

© А.В. Малієнко¹, Г.Г. Дяченко¹, І.М. Луценко¹,
С.О. Федоряченко¹, К.А. Зіборов¹, Є.В. Кошеленко¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СТРУКТУРА ТА АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДСИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОВШОВОГО ЕКСКАВАТОРА ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ГІДРАВЛІКОЮ

© A. Malienko¹, G. Diachenko¹, I. Lutsenko¹, S. Fedoriachenko¹, K. Ziborov¹, I. Koshelenko¹
¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

ENERGY EFFICIENT STRUCTURE AND HARDWARE OF BUCKET EXCAVATOR SUBSYSTEM AND HYDRAULIC CONTROL SYSTEM

Мета. Провести аналіз підсистем управління ковшового екскаватора, виходячи з особливостей енергоефективної структури та управління об'єкта.

Методика дослідження полягає в аналізі певного діапазону енергоефективного управління, оскільки інтенсивність навантаження тісно корелює з продуктивністю ковшового екскаватора при максимальному навантаженні та має значний вплив на енергоефективну структуру. Таким чином актуальність представлених досліджень полягає у встановленні параметрів регулювання енергоефективного навантаження на виконуючий орган екскаватора при максимальному навантаженні за умовами керування гідравлікою. Для рішення цієї задачі застосовується система управління екстремального регулювання, специфіка якої визначатиметься особливостями об'єкта управління.

Результати дослідження. Встановлено, що одним з найбільш ефективних є алгоритм, заснований на інформації про структуру робочого матеріалу та залежності параметрів від вхідної інформації керуючого органу на гідравлічну систему екскаватора.

Наукова новизна. Розглянуто задачу оптимізації процесу управління гідравлікою екскаваторів з урахуванням подрібнювального матеріалу та його впливу на систему енергоефективної роботи приводу екскаватора. Зауважено, що в реальних умовах ідеальних систем управління гідравлікою екскаваторів не існує. Аналіз роботи та проведення розрахункового експерименту показує, що об'єкт управління може бути представлений у вигляді аперіодичної ланки другого порядку. коливання системи. В результаті – проведено дослідження об'єкту управління отримана динамічна характеристика, дані для побудови статичної характеристики та перевірені дані. Таким чином, в роботі запропонована система управління підсистеми ковшового екскаватора та системи управління гідравлікою забезпечуючи найбільш інтенсивні параметри при максимальному навантаженні на робочий орган екскаватора.

Практичне значення. Встановлено, що процесу пошуку оптимального енергоефективного навантаження на гідравлічну систему слід надати кроковий характер. Величина кроку по параметру оптимізації і інші змінні пошукової процедури повинні вибиратися з умови мінімуму сумарної помилки, та підтримання оптимального енергоефективного режиму роботи системи.

Ключові слова: Енергоефективна структура, гідравлічна система екскаватора, системи управління, ідентифікації моделі, апаратного забезпечення.

Вступ: Аналіз досвіду роботи промислових ковшових екскаваторів на підприємствах та опрацювання теоретичних праць дослідників проектування та впровадження систем управління гідравлікою свідчить, що інтегровану систему управління енергоефективною підсистемою управління ковшового екскаватора можливо сформулювати лише на засадах впровадження високоавтоматизованої інформаційної системи управління. Незважаючи на значну кількість наукових і методичних праць, що стосуються при проектуванні та застосування інформаційних систем та технологій, проблема їх формування, впровадження, а головне – застосування в різних умовах роботи підсистеми управління ковшового екскаватора, досліджено недостатньо. Зокрема, недостатньо розглянуто питання проектування методичного та інформаційного забезпечення Енергоефективна управління гідравлічною системою та інтеграція результатів такого управління в загальну управлінську систему більш вищого рівня, недостатньо практично вирішуються питання моделювання процесів управління та вплив результатів моделювання на подальший розвиток, як окремого вузла, так і функціонування системи в цілому. Крім того, недостатньо формалізованим є апаратне представлення щодо організаційних формувань інтегрованих підсистем управління, які потребують уточнення і систематизації. Все це вимагає подальшого дослідження методологічних, методико-прикладних розробок створення інтегрованих систем управління, зокрема його методично-інформаційного та організаційного забезпечення.

Постановка задачі дослідження: Для забезпечення максимальної продуктивності роботи ковшового екскаватора по готовому класу необхідно шляхом перевірки потоку вихідних даних підтримувати такий рівень навантаження на виконуючий орган, при якій інтенсивність та енергоефективність роботи буде максимальною. З урахуванням дрейфу екстремальної залежності навантаженням, викликаній в основному зміною властивостей роботи екскаватору, визначено, що рішення цього завдання передбачає застосування управляючої системи екстремального регулювання, специфіка якої визначатиметься особливостями об'єкта управління та умов роботи.

Рішення задачі. Гідравлічна система екскаватора це складна сукупність агрегатної складової, що працюють за допомогою рідини та управління потоків. Для виконання широкого спектру робіт екскаватори оснащуються особливою гідравлічною системою, проектування та монтаж якої виконується висококваліфікованими фахівцям відповідної галузі [1].

Таким чином технологічний об'єкт, що розглядається в статті є - підсистема управління ковшового екскаватора з енергоефективною структурою. Система управління гідравлікою включає в себе комплекс технічних засобів, з'єднаних в певній послідовності: джерело енергії; перетворювач енергії одного роду у в інший; навантажувальний елемент (споживач енергії); технологічна установка; блок управління і контролю енергетичного режиму; блок управління і контролю технологічного режиму; допоміжне обладнання.

Гідравлічні системи встановлюється майже на всій екскаваторній техніці, тому що вона є ключовою системою, яка забезпечує її функціонування. Окремі

елементи та ціла система налаштовані для часткового відбору сили обертання основного двигуна, передачу цієї сили в гідравлічну енергію та направлення її до виконавчих органів та навісного обладнання.

Гідравлічна система керування екскаваторами формується з комплексу вузлів та агрегатів, які можна представити як підсистеми : зведеної регульованої помпи з підсумовуючим регулятором потужності; клапанного блоку; розподільчої апаратури; гідравлічного двигуна; гідроциліндра; фільтруючих елементів; колектора; бака для робочої рідини; гідроліній; з'єднувачів, фітингів та кріплень.

Гідравлічний екскаватор може бути оснащений системами двох типів – об'ємною або динамічною. Спецтехніка великих підприємств обладнується об'ємною гідравлічною системою під регулюванням тиском.

