

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ НА ОСНОВІ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ФУНКЦІЙ

А.О. Семенцова, Л.В. Гавадзин

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727167,  
e-mail: kafatr@ukr.net

*Розглядається науково-практична задача ідентифікації структури та параметрів такого складного об'єкта керування, як процес буріння нафтових і газових свердловин електробурами. Показано, що потужність сучасних обчислюваних засобів дає змогу успішно вирішувати цю задачу на практичному рівні в режимі реального часу. Врахована обмежена кількість інтервалів автокореляційних функцій для ідентифікації досліджуваного об'єкта керування з використанням рівняння Вінера-Хопфа, оскільки через нелінійність і нестационарність процесу буріння неможливо одержати математичну модель, глобальну у всьому просторі вхідних і вихідних даних. Показано, що така задача ідентифікації є невизначеною, оскільки на практиці внаслідок невідомих зовнішніх збурень структуру та параметри математичної моделі процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами не можна вважати постійними. Суттєвою відмінністю одержаних математичних моделей є те, що вони не містять у явному вигляді коефіцієнтів у традиційній формі, оскільки роль коефіцієнтів виконують значення кореляційних функцій. Уточнити модель треба на кожному інтервалі керування, коли долото переходить в породи з іншими фізико-механічними властивостями.*

Ключові слова: математичні моделі, кореляційні функції, електробур, передавальні функції, перехідні характеристики.

*Рассматривается научно-практическая задача идентификации структуры и параметров такого сложного объекта управления, как процесс бурения скважин электробурами. Показано, что мощность современных вычислительных средств позволяет успешно решать эту задачу на практическом уровне в режиме реального времени. Учтено ограниченное количество интервалов автокорреляционной функции для идентификации исследуемого объекта управления с использованием уравнения Винера-Хопфа, так как нелинейность и нестационарность процесса бурения не позволяют получить математическую модель, глобальную на всем пространстве входных и выходных данных. Показано, что такая задача идентификации является неопределенной, поскольку на практике вследствие неизвестных внешних возмущений, структуры и параметры математической модели процесса бурения нефтяных и газовых скважин электробурами невозможно считать постоянными. Существенным отличием полученных математических моделей является то, что они не содержат в явном виде коэффициентов в традиционной форме, так как роль коэффициентов выполняют значения корреляционных функций. Уточнение модели следует проводить на каждом интервале управления, когда долото перешло в породы с другими физико-механическими свойствами.*

Ключевые слова: математические модели, корреляционные функции, электробур, передаточные функции, переходные характеристики.

*The theoretical and practical problem of identification the structure and parameters of a complex object management as the process of drilling oil and gas wells electrodrills is considered. It is shown that the calculated power of modern appliances helps to solve this problem on a practical level in real time. A limited number of slots to identify the autocorrelation function of the investigated object control using Wiener-Hopf equations is taken into account, since not linear and stationary drilling process does not augur well for obtaining the mathematical model global in input and output data. It is shown that this problem of identification is uncertain because, in practice, due to unknown external disturbances, the structure and parameters of a mathematical model of the process of drilling oil and gas wells electrodrills may not be considered permanent. The essential difference between the obtained mathematical models is that they do not contain explicitly the coefficients in the traditional manner, as the role of the coefficients is carried out by important correlation functions. Refinement of the model should be performed at each control interval when the bit shifted in breeds with other physical and mechanical properties.*

Keywords: mathematical models, correlation functions, an electrodrill, transfer functions, transient properties.

**Вступ.** Моделювання процесу буріння свердловин електробурами на основі кореляційних функцій є актуальною науково-практичною задачею для вирішення проблем дуального керування – ідентифікації структури і параметрів об'єкта керування у реальному часі і визначення керувальних дій. Проте, аналіз літературних джерел [1÷4, 7,8,10,11 та ін.] вказує на недостатній об'єм проведених досліджень у напрямку використання автокореляційних і взаємкореляційних функцій для визначення передавальних функцій такого складного об'єкта, як процес буріння нафтових і газових свердловин електробурами.

