

## АЛГОРИТМ САМОНАЛАШТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРА В САУ ПРОЦЕСОМ ГРАНУЛЮВАННЯ КОМБІКОРМІВ

*Для об'єктів технологічного типу використовується розширений метод типової статистичної ідентифікації. Розроблена за його допомогою процедура поетапної ідентифікації об'єкта управління в замкненому контурі склала основу для розв'язання задачі адаптації (самоналаштування регулятора) у системах управління процесом гранулювання комбікормів.*

**Ключові слова:** *гранулювання комбікормів, типова статистична ідентифікація, кореляційні функції, адаптивне управління.*

**Постановка проблеми та її зв'язок із найважливішими науковими та практичними завданнями.** Гранулювання є технологічним процесом, який може забезпечити поліпшення практично всіх показників якості розсипних комбікормів. За рахунок обробки парою та високим тиском у розсипних комбікормах відбуваються зміни структурно-механічних властивостей, перетворення складних високомолекулярних сполук у більш прості. У результаті цього отримують продукт з більш високою санітарною якістю, який легше засвоюється організмом тварин. Також гранульовані комбікорми мають суттєву перевагу перед розсипними за умови зберігання, перевезення та застосування.

Процес гранулювання реалізується технологічними агрегатами, які називають прес-грануляторами (ПГ). ПГ є складними об'єктами управління (ОУ) технологічного типу, а процес гранулювання – дуже енергоємним за витратами електричної енергії та пари. Це робить актуальною стратегію управління, орієнтовану на енергозбереження. Дослідження показують, що вимога мінімізації питомих енерговитрат призводить до необхідності забезпечення максимальної продуктивності ПГ. Тому розробка та реалізація алгоритмів управління, що забезпечують експлуатацію пресів у найбільш ефективних режимах відповідно до орієнтованої на енергозбереження стратегії, є досить актуальним і нетривіальним завданням.

Переважає більшість модифікацій ПГ вітчизняних (типи ДГ, ДГВ, ДГЕ) і зарубіжних виробників мають схожу конструкцію [1]. Вона включає шнековий живильник, змішувач, куди подається пара та рідкі компоненти (жир, меляса), і пресувальний вузол, що складається з вертикальної кільцевої матриці з отворами, в які розсипний комбікорм, нагрітий і зволожений парою, подається пресоликами.

Пресувальний вузол приводиться в обертання асинхронними електродвигунами потужністю 100...500 кВт. Передача здійснюється через редуктор і спеціальний штифт з нормованим моментом зрізу. Він необхідний для запобігання руйнуванню пресувального вузла та деталей механічної передачі за умови перевищення моменту на валу вище допустимого і, зокрема у разі заклинювання

вузла. Зміна подачі продукту на гранулювання здійснюється за рахунок зміни швидкості обертання шнекового живильника, а подача пари в змішувач – змінною прохідного перетину регулюючого клапана. Штатні системи управління передбачають, як правило, стабілізацію струму навантаження привідного електродвигуна (ПЕД) пресувального вузла (матриці) за рахунок зміни подачі продукту на пресування та температури розсипного комбікорму після його нагрівання і зволоження паром в змішувачі (гідротермічної обробки) безпосередньо перед подачею його в пресувальний вузол [2].

Ефективне автоматичне управління процесом гранулювання має бути спрямоване на підтримання такого співвідношення витрат пари та вихідного продукту, яке забезпечує номінальне значення струму статора головного ПЕД преса за умови заданої його продуктивності та необхідної якості готових гранул. Однак, встановити оптимальне значення такого співвідношення в кожному конкретному випадку вдається далеко не завжди, оскільки його величина не є постійною та залежить від фізико-механічних властивостей вихідного продукту, параметрів пари.

Практичним підтвердженням складності ПГ як ОУ є той факт, що системи управління з квазілінійними ПІ-алгоритмами, якими комплектувалися ПГ, навіть за умови спеціального налаштування зберігали свою працездатність тільки в режимах, досить віддалених від паспортних, тим більше – гранично допустимих. Непрацездатність виявлялася в неможливості забезпечити стійку роботу пресів без частих аварійних зупинок у режимах роботи з паспортними техніко-економічними показниками. При цьому для ПГ, як об'єкта технологічного типу, завдання підвищення ефективності функціонування суперечило завданню забезпечення безаварійності. Згладжування цієї суперечності було досягнуто в рамках систем гарантуючого управління.