Об'ємний - більш компактний, в порівнянні з динамічною системою гідравліки, але швидкість переміщення рідкого середовища всередині неї досить мала. Для роботи з гідравлікою об'ємного типу потребується обладнання підвищеного тиску (350 МПа). Робочі камери гідравлічного насоса та двигуна поперемінно типу заповнюються спеціальними маслами та працюють під високим тиском.

Робота гідравлічної системи виглядає так [2]:

- приводний дизельний мотор крутить вал насосного гідро пристрою, який у свою чергу трансформує механічну енергію в гідравлічну;
- мастило прямує до гідромотора (циліндрів), через клапани управління потрапляє всередину і перетворює силу на механічну енергію або зворотно-поступальний хід органу виконання;
- мастило, виконавши свою роботу, повертається у бак по гідропривіду, потім переміщується до насоса;
- Цикл замкнений та повторюється.

Треба зазначити на несправності гідросистем екскаватора та вирішення їх за умовами сервісного обслуговування: підтікання у місцях з'єднання рідкого середовища; робота помпи підвищеного; спінювання мастила в маслобаку; шум при включенні клапанної апаратури; мала швидкість виконання операцій системи, або недостатнє зусилля робочих елементів; перегрів компонентів гідравліки [3].

Як видно з аналізу роботи гідравліки екскаватора - вона має складну організацію взаємодій ряду підсистем під управлінням загальної керуючої системи органів [4].

В якості об'єкта управління виступає орган керування гідравлікою. Вхідним параметром об'єкта управління є сигнали управління для переміщення та підсистеми управління. Вихідним параметром об'єкта управління є орієнтовна позиція органу виконання. Виходячи з цього, підсистема управління повинна включати датчики положення, гідропривід переміщення, пристрій управління та під'єднання до системи управління.

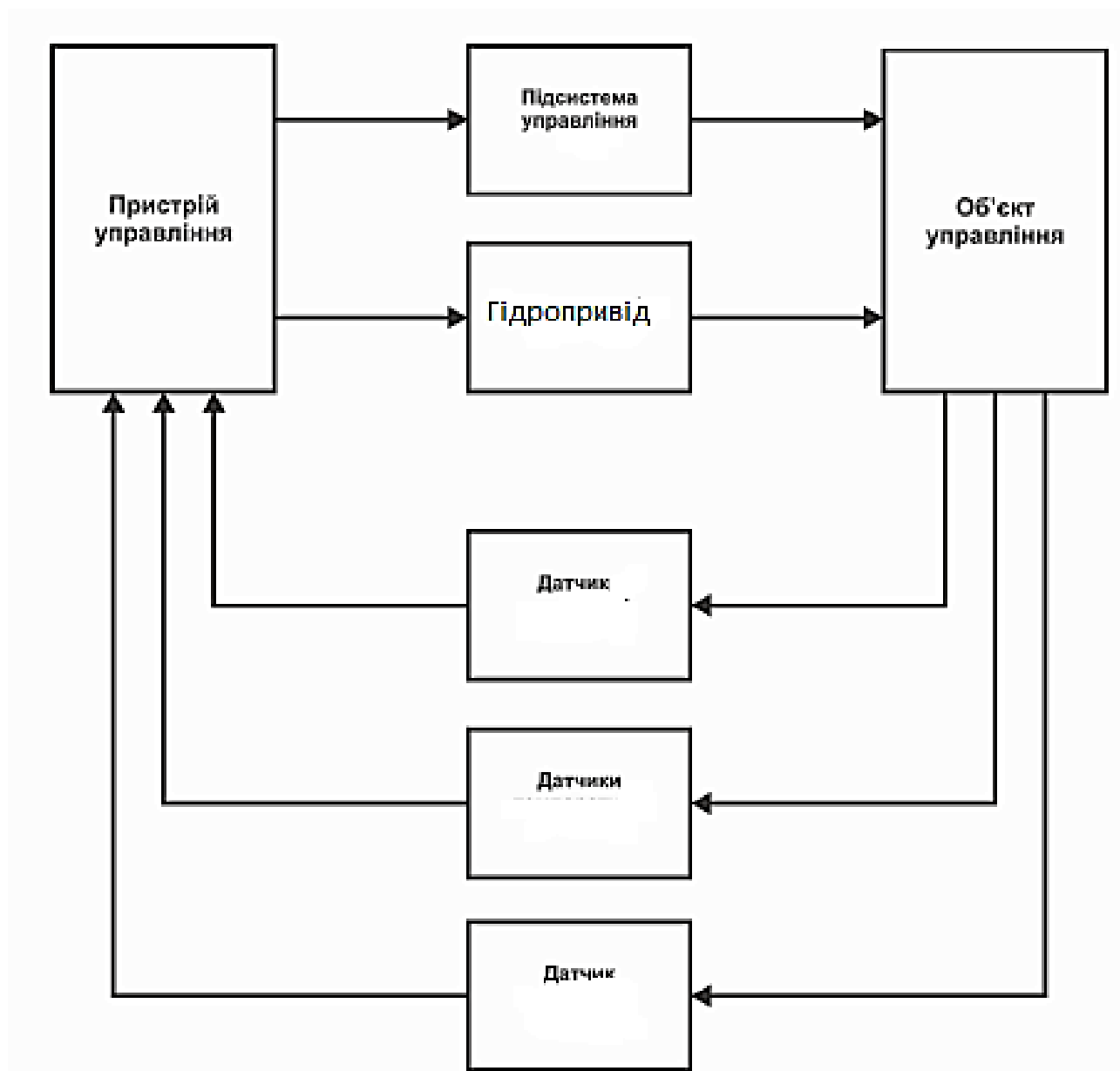


Рис. 1. Структурна схема підсистеми управління

Виходячи з вимог підсистема повинна забезпечувати управління підсистеми гідравлічного управління і тому відповідає підсистемі автоматизованого управління технологічним обладнанням. До неї входять пристрої збору інформації, еталони стану обладнання, система автоматичного контролю стану обладнання, програма управління яка повинна реалізувати формування керуючих впливів для відпрацювання управлінням, протиаварійний захист, блок переведу до ручного режиму управління та виконавчі пристрої. Структурна схема інформаційних потоків представлена на рисунку 2. Дана структура забезпечує відпрацювання управлінням гідравлічної системи екскаватора та є складовою системи управління вцілому.

