості, якими є: 1. максимальна швидкість, що визначається мінімальним часом регулювання перехідного процесу t_{per} [с]; 2. максимальне перерегулювання (МК) δ [%], що визначає встановлення мінімального перерегулювання перехідного процесу.

При аналізі різних методів проведення оптимізації [2, 3] виявлено, що важливою властивістю оптимізації є використання непрямих критеріїв оптимальності, що визначають критерії

якості системи. Одним з таких критеріїв оптимальності є знаходження мінімальної середньоквадратичної помилки (СКП), яка визначає вище задану максимальну швидкодію перехідного процесу системи регулювання ШХХ. Визначено, що максимальне перерегулювання $\delta[\%]$ визначається прямим методом за відповідною формулою, наведеною нижче.

У зв'язку з розвитком багатьох програмних засобів проведення аналізу та синтезу системи на основі математичного моделювання, розроблені методи проведення автоматичної оптимізації системи без використання складних аналітичних обчислень, що значно прискорює та полегшує процес проектування системи. Широко поширеними такими засобами являються пакети **VisSim** та **SIMULINK**.

В даній роботі ставиться задача розробити моделі для програмної оптимізації параметрів системи регулювання ШХХ через визначення мінімальної середньоквадратичної помилки та максимального перерегулювання $\delta[\%]$. Моделювання проводилось у середовищах **VisSim** та **SIMULINK**.

2. Проведення оптимізації параметрів регулювання ШХХ методом мінімальної середньоквадратичної помилки в середовищі VisSim

В роботі проводиться оптимізація системи регулювання ШХХ, математична модель якої

розглянута в роботі [1] та зображена на рис. 1.

Оптимізація здійснюється для режиму слідування. Середньоквадратична помилка визначається помилкою $e(t) = n_{зад} - n_{вум}$ між заданою та виміряною швидкостями.

Критерій оптимізації $J = СКП$ визначається [2] за наступною формулою 1:

$$J = СКП = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2(t) dt} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де T – час моделювання; $e(t)$ – помилка.

На основі рівняння 1 в програмі **VisSim** складена блок-схема мінімізації СКП, яка зображена на рис. 2.

Блок-схема, наведена на рис. 2, побудована на основі блоку мінімізації ціни якості **cost**, який в **VisSim** виконує роль мінімізації його вхідної величини. Параметри оптимізації, в ролі яких виступають параметри ПІД регулятора: K_p , K_i , K_d , задаються блоками **parameterUnknown**. Для визначення обмежень кожного коефіцієнта були створені блоки обмеження (так як в **VisSim** не працює функція обмеження) та задані відповідні значення в межах вже отриманих раніше [1] коефіцієнтів. Для проведення оптимізації в пакеті **VisSim** попередньо вибирається один з методів оптимізації та задаються початкові значення настроювальних коефіцієнтів, які задані на рис. 2.