Цю статтю присвячено проблемам подальшого підвищення ефективності роботи ПГ. Дослідження показують, що цього можна досягти, нарощуючи алгоритми гарантуючого управління навантаженням ПЕД пресувального вузла (матриці) за рахунок можливості самоналаштування регулятора.

**Мета статті** – показати розв'язання цієї задачі засобами розширеного методу типової статистичної ідентифікації.

Основною причиною зниження якості функціонування систем управління ПГ є зміна властивостей ОУ. Доцільний шлях вирішення цієї проблеми – створення адаптивних (самонастроювальних) систем управління. Самоналаштування регуляторів за умови адаптивного управління є безальтернативним методом збереження компромісу між показниками стійкості і якості процесів в САУ об'єктами будь-якої природи, для яких характерний високий рівень нестационарності їх властивостей.

У цій статті розглядається один з алгоритмів самоналаштування (адаптації), що дозволяє здійснювати ідентифікацію моделі ОУ в режимі реального часу в складі замкненого контуру САУ. Істотною відмінністю цього алгоритму є використання поетапного підходу за умови розв'язання задачі типової ідентифікації [3]. Його було розроблено та досліджено на прикладі САУ ГБ, схема якої подана на рисунку 1, для контуру регулювання струму навантаження ПГ.

Представимо його у вигляді блок-схеми на рисунку 2 та більш докладно опишемо.

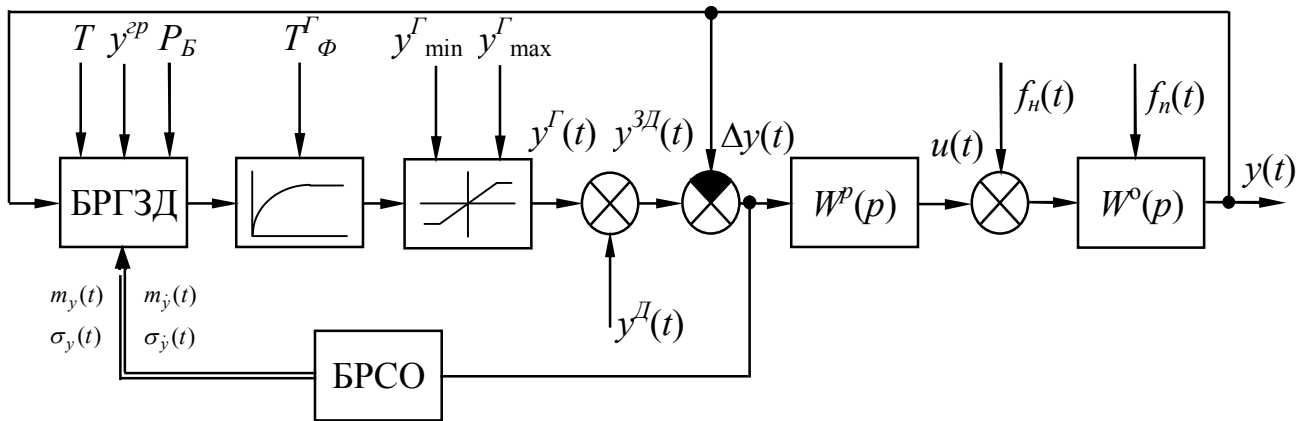


Рисунок 1 – Варіант структурної схеми САУ ГБ

Вводяться значення таких величин (блок 1):  $k_p^H$ ,  $T_{i3}^H$ ,  $T_{np}^H$  – початкові параметри регулятора;  $S_y^{3d}$  – задана кількість перетинів процесу  $y(t)$  з лінією свого математичного сподівання;  $m_{AK\Phi}$ ,  $m_{BK\Phi}$  – кількість точок, яка необхідна для оцінювання АКФ вхідного процесу  $y^D(t)$  та оцінювання ВКФ вхідного  $y^D(t)$  і вихідного  $y(t)$  процесів відповідно;  $I_{фор}^{3d}$  – задане контрольне значення критерію оптимальності за умови ідентифікації моделі ВКФ процесів  $y^D(t)$  та  $y(t)$ ;  $P_{ДВС}$  – ключ, що характеризує умову вмикання додаткового випадкового сигналу (ДВС).