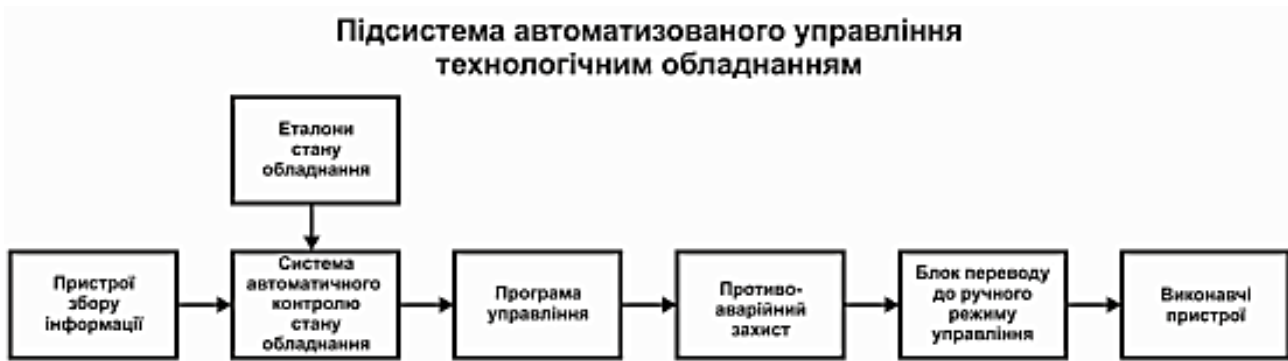


Рис. 2. Структурна схема інформаційних потоків

Основна підсистема роботи органу управління гідравлічним комплексом екскаватора призначена для збору інформації про об'єкт управління та подальшу структуру керування. Основними функціями системи є формування керуючого впливу який подається на об'єкт управління, реєстрування дійсного значення на виході об'єкта управління.

Таким чином система дозволяє формування різноманітних керуючих впливів та поданнях їх на виконуючий пристрій. При цьому об'єкт управління не може накладати обмеження на керуючий вплив. Виходячи з цього, для виконання ідентифікації об'єкта управління необхідно отримати його динамічну, статичну характеристику та перевірочні данні.

На підставі цього складемо план розробки та проведення розрахункового експерименту енергоефективного управління екскаватору та гідравлічної системи:

1. Налаштувати систему.
2. Отримати динамічну характеристику об'єкту управління.
 - 2.1. Привести об'єкт управління до початкових умов.
 - 2.2. Запустити процес реєстрування виконуючого органу.
 - 2.3. Подати у якості керуючого впливу 100% потужність, дочекатися досягнення усталеного режиму.
 - 2.4. Зупинити подачу керуючого впливу.
 - 2.5. Зупинити процес реєстрації.
3. Отримання даних за для побудови статичної характеристики.
 - 3.1. Привести об'єкт управління до початкових умов.
 - 3.2. Запустити процес реєстрування.
 - 3.3. Подати у якості керуючого впливу 30% потужність, дочекатися досягнення усталеного режиму.
 - 3.4. Подати у якості керуючого впливу 60% потужність, дочекатися досягнення усталеного режиму.
 - 3.5. Подати у якості керуючого впливу 90% потужність, дочекатися досягнення усталеного режиму.
 - 3.6. Зупинити подачу керуючого впливу.
 - 3.7. Зупинити процес реєстрації.
4. Отримання даних при – образному впливі.

- 4.1. Привести об'єкт управління до початкових умов.
- 4.2. Запустити процес реєстрування.
- 4.3. Подати у якості керуючого впливу 100% потужність, дочекатися досягнення усталеного режиму.
- 4.4. Подати у якості керуючого впливу 0% потужність, дочекатися досягнення усталеного режиму.
- 4.5. Зупинити процес реєстрації.
5. Отримання перевірочних даних.
 - 5.1. Привести об'єкт управління до початкових умов.
 - 5.2. Запустити процес реєстрування.
 - 5.3. Запустити програму відпрацювання тахограми.
 - 5.4. Зупинити подачу керуючого впливу.
 - 5.5. Зупинити процес реєстрації.

На першому етапі проведення експерименту проведення налаштування системи управління. На другому етапі було виконано отримання динамічної характеристики об'єкту управління (рис. 3).

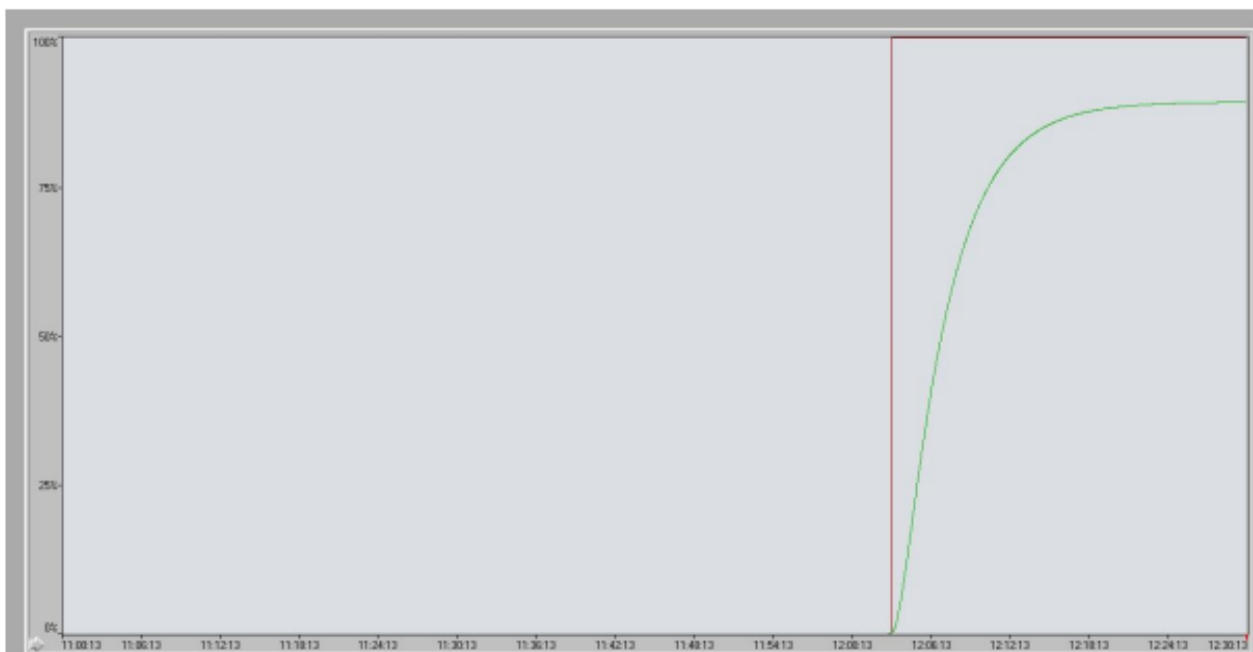


Рис. 3. Отримання динамічної характеристики

На третьому етапі було виконано отримання даних за для побудови статичної характеристики (рис. 4).