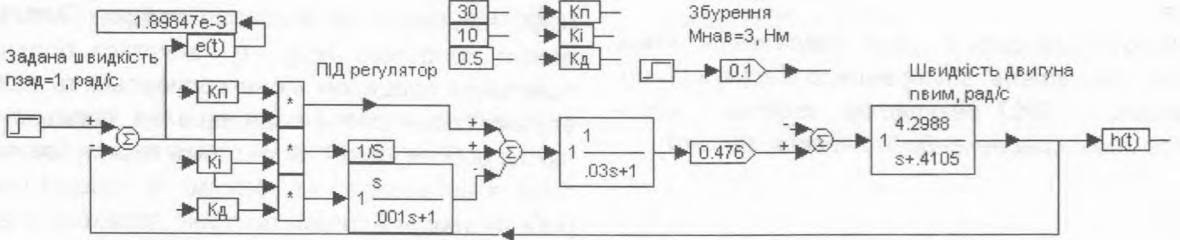


Рис. 1. Структурна схема системи регулювання ШХХ в VisSim

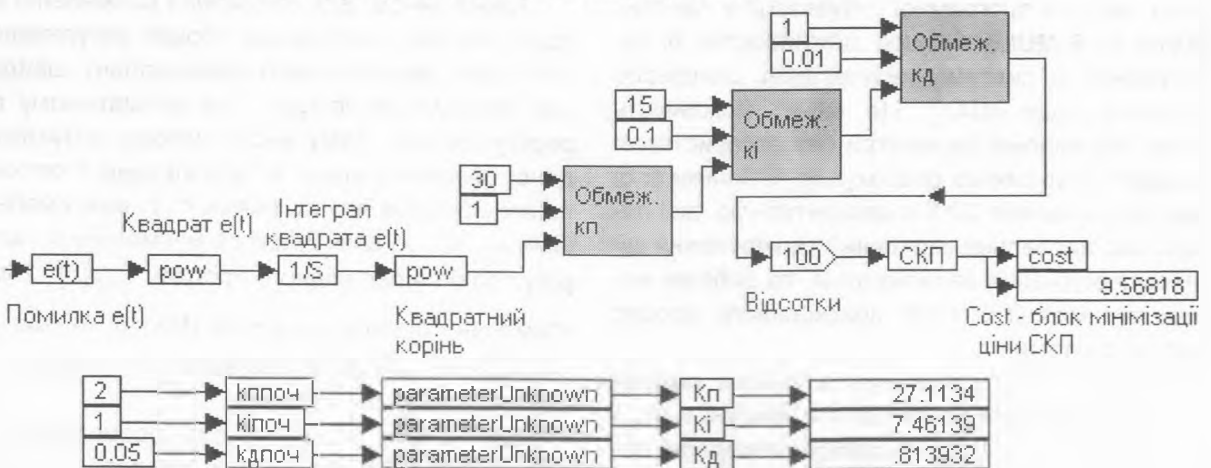


Рис. 2. Блок схема мінімізації СКП

3. Оптимізація параметрів регулювання ШХХ методом максимального перерегулювання в пакеті VisSim

Критерій оптимізації максимального перерегулювання (МК) δ [%] за величиною в 5 [%] визначається [3] наступною формулою 2:

$$\delta = MK = \left(\frac{h_{max} - h_{уст}}{h_{уст}} - 0.05 \right) \cdot 100 [\%] \rightarrow \min, \quad (2)$$

де h_{max} – максимальне значення вихідного сигналу в момент моделювання; $h_{уст}$ – установлене значення вихідного сигналу в момент моделювання.

Відповідно до рівняння 2 складена блок-схема мінімізації ціни якості $\delta = 5$ [%], яка зображена на рис. 3.

Блок-схема, наведена на рис. 3, побудована на основі блоку мінімізації ціни якості **cost**. Мо-

дель працює згідно рівняння 2, а саме: вихідний сигнал $h(t)$ з схеми, наведеної на рис. 1, поступає на вхід даної моделі, де обирається h_{max} за допомогою блоку **Max_In.dll**. Потім ці величини віднімають, а результат ділиться на $h_{уст}$. В моделі використовуються блоки обмеження параметрів ПІД регулятора: K_p , K_i , K_d , які задаються блоками **parameterUnknown** початковими значеннями. Для запобігання ділення на 0 в знаменнику додається довільна мала величина, яка визначена як $5e-18$ та не впливає на результат.

В результаті проведення програмної оптимізації в пакеті **VisSim** обома методами СКП та МК автоматично були отримані оптимальні перехідні характеристики системи, які зображені на рис. 4.