Якщо виконується умова вмикання ДВС, то відбувається його генерація та здійснюється введення поточних значень процесів  $y^D(i \cdot \Delta t)$  і  $y(i \cdot \Delta t)$  (блоки 3, 4).

Виконується розрахунок математичних очікувань процесів  $y^D(i \cdot \Delta t)$  і  $y(i \cdot \Delta t)$  та їхнє центрування. Також визначається поточна кількість перетинів  $S_y^m$  процесу  $y(i \cdot \Delta t)$  з лінією свого математичного очікування (блок 5).

Виконується рекурентний розрахунок оцінних значень АКФ сигналу  $y^D(i \cdot \Delta t)$  -  $\widehat{K}_{y^o}(\tau_k)$  і ВКФ сигналів  $y^D(i \cdot \Delta t)$  та  $y(i \cdot \Delta t)$  -  $\widehat{K}_{y^o y}(\tau_k)$  (блок 6).

Коли поточне значення  $S_y^m$  досягає заданого  $S_y^{3d}$  (наприклад, 50), то починається виконання ідентифікаційних процедур (блок 7).

Виконується ідентифікація параметрів моделі АКФ сигналу  $y^D(i \cdot \Delta t)$  -  $K_{y^o}^M(\tau_k)$  (блок 8). При цьому вважаючи, що  $\vec{d} = \{D, \alpha, \beta\}$  аргументи в  $K_{y^o}^M(\tau_k)$ , і використовуючи експериментально отриману оцінку  $\widehat{K}_{y^o}(\tau_k)$ , числовими методами вирішується оптимізаційну задачу:

$$\vec{d}^* = \{D^*, \alpha^*, \beta^*\} = \arg \min \left[ \int_0^{m_{акф} \Delta \tau_k} \left( K_{y^o}^M(\tau_k, \vec{d}) - \widehat{K}_{y^o}(\tau_k) \right)^2 d\tau_k \right], \quad (1)$$