**Аналіз стану досліджень та публікацій.** У світовій практиці буріння нафтових і газових свердловин спостерігається глобальний перехід до буріння горизонтальних свердловин з підвищеними вимогами до керування швидкістю буріння і напрямом траєкторії стовбура свердловини [1], що дозволяє по-новому вирішити проблему розробки родовищ вуглеводнів. Слід відзначити, що саме електробуріння призначене для спорудження не тільки вертикальних, але й похило-спрямованих та розгалужено-горизонтальних свердловин глибиною до 7000 м і більше з максимальною осьовою силою на

Таблиця 1 – Технічні дані електробурів

Тип електробура	Позначення основного конструкт. документу	Діаметр, мм	Довжина, мм	Потужність номінальна, кВт	Напруга номінальна, В	Струм номінальний, А	Частота обертання номінальна, об/хв	Крутий момент, кН·м		ККД, %	cos φ	Маса, кг
								номінальний	максимальний			
ЕП164-8-В5	АОЗП. 611241.001	164	11570±15	65	1100	89	675	0,900	1,890	60,0	0,64	1485±10
ЕП164-8М-В5	АОЗП. 611241.002	164	11950±15	65	1100	89	675	0,900	1,890	60,0	0,64	1506±10
ЕП190-8-В5	АОЗП. 611241.003	190	12882±15	125	1300	125	675	1,700	3,570	67,5	0,66	2190±15
ЕП190-8М-В5	АОЗП. 611241.004	190	12840±15	125	1300	125	675	1,700	3,570	67,5	0,66	2175±15
ЕП215-8-В5	АОЗП. 611241.005	215	13794±15	175	1550	131	680	2,400	5,040	72,0	0,69	3020±25
ЕП215-8М-В5	АОЗП. 611241.006	215	13466±15	175	1550	131	680	2,400	5,040	72,0	0,69	2980±25
ЕП240-8-В5	АОЗП. 611241.007	240	13689±15	210	1700	144	690	2,800	7,000	75,0	0,66	3630±30
ЕП240-8М-В5	АОЗП. 611241.008	240	13546±15	210	1700	144	690	2,800	7,000	75,0	0,66	3583±30
ЕП290-12-В5	АОЗП. 611241.009	290	12766±15	180	1750	123	455	3,7800	7,938	71,0	0,68	4650±40

долото  $\leq 100 \div 500$  кН відповідно до діаметрів електробурів 164–290 мм (табл.1).

Буріння свердловин з використанням сучасних електробурів має декілька суттєвих переваг [1÷4] порівняно з іншими способами буріння:

- безпосередній зв'язок електродвигуна з долотом покращує технологічність буріння і дає змогу використовувати раціональні режими роботи привода долота;

- під час буріння свердловин електробурами відсутні значні механічні зусилля у колоні бурильних труб, які при роторному способі іноді досягають небезпечних значень;

- із збільшенням довжини свердловини зростає її собівартість, тому підведення енергії для руйнування породи безпосередньо до долота є найбільш раціональним;

- на відміну від турбобурів, робота електробурів безпосередньо не залежить від якості і кількості промивальної рідини, що значно розширює можливості їх використання при бурінні із промиванням вибою свердловини обваженими розчинами; для очищення вибою при бурінні свердловини електробурами якість промивального розчину визначається здебільшого умовами, необхідними для винесення породи на поверхню; при цьому потрібна кількість промивальної рідини значно менша, ніж при турбінному способі, що суттєво зменшує вагу бурових установок, полегшує їх транспортування і монтаж, збільшує термін служби бурильних колон, зменшує витрати металу;

- у випадку використання електробурів в складних геологічних умовах, при проводці похило-спрямованих, розгалужено-горизон-

тальних, опорно-технологічних свердловин із застосуванням алмазних доліт;

- при бурінні свердловин електробурами створюються сприятливі умови для автоматизації процесу буріння і здійснення неперервного контролю за режимами роботи зануреного електродвигуна, крім того, та за фізико-механічними властивостями гірських порід; порівняно просто контролювати викривлення свердловини за допомогою систем телеметрії.