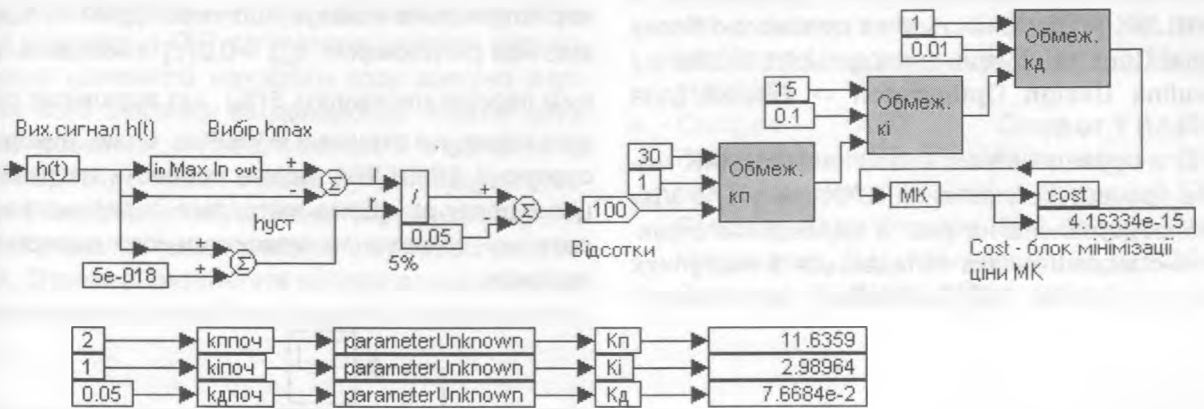


Рис. 3. Блок-схема мінімізації МК

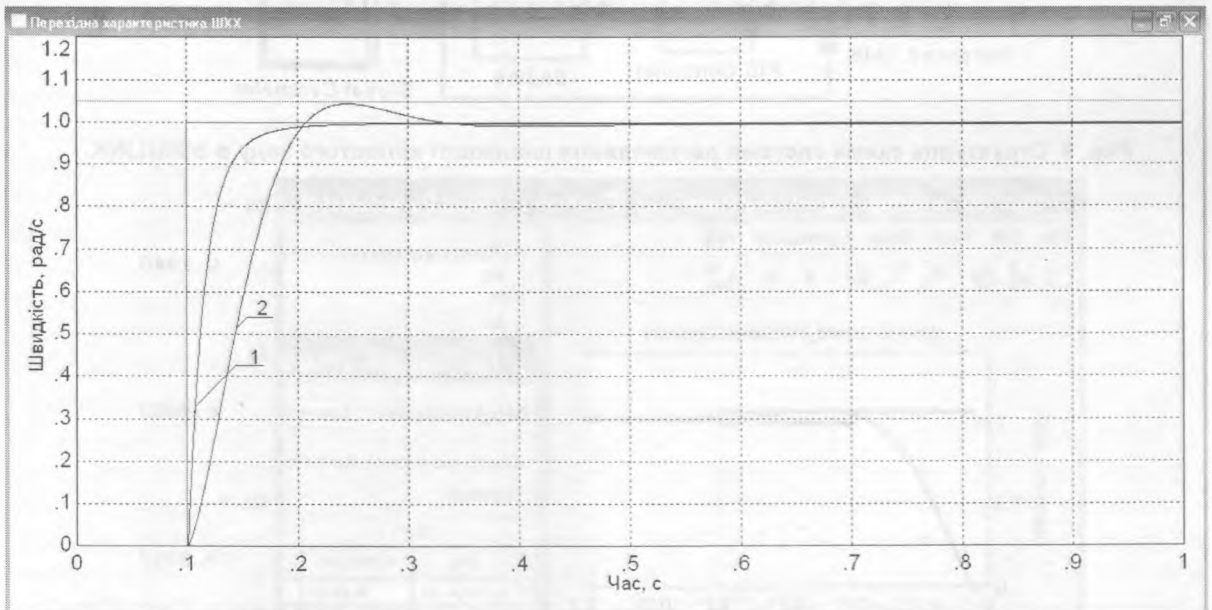


Рис. 4. Оптимальні перехідні характеристики методами: 1 – СКП; 2 – максимального перерегулювання