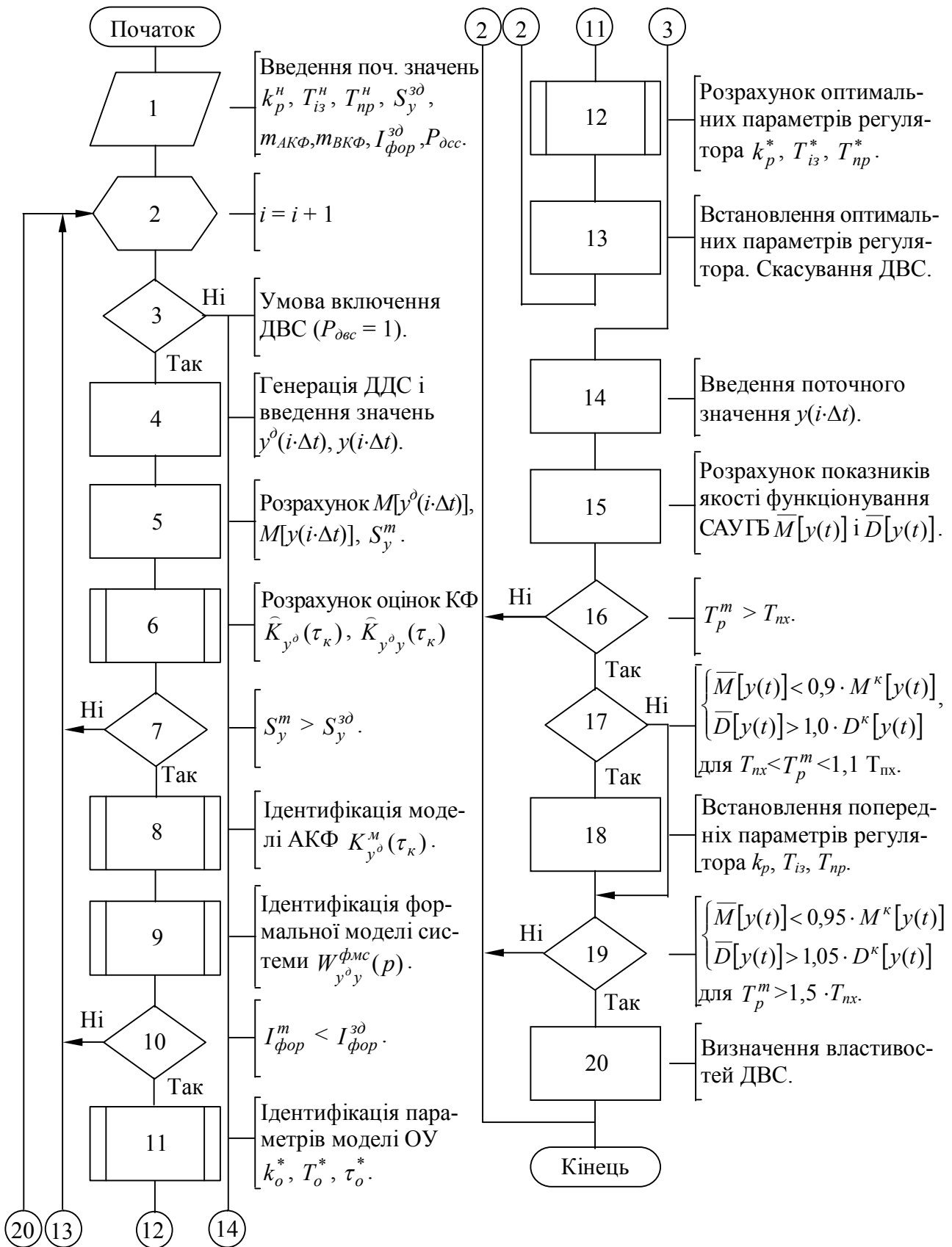


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму адаптації з ДВС

Виконується ідентифікація параметрів формальної моделі системи (ФМС)  $W_{y^o y}^{fmc}(p)$  за каналом завдання –  $k^*, T^*, \tau^*, \xi^*$ , які водночас є параметрами моделі

ВКФ сигналів  $y^D(i \cdot \Delta t)$  і  $y(i \cdot \Delta t) - K_{y^o y}^M(\tau_k)$  (блок 9). Ураховуючи властивості системи управління за каналом завдання, значення  $k$  приймають як постійне і таке, що дорівнює 1. При цьому вважаючи, що  $\vec{c} = \{k, T, \tau, \xi\}$  аргументи в  $K_{y^o y}^M(\tau_k)$  і використовуючи експериментально отриману оцінку  $\widehat{K}_{y^o y}(\tau_k)$ , числовими методами розв'язується оптимізаційну задачу:

$$\vec{c}^* = \{T^*, \tau^*, \xi^*\} = \arg \min \left[ I_{\text{фор}}^m = \int_{m_{\text{екф}}^- \Delta \tau_k}^{m_{\text{екф}}^+ \Delta \tau_k} \left( K_{y^o y}^M(\tau_k, \vec{c}) - \widehat{K}_{y^o y}(\tau_k) \right)^2 d\tau_k \right]. \quad (2)$$

У ході розв'язання оптимізаційної задачі (2) контролюється поточне значення критерію оптимальності  $I_{\text{фор}}^m$ . Якщо воно перевищує задане контрольне значення  $I_{\text{фор}}^{\text{зд}}$ , то ідентифікаційні процедури перериваються (блок 10).

Виконується ідентифікація параметрів моделі ОУ –  $k_o^*$ ,  $T_o^*$ ,  $\tau_o^*$  (блок 11). При цьому вважаючи, що  $\vec{a} = \{k_o, T_o, \tau_o\}$  аргументи в перехідній характеристиці (ПХ) імітаційної моделі системи (ІМС)  $h_{y^o y}^{\text{імс}}(t)$ , і використовуючи ПХ  $h_{y^o y}^{\text{фмс}}(t)$  ФМС, числовими методами розв'язуємо оптимізаційну задачу:

$$\vec{a}^* = \{k_o^*, T_o^*, \tau_o^*\} = \arg \min \left[ \int_0^{t_{\text{нх}}} \left( h_{y^o y}^{\text{імс}}(t, \vec{a}) - h_{y^o y}^{\text{фмс}}(t) \right)^2 dt \right], \quad (3)$$