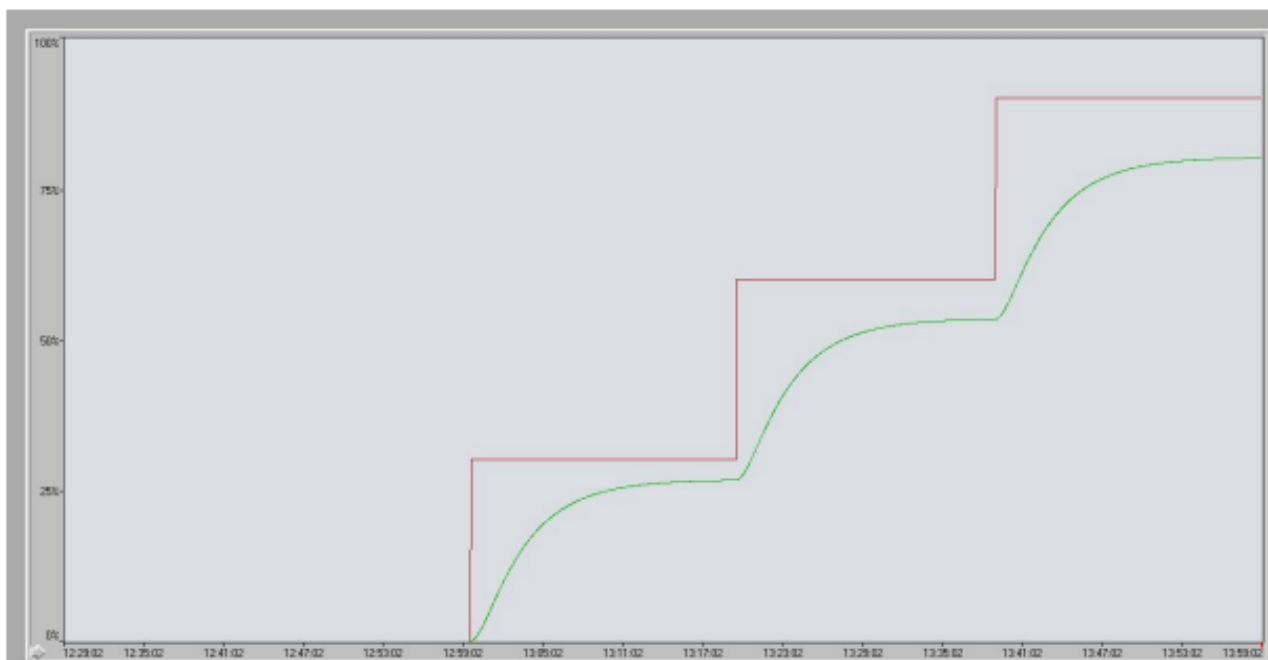


Рис. 4. Отримання за для побудови статичної характеристики

На четвертому етапі було виконано отримання даних при П – образному впливі(рис. 5). Для цього за допомогою програмованого коду на вхід пристрою було подано 100% данні дочекатися досягнення усталеного режиму. Потім подати у якості керуючого впливу 0% потужність, дочекатися досягнення усталеного режиму.

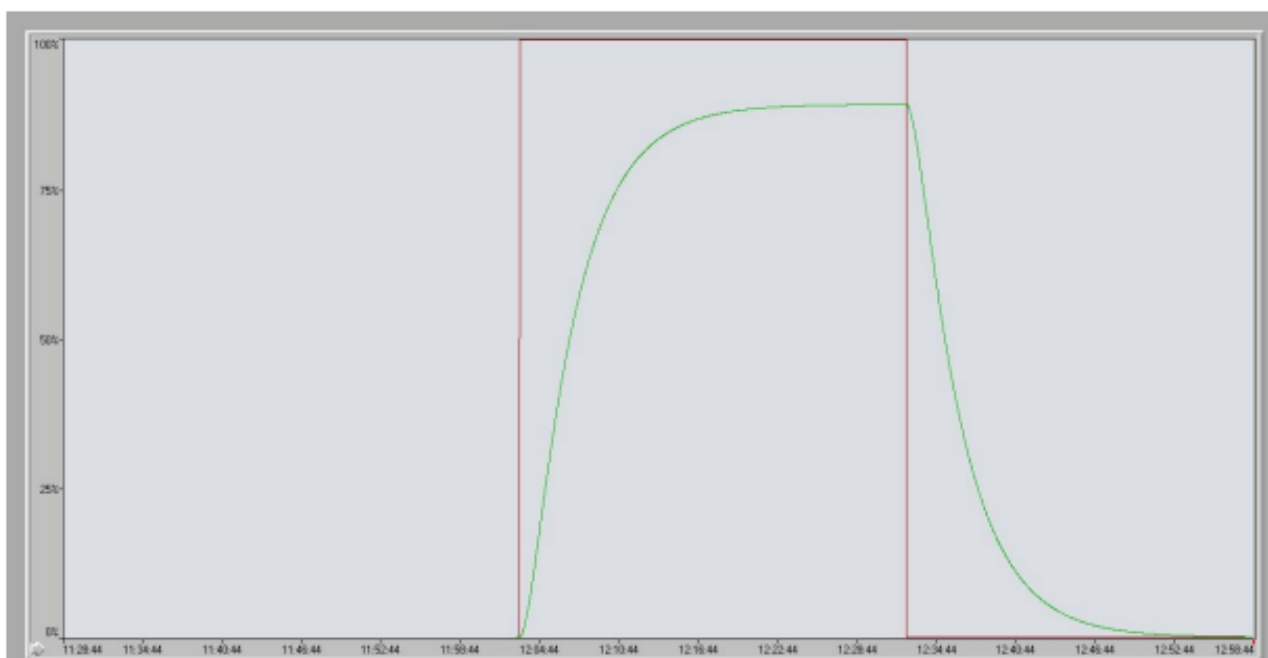


Рис. 5. Отримання за для побудови статичної характеристики

На п'ятому етапі було виконано отримання перевірочних даних (рис. 6). Для цього було використано програму розімкненого управління по відпрацюванню тахограми роботи органу опрацювання екскаватору.