Як видно з рис. 4, крива 1 описує перехідний процес методом мінімальної СКП, а крива 2 – метод максимального перерегулювання. Як і слідувало очікувати, методом СКП отримана перехідна характеристика більшої швидкодії, яка визначається часом регулювання $t_{\text{рег}} = 0.1[\text{с}]$. Для методу МК, крива 2 показує більш тривалий перехідний процес $t_{\text{рег}} = 0.25[\text{с}]$ з встановленим максимальним перерегулюванням 5[%]. Отримана перехідна характеристика (крива 1) в даному випадку не має коливальності (потребує детального дослідження), хоча в ідеальному випадку повинна мати підвищену коливальність, оскільки метод СКП не враховує обмеження коливальності перехідного процесу.

4. Оптимізація в пакеті SIMULINK

Оптимізація параметрів ПІД регулятора в SIMULINK [4] здійснюється за допомогою блоку **Signal Constraint**, який знаходиться в бібліотеці **Simulink Design Optimizaton -> Blocks** (для MATLAB 7.10.0).

Для проведення оптимізації в SIMULINK модель процесу регулювання ШХХ (рис. 1) з **VisSim** представлена на рис. 5 відповідною структурною моделлю, яка складається з наступних основних блоків: **PID Controller**, що включає

модель ПІД регулятора, та **Engine**, що включає модель двигуна. Моделі ПІД регулятора та двигуна детально показані на рис. 1.

Блок оптимізації **Signal Constraint** дозволяє обирати настроювальні параметри ПІД регулятора та встановлювати для них необхідні обмеження (**Tuned Parameters**). Оптимізація виконується за допомогою налаштування меж перехідної характеристики відповідно до заданих показників якості, таких як: максимальне перерегулювання, час зростання, час перехідного процесу, встановлена помилка.

Роботу блоку оптимізації **Signal Constraint**, а також отриману оптимальну перехідну характеристику регулювання ШХХ з визначеними критеріями якості, такими як розглянуті вище в другому та третьому розділах, а саме: 1. мінімальний час перехідного процесу; 2. максимальне перерегулювання $\delta[\%]$; ілюструє рис. 6.

Отримана на рис. 6 оптимальна перехідна характеристика показує, що перехідний процес має час регулювання $t_{\text{рег}} = 0.2[\text{с}]$ з максимальним перерегулюванням 5[%], що відповідає результатам, які отримані в **VisSim**. Отже, використовуючи **SIMULINK**, можна провести оптимізацію відразу за обома методами середньоквадратичної помилки та максимального перерегулювання.