Виконується розрахунок нових оптимальних параметрів регулятора (блок 12). Оскільки в результаті поетапної типової ідентифікації отримані параметри моделі ОУ і є ІМС розглядуваної САУ, то можна параметрично оптимізувати регулятора. При цьому вважаючи, що  $\vec{b} = \{k_p, T_{\text{із}}, T_{\text{нр}}\}$  аргументи в  $h_{y^o y}^{\text{імс}}(t)$ , числовими методами розв'язуємо оптимізаційну задачу:

$$\vec{b}^* = \{k_p^*, T_{\text{із}}^*, T_{\text{нр}}^*\} = \arg \min \left[ \int_0^{t_{\text{нх}}} \left( h_{y^o y}^{\text{імс}}(t, \vec{b}) - h^{i\text{д}}(t) \right)^2 dt \right], \quad (4)$$

де  $h^{i\text{д}}(t)$  – ПХ фактичної системи в ідеальному випадку;  
 $t_{\text{нх}}$  – час розрахунку ПХ.

Виконується встановлення нових оптимальних параметрів регулятора в САУ ГБ і скасовується дія ДВС (блок 13). Після зміни параметрів регулятора вводять поточне значення процесу  $y(i \cdot \Delta t)$  (блок 14).

Виконується розрахунок показників якості функціонування САУ ГБ (блок 15). Середні значення математичного сподівання  $\overline{M}[y(t)]$  і дисперсії  $\overline{D}[y(t)]$  процесу  $y(i \cdot \Delta t)$  на поточному інтервалі часу  $T_p^m$  визначаються за формулами:

$$\bar{M}[y(t)] = \frac{1}{T_p^m} \int_0^{T_p^m} y(t) dt; \quad \bar{D}[y(t)] = \frac{1}{T_p^m} \int_0^{T_p^m} (y(t) - \bar{M}[y(t)])^2 dt \quad (5)$$

Доки  $T_p^m \leq t_{nx}$ , визначаються контрольні значення показників якості  $M^k[y(t)] = \bar{M}[y(t)]$  і  $D^k[y(t)] = \bar{D}[y(t)]$  (блок 16).

Коли  $T_p^m > t_{nx}$ , здійснюється порівняння поточних і контрольних значень показників якості (блок 17).

Якщо при  $t_{nx} < T_p^m < 1,1 \cdot t_{nx}$  виконуються такі умови:  $\bar{M}[y(t)] < 0,9 \cdot M^k[y(t)]$  і  $\bar{D}[y(t)] > 1,1 \cdot D^k[y(t)]$ , то настройки регулятора повертаються до попередніх значень (блок 18).

Визначається доцільність проведення ідентифікаційних процедур. При цьому контролюють виконання таких умов:  $\bar{M}[y(t)] < 0,95 \cdot M^k[y(t)]$  і  $\bar{D}[y(t)] > 1,05 \cdot D^k[y(t)]$  при  $T_p^m > 1,5 \cdot T_{nx}$ . Якщо вони підтверджуються, то здійснюється вмикання ДВС (блок 19). За умови необхідності коригуються властивості ДВС, а саме його дисперсія (блок 20).

Перевірку дієздатності алгоритму було здійснено за допомогою програми моделювання роботи САУ ГБ із самоналаштуванням регулятора. Основною метою складання умов моделювання є більш повне відображення реальних особливостей функціонування ОУ. Практично це означало необхідність введення в модель координатної та параметричної невизначеностей.

Дослідження проводилися для режимів роботи системи, що вже встановилися. На систему діяли неконтрольовані збурення, а її динамічні властивості описували такими передатними функціями:

$$W^o(p) = k_o e^{-\tau_o p} / (T_o p + 1)^2, \quad (6)$$

$$W^p(p) = k_p (1 + 1/T_{iz} p + T_{np} p / (0,2 T_{np} p + 1)), \quad (7)$$

Були прийняті такі залежності, що описують зміну  $k_o$  і  $\tau_o/T_o$ :

$$k_o = k_o^{ном} + \Delta k_o(t), \quad \Delta k_o(t) = k_o^{max} \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T_k} + \varphi_k\right), \quad (8)$$

$$\tau_o/T_o = (\tau_o^{ном} + \Delta \tau_o(t)) / T_o^{ном}, \quad \Delta \tau_o(t) = \tau_o^{max} \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T_\tau} + \varphi_\tau\right), \quad (9)$$