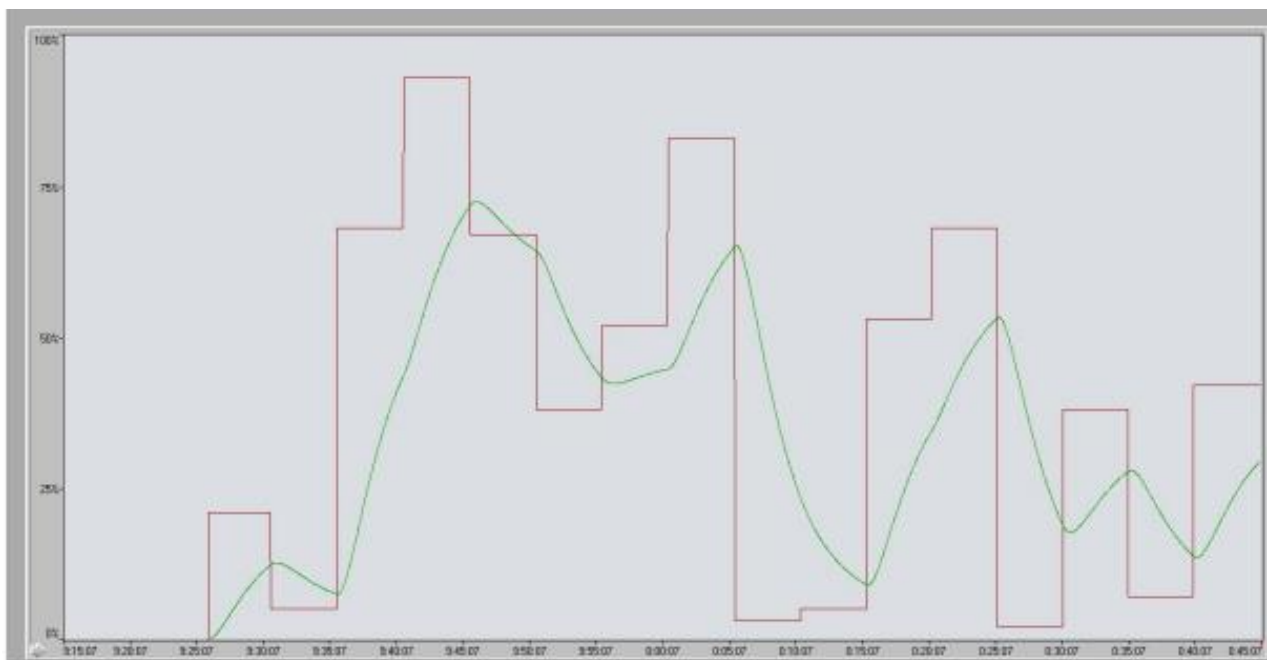


Рис. 6. Отримання перевірочних даних

У результаті виконання плану розрахункового експерименту проведено дослідження об'єкту управління. В результаті чого отримана динамічна характеристика, дані для побудови статичної характеристики та перевірочні дані.

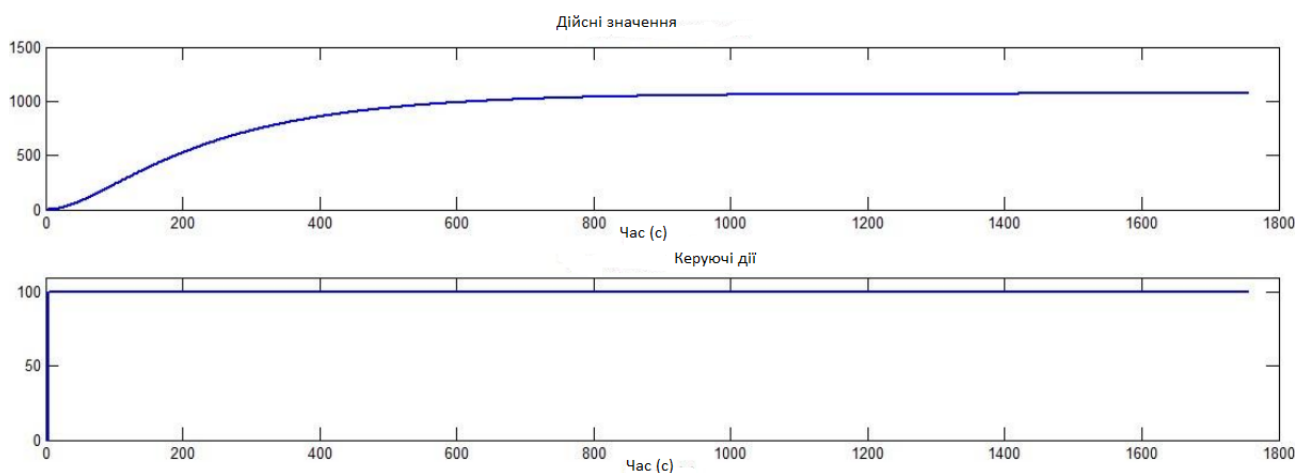


Рис. 7. Динамічна характеристика об'єкта управління

З метою оцінки структури моделі об'єкту управління проаналізуємо динамічну характеристику об'єкту управління (див. рис. 7). Після подачі керуючого впливу виконання відбувається без запізнення. Крім того на характеристиці також відсутня інерція, характер перехідного процесу монотонний, а кількість переги-

нів не більше двох. На підставі цього зробимо висновок, що модель об'єкта управління може бути представлена у вигляді аперіодичної ланки другого або більш високого порядку та може використовуватись для аналізу енергоефективної роботи екскаваторної техніки.

Зробивши аналіз об'єкта управління на лінійність при цьому його статична характеристика представлена на рисунку 8:

```
>>Static_Input_Vector = [30, 60, 90];
>>Static_Output_Vector = [319.6, 640.4, 961.8];
>>plot(Static_Input_Vector, Static_Output_Vector);
```