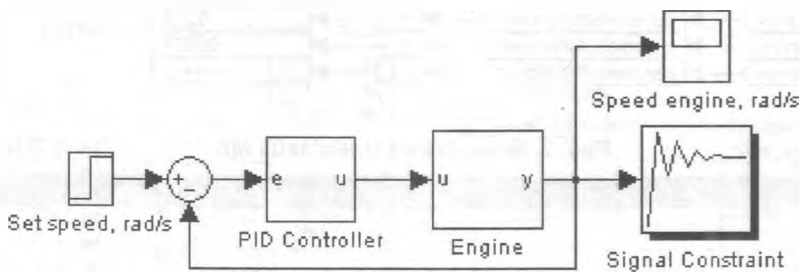


Рис. 5. Структурна схема системи регулювання швидкості холостого ходу в SIMULINK

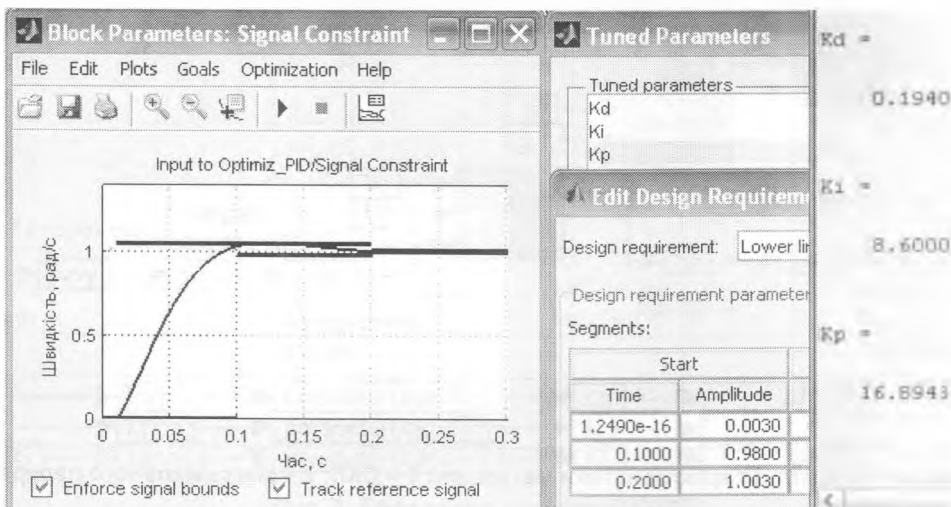


Рис. 6. Оптимальна перехідна характеристика регулювання ШХХ в SIMULINK

Оптимальні коефіцієнти ПІД регулятора, які отримані обома методами в **VisSim** та в **SIMULINK** занесені до таблиці 1.

Таблиця 1. Настроювальні параметри ПІД регулятора

| Метод оптимізації | K_p | K_i | K_d |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| СКП (VisSim) | 27 | 7 | 0.8 |
| МК (VisSim) | 12 | 3 | 0.07 |
| SIMULINK | 17 | 8.6 | 0.19 |

Отримані оптимальні параметри ПІД регулятора, як видно з таблиці 1, різними методами значно відрізняються, тому, виходячи з постановки конкретної задачі, треба вибирати відповідний метод оптимізації. Розбіжність даних параметрів обумовлена протилежністю поставлених задач розглянутих методів оптимізації та повинна детально вивчена при реалізації системи.

Висновки

Розглянуті два методи програмної оптимізації параметрів ПІД регулятора системи регулювання швидкістю холостого ходу двигуна внутрішнього згоряння за допомогою пакетів автоматизованого проектування **VisSim** та **SIMULINK**. В пакеті **VisSim** були побудовані моделі визначення мінімальної середньоквадратичної помилки та максимального перерегулювання. Отримані результати роботи дозволяють застосовувати розроблені моделі в задачах опти-

мізації замкнених систем електронного керування кутом випередження запалювання без використання складних аналітичних розрахунків, що значно прискорює, полегшує розробку системи, дозволяє застосовувати більшу кількість параметрів оптимізації; та дозволяють проводити синтез системи при врахуванні нелінійностей, які виникають в реальній системі через обмеження керуючого параметру КВЗ та ПІД регулятора

Література

1. Денбновецький С.В., Драган М.П. Електронне керування кутом випередження запалювання в бензиновому двигуні внутрішнього згоряння (ДВЗ) // Електроніка и связь. – 2010. – № 5. – С. 120 – 124.
2. Лукас В.А. Теория управления техническими системами // Е.: УГГГА, 2002. – 675 с.
3. Федосов Б.Т. Задание и методические указания к выполнению л. р. № 6. – [Ел. рес.] http://model.exponenta.ru/bt/bt_cont_3_Met.html#L326.
4. Соколов А.Ю., Соколов Ю.Н. Проектирование систем управления на ЭВМ (MATLAB/ Simulink/ Control System) / А.Ю. Соколов, Ю.Н. Соколов, В.М. Ілюшко, М.М. Митрахович, Д.Н. Гайсенюк // Під ред. Ю.Н. Соколова, Х.: "ХАИ", 2005. – 590 с.