де  $k_o^{max}$ ,  $\tau_o^{max}$  – максимальні відхилення від  $k_o^{ном}$  і  $\tau_o^{ном}$  відповідно;

$T_k$ ,  $T_\tau$  – періоди зміни функцій  $\Delta k_o(t)$  і  $\Delta \tau_o(t)$  відповідно;

$\varphi_k$ ,  $\varphi_\tau$  – зсув по фазі функцій  $\Delta k_o(t)$  і  $\Delta \tau_o(t)$  відповідно.

При цьому були задані такі номінальні значення параметрів  $k_o^{НОМ} = 1,5$ ;  $T_o^{НОМ} = 3,0$ ;  $\tau_o^{НОМ} = 2,0$  і такі значення їх відхилень  $k_o^{\max} = 1,0$ ;  $\tau_o^{\max} = 1,0$ . А також  $\varphi_k = -0,7$ ;  $\varphi_\tau = 0,7$ ;  $T_\tau = 7000 \cdot \tau_o^{НОМ}$ ;  $T_k = (2000 \div 7000) \cdot \tau_o^{НОМ}$ . Прийнято інтервал моделювання  $T_{\text{мод}} = 20000 \cdot \tau_o^{НОМ}$ , крок рішення  $\Delta t = \tau_o^{НОМ} / 20$ .

Для порівняльного аналізу за тих же умов, було змодельовано роботу САУ ГБ з базовим ПД-регулятором. При цьому настройки базового регулятора для розглядуваної системи були оптимальними, оскільки визначалися з урахуванням заданих діапазонів зміни параметрів ОУ.

Ілюстрацію функціонування систем при  $T_k = 2000 \cdot \tau_o^{НОМ}$  наведено на рисунку 3. Також подано кодування реалізацій ДВС, що діють на систему управління. Кожна подача ДВС зумовлює проведення ідентифікаційних процедур, за результатами яких здійснюється настроювання регулятора.

У вигляді критеріїв, що оцінюють якість роботи системи, було визначено такі показники:

– вилучення математичного сподівання регульованого параметра  $M[y(t)]$  від граничного значення  $y^{ГР}$ :

$$\Delta y^{np} = \frac{1}{T_{\text{мод}}} \int_0^{T_{\text{мод}}} (y^{np} - M[y(t)]) dt, \quad (8)$$

– значення дисперсії регульованого параметра  $y(t)$ :

$$D[y(t)] = \frac{1}{T_{\text{мод}}} \int_0^{T_{\text{мод}}} (y(t) - M[y(t)])^2 dt; \quad (9)$$

– число викидів  $y(t)$  за  $y^{сп}$ :  $N_B$ ;

– оцінка ймовірності безаварійної роботи на інтервалі  $T_{\text{мод}}$ :

$$\hat{P}^B = \exp(-\hat{n}_e \cdot T_{\text{мод}}), \quad (10)$$

Результати моделювання для всіх  $T_k$  зведено в таблиці 1.

На основі наведених даних можна зробити такий висновок. Ілюстрація застосування алгоритму адаптації в складі САУ ГБ підтверджує його дієздатність. При цьому якість функціонування цієї системи стає більш високою порівняно з САУ ГБ з базовим ПД-регулятором. Покращання спостерігається за всіма критеріями. Так, наприклад: вилучення математичного очікування регульованого параметра  $M[y(t)]$  від граничного значення  $y^{ГР}(t)$  зменшилося в середньому на 5%; значення дисперсії регульованого параметра  $y(t)$  зменшилося в середньому на 20%; число викидів  $y(t)$  за  $y^{ГР}(t)$  було відсутнє повністю. Усі ці фактори підтверджують доцільність використання розробленого алгоритму адаптації в системах управління.