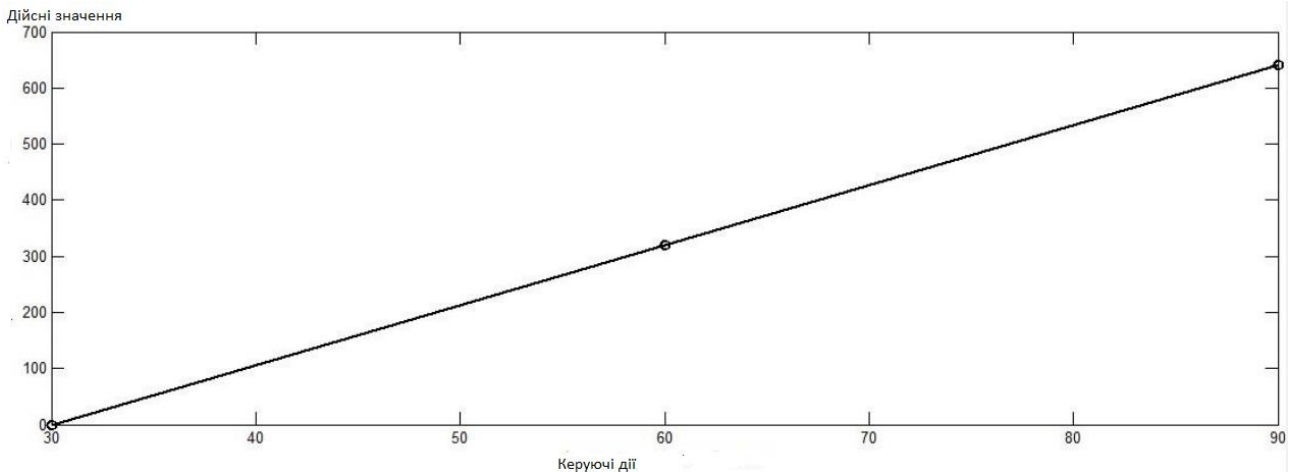


Рис. 8. Статична характеристика об'єкта управління

Статична характеристика об'єкта управління є лінійна. На підставі цього можливо зробити висновок, що об'єкт управління також є лінійним у всьому діапазоні швидкостей та навантажень на працюючий орган екскаватора при керуванні гідравлічною системою.

Для перевірки об'єкта управління на симетричність, тобто відповідності динаміки ділянки збільшення дійсного значення та ділянці зменшення дійсного значення буде використана функція розрахунку стандартного відхилення:

```
>>(std(Output_pulseUp) - std(Output_pulseDown))*100/1069
ans = 0.2327
```

Виходячи з проведеного аналізу експериментальних даних можливо зробити висновок, що об'єкт управління може бути представлений у вигляді аперіодичної ланки другого порядку:

$$W_{(s)} = \frac{k}{(T1_s + 1) + (T2_s + 1)},$$

де $W_{(s)}$ – передавальна функція, k – коефіцієнт підсилення, $T1, T2$ – постійна часу (с).

Визначення постійної часу об'єкта управління виконуємо за допомогою “SystemIdentificationToolbox”, якому у якості робочих даних використані данні динамічної характеристики, а перевірочні данні для оцінки відповідності моделі

об'єкту управління, так як ці данні раніше не використовувалися при ідентифікації (рис. 9).

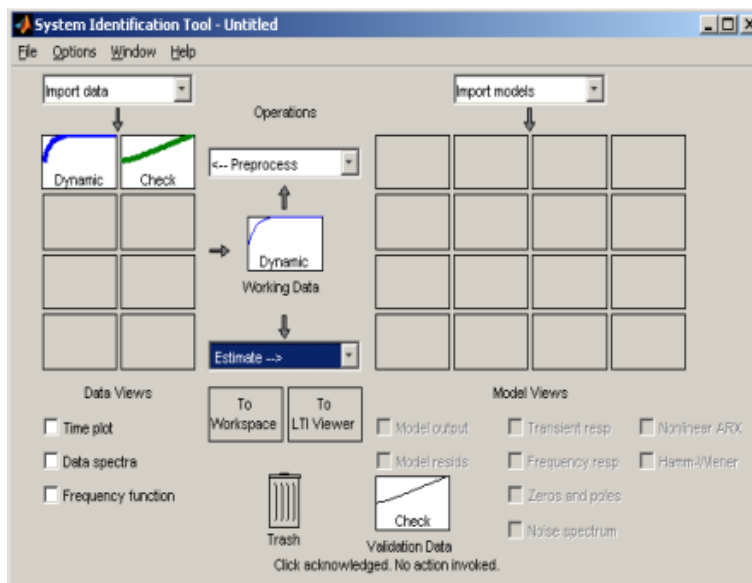


Рис. 9. Налаштування SystemIdentificationToolbox

Визначення параметрів моделі об'єкту управління проводимо за допомогою методу "ProcessModels". Налаштування параметрів ідентифікації наведено на рисунку 10. Розрахунок параметрів виконано для аперіодичної ланки другого порядку, і для аперіодичної ланки третього порядку виконуючого органу екскаватора.