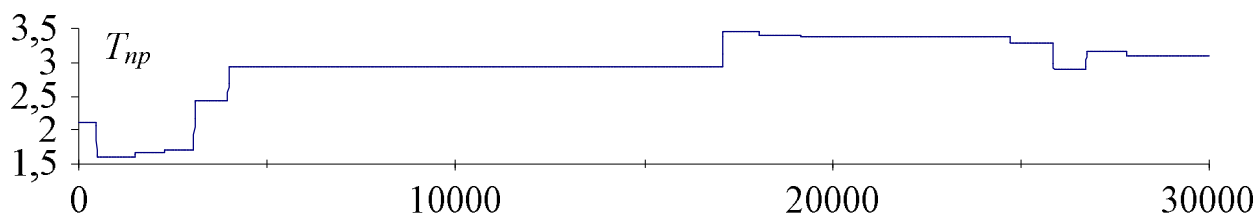
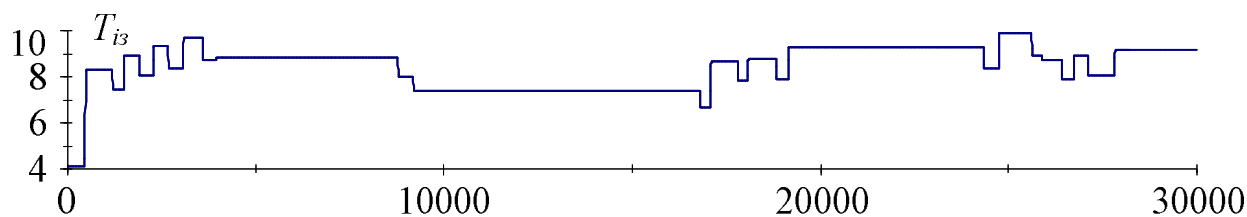
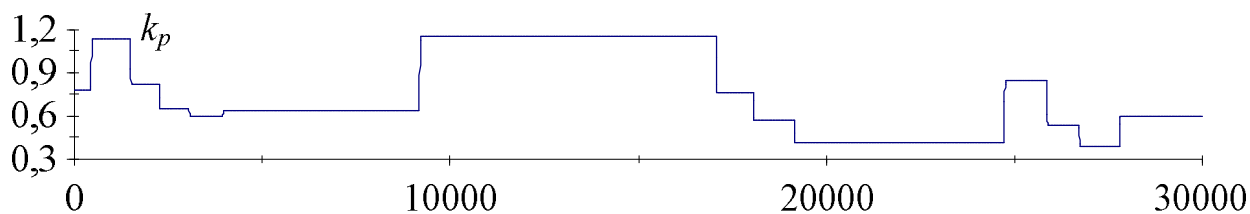
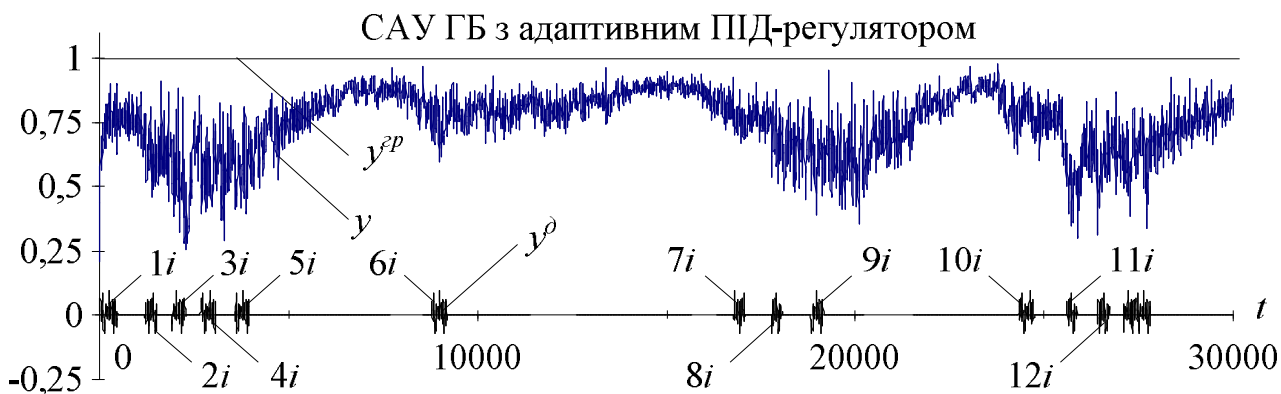
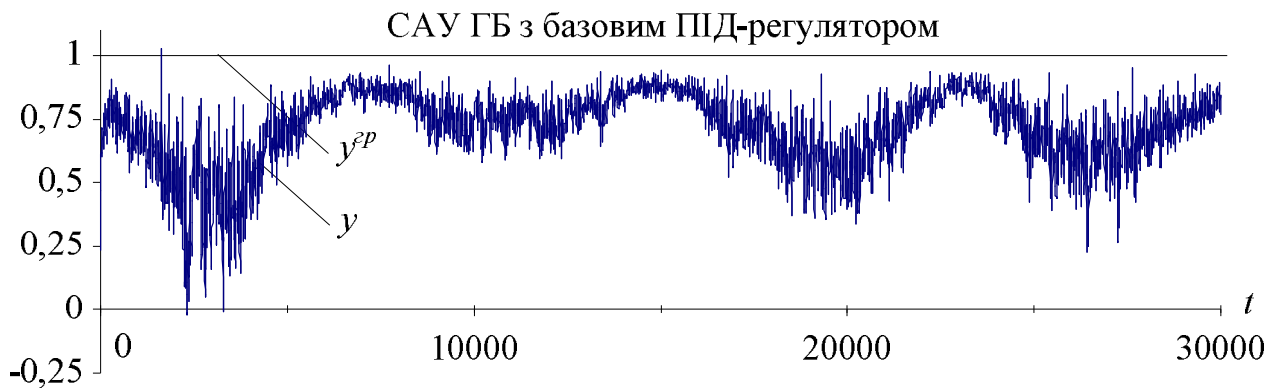
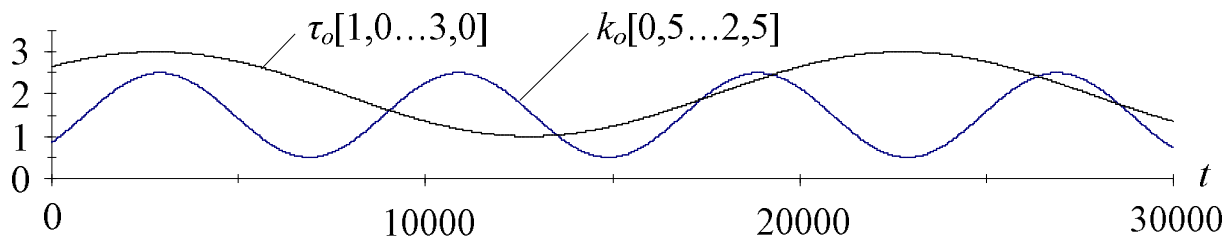


Рисунок 3 – Ілюстрація роботи варіантів САУ ГБ за умови зміни параметрів тестового об'єкта  $k_o$  і  $T_o$  ( $T_k = 2000 \cdot \tau_o^{ном}$ )



Таблиця 1 – Результати моделювання САУ ГБ з адаптацією регулятора (код 1а) і без адаптації (код 1б)

$T_k$	Алгоритм регулювання	Критерії функціонування САУ ГБ			
		$\Delta y^{GP}(t)$	$D[y(t)]$	$N_B$	$\hat{p}^B$
4000	1а	0,2468	0,0048	0	1
	1б	0,2824	0,0064	1	0,3673
6000	1а	0,2498	0,0050	0	1
	1б	0,2819	0,0064	2	0,1353
10000	1а	0,2599	0,0054	0	1
	1б	0,2896	0,0067	0	1
14000	1а	0,2150	0,0037	0	1
	1б	0,2434	0,0047	0	1

### Список літератури

1. Жислин Я.М. Дробильное и прессующее оборудование комбикормового завода: учеб. пособие / Я.М. Жислин, Б.И. Пикус. – М.: Агропромиздат, 1987. – 118 с.
2. Хобин В.А. Имитационная модель процесса гранулирования / В.А. Хобин, А.И. Парамонов // Моделирование в прикладных научных исследованиях: матер. семинара. – О., 1997. – С. 29-34.
3. Жигайло О.М. Ідентифікація моделі об'єкту в замкнутому контурі та її застосування в САУ ГБ / О.М. Жигайло, В.А. Хобін // Зб. наук. пр. – 2001. – Вип. 21. – С. 153-157.