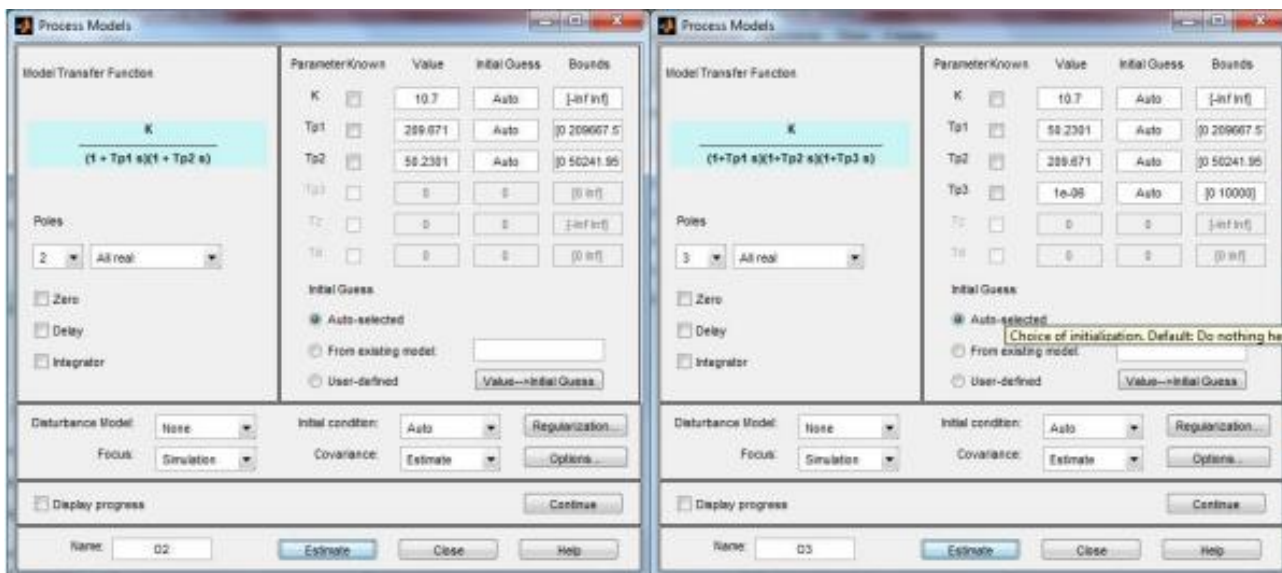


Рис. 10. Налаштування ProcessModels опрацювання роботи системи

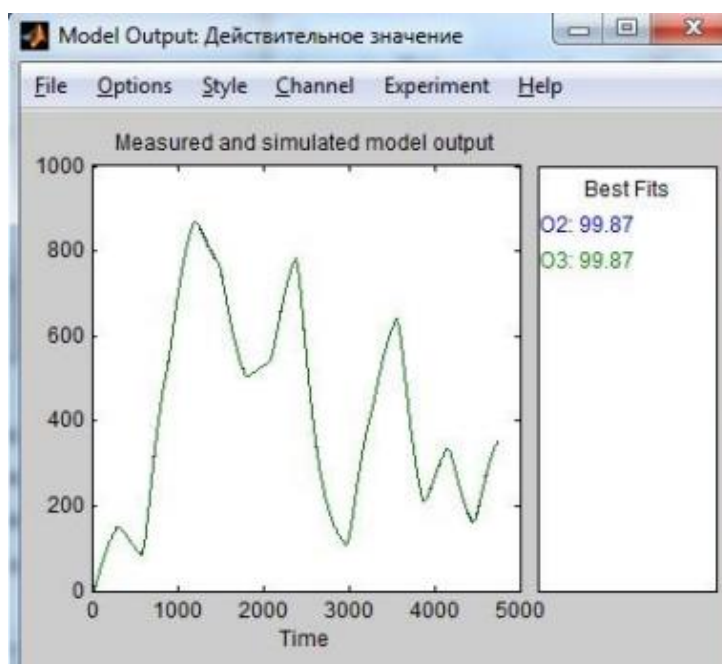


Рис.11. Перевірка результатів розрахунків

На підставі проведеної перевірки заповнюємо таблицю розрахункових даних об'єкту управління.

Таблиця

Результат розрахунку параметрів об'єкта керування

Назва параметру	O2	O3
K	10.7	10.7
T1, с	209.67	50.23
T2, с	50.23	209.67
Назва параметру	O2	O3
T3, с	-	0
Dynamic – Динамічна характеристика		
NRMSE, %	99.98	99.98
FPE	0.003204	0.003211
MSE	0.003188	0.003188
Check – Перевірочні данні		
NRMSE, %	99.87	99.87

На підставі проведеного аналізу та розрахунків отримана модель об'єкту управління у виді передавальної функції:

$$W_{(s)} = \frac{10.7}{(209.607_s + 1) + (50.23_s + 1)}$$

За результатами ідентифікації розроблена діюча модель об'єкту управління в графічному середовищі імітаційного моделювання Simulink (рис. 12) у вигляді передавальної функції.

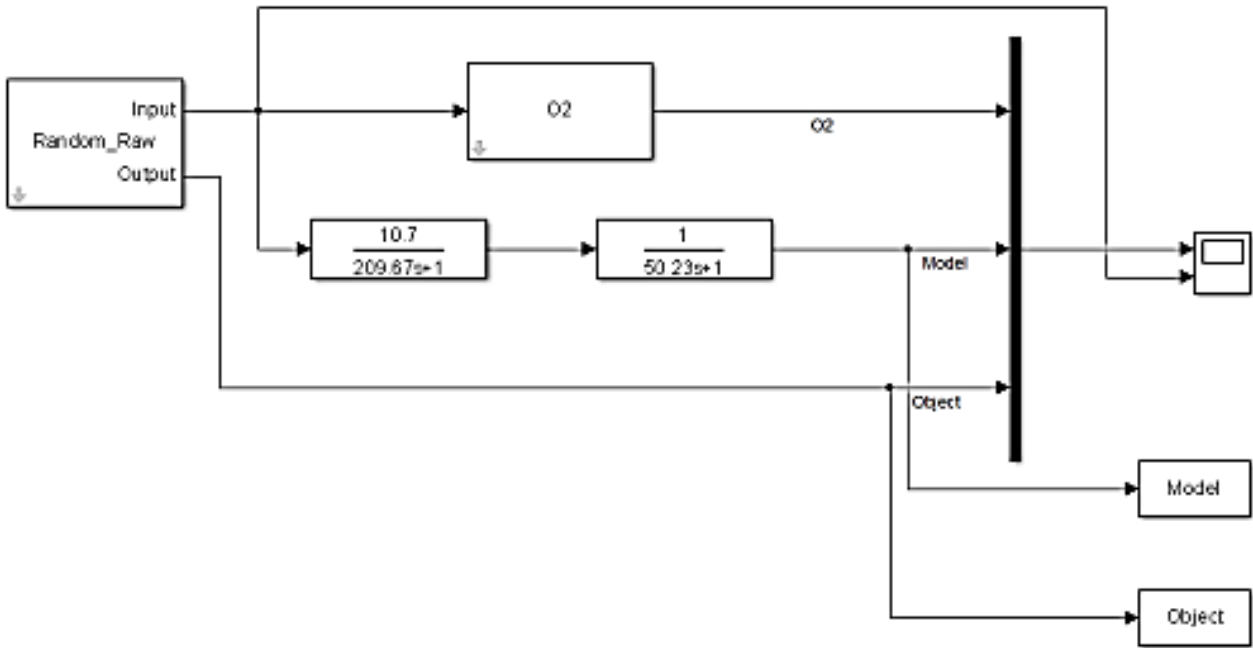


Рис.12. Модель об'єкту управління в середовищі Simulink

Результати моделювання реального об'єкту управління виконуючим органом екскаватора з використання перевірочних даних наведені на рисунку 13. Згідно отримана модель об'єкту у вигляді передавальної функції не відрізняється від моделі об'єкту отриманої у програмному забезпеченні "Systemidentificationtoolbox".

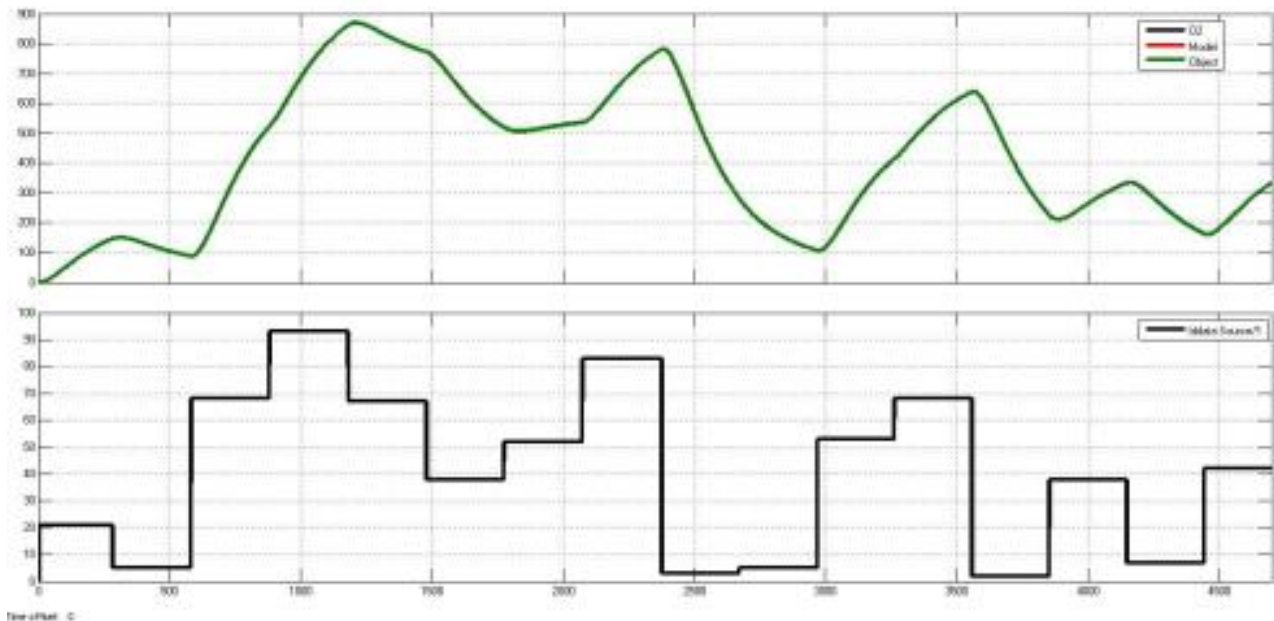


Рис. 13. Результати моделювання роботи гідравлічної системи

Крім того результати моделювання практично не відрізняються від перевірочних даних. Таким чином отримана модель у вигляді передавальної функції може бути використовуватися у подальших дослідженнях.

Висновки. В результаті - проведено дослідження об'єкту управління отримана динамічна характеристика, дані для побудови статичної характеристики та перевірені дані. Таким чином, в роботі запропонована система управління підсистеми ковшового екскаватора та системи управління гідравлікою забезпечуючи найбільш інтенсивні параметри при максимальному навантаженні на робочий орган екскаватора.

Перелік посилань

1. Баладинський В. Л. (1997). *Будівельні машини: Збірник вправ*.
2. Баладинський В. А. (2001) *Будівельна техніка. Навч посібник*. Либідь.
3. Черненко В.К.(2005). *Технологія будівельного виробництва*. Вища школа
4. Зіборов, К.А, Федоряченко, С.О., Бешта, О.О., Луценко, І.М., Малієнко А.В., & Худолій, С.С. (2020). Обґрунтування кінематичних параметрів ківшового екскаватора. *Збірник наукових праць НГУ*, 62, 156-167.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/62.156>

АННОТАЦІЯ

Цель. Провести анализ подсистем управления ковшовым экскаватором, исходя из особенностей энергоэффективной структуры и управления объекта.

Методика исследования заключается в анализе определенного диапазона энергоэффективного управления, поскольку интенсивность нагрузки тесно коррелирует с производительностью ковшового экскаватора при максимальной нагрузке и оказывает значительное влияние на энергоэффективную структуру. Таким образом, актуальность представленных исследований заключается в установлении параметров регулирования энергоэффективной нагрузки на исполняющий орган экскаватора при максимальной нагрузке по условиям управления гидравликой. Для решения данной задачи применяется система управления экстремального регулирования, специфика которой будет определяться чертами объекта управления.

Результаты исследования. Установлено, что одним из наиболее эффективных является алгоритм, основанный на информации о структуре рабочего материала и зависимости параметров от входящей информации управляющего органа на гидравлическую систему экскаватора.

Научная новизна. Рассмотрена задача оптимизации процесса управления гидравликой экскаваторов с учетом измельчающего материала и его влияния на систему энергоэффективной работы привода экскаватора. Замечено, что в настоящих условиях безупречных систем управления гидравликой экскаваторов не существует. Анализ работы и проведение расчетного эксперимента показывает, что объект управления может быть представлен в виде аperiodического звена второго порядка. колебания системы. В результате проведено исследование объекта управления получена динамическая характеристика, данные для построения статической характеристики и проверочные данные. Таким образом, в работе предложена система управления подсистемы ковшового экскаватора и системы управления гидравликой, обеспечивая наиболее интенсивные параметры при максимальной нагрузке на рабочий орган экскаватора.

Практическое значение. Установлено, что процессу поиска оптимальной энергоэффективной нагрузки на гидравлическую систему следует придать шаговый характер. Величина шага по параметру оптимизации и другие переменные поисковой процедуры должны выбираться из условия минимума суммарной ошибки и поддержания оптимального энергоэффективного режима работы системы.

Ключевые слова: Энергоэффективная структура, гидравлическая система экскаватора, системы управления, идентификации модели, аппаратного обеспечения.

ABSTRACT

Goal. To analyze the control subsystems of the bucket excavator, based on the features of energy-efficient structure and management of the object.

The research methodology consists in the analysis of a certain range of energy efficient control, as the intensity of the load is closely correlated with the performance of the bucket excavator at maximum load and has a significant impact on the energy efficient structure. Thus, the relevance of the presented research is to establish the parameters for regulating the energy-efficient load on the executive body of the excavator at maximum load under the conditions of hydraulic control. To solve this problem, an extreme control control system is used, the specifics of which will be determined by the characteristics of the control object.

Research results. It is established that one of the most effective is an algorithm based on information about the structure of the working material and the dependence of the parameters on the input information of the control body on the hydraulic system of the excavator ..

Scientific novelty. The problem of optimizing the process of excavator hydraulics control taking into account the crushing material and its impact on the system of energy efficiency of the excavator drive is considered. It is noted that in real conditions there are no ideal control systems for excavator hydraulics. Analysis of the work and the calculation experiment shows that the control object can be represented as a second-order aperiodic link. system fluctuations. As a result, a study of the control object obtained dynamic characteristics, data for the construction of static characteristics and verification data. Thus, the control system of the bucket excavator subsystem and the hydraulic control system providing the most intensive parameters at the maximum load on the working body of the excavator is offered in the work.

Practical meaning. It is established that the process of finding the optimal energy-efficient load on the hydraulic system should be given a step-by-step nature. The magnitude of the step on the optimization parameter and other variables of the search procedure should be selected based on the minimum total error, and maintaining the optimal energy efficiency of the system.

Keywords: *Energy efficient structure, excavator hydraulic system, control systems, model identification, hardware.*