Проте, буріння електробурами має недоліки, головними з яких є [2, 3, 4]:

- невелика надійність струмопідведення і двигуна електробура (табл. 2);

- невеликі номінальні ККД (60÷75 %) і коефіцієнт потужності (0,64–0,69);

- велика частота обертання вала двигуна, що потребує використання редукторів-вставок;

- відсутність засобів контролю потужності і моменту на валі електродвигуна, напруги на його затискачах, швидкості обертання вала, які дозволили б оцінити повноту використання потужності двигуна електробура під час буріння, а також суттєва похибка вимірювання існуючих засобів контролю.

При похило-спрямованому бурінні покази індикатора ваги стають недостовірними, тому осьове навантаження, фізико-механічні властивості порід і технічний стан долота у процесі буріння можна оцінювати лише непрямими методами, контролюючи величину потужності, яку споживає двигун електробура або моменту на його валі.

Таблиця 2 – Показники надійності електробурів

Назва показника	Електробур діаметром, мм				
	164	190	215	240	290
Середній термін служби, років:					
• електродвигуна	3	3	3	3	3
• шпинделя	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Середній ресурс, год.					
• електродвигуна	1000	1200	1600	1600	2000
• шпинделя	500	600	800	800	1000
Середній час відновлення працездатного стану, год.	35	40	45	45	50

У свердловинах, що мають великий похил, внаслідок зависання інструменту під час буріння, рекомендується [5] осьове зусилля на долото контролювати за величиною потужності і питомого моменту за формулою

$$F = \frac{975(N_d - N_0)}{M_n \cdot n}, \quad (1)$$

де  $N_d$  – потужність на долоті, яка визначається за методикою [5];

$N_0$  – потужність, що витрачається на обертання долота без осьового зусилля;

$M_n$  – питомий момент для даного типу долота, яке працює у даній породі при певній швидкості обертання.

Його величина підраховується за даними буріння вертикальних свердловин або приймається з таблиць [5];

$n$  – швидкість обертання долота з даним електробуром.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є моделювання процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами на основі рівняння Вінера-Хопфа, яка базується на використанні автокореляційних і взаємкореляційних функцій випадкових процесів, що дозволяє здійснювати ідентифікацію моделі процесу у реальному часі.

**Виклад основного матеріалу.** Електробуріння нафтових і газових свердловин має суттєві переваги у порівнянні з бурінням турбобуром і ротором, головними з яких є нечутливість до витрати промивальної рідини, відсутність втрат потужності на обертання колони бурильних труб та їх мале механічне зношування, неперервне отримання інформації про викривлення і кут нахилу свердловини від телеметричної системи по жилі кабельних секцій, можливість опосередкованого контролю обертального моменту на долоті.

Відзначимо: якщо при бурінні ротором (рис. 1) обертання передається від установленого на поверхні двигуна роторному столу 6 бурової установки, а від нього через спеціальну квадратну трубу 4 – колоні бурильних труб 7, з'єднаний з долотом 8, то при бурінні електробуром 9 немає необхідності в обертанні всієї колони бурильних труб, так як крутний момент

передається долоту від вала привода, розміщеного безпосередній близькості до долота.

Осьове зусилля створюється частковою вагою бурильної колони, яке регулюється шляхом зміни швидкості подачі бурильної колони в свердловину з допомогою бурильної лебідки 5, чи спеціального регулятора подачі. Бурова лебідка, вишка 3 і поліспаг, який складається із кронблока 1, талевого блока і оснащений сталевим талевим канатом 2, складають вантажопідйомний пристрій бурової установки. Він використовується при підйомі колони бурильних труб з відпрацьованим долотом і опускання її після заміни долота, а також при регулюванні подачі колони в свердловину в міру заглиблення долота, опускання обсадної колони тощо. [3].

Процес буріння свердловин електробурами як об'єктами керування відноситься до класу слабковизначених об'єктів, що мають нелінійні статичні і динамічні характеристики. Проблема керування таким нелінійним динамічним об'єктом, що розвивається в часі, функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності структури та параметрів і перебуває під впливом зовнішніх завад, є однією з ключових у сучасній теорії керування.

Багато авторів [2, 3] вирішувало проблему оптимізації буріння виходячи з умови, що осьова сила  $F$ , прикладена до бурового долота, і швидкість його обертання  $n$  є незалежними керувальними діями. Тому статичні і динамічні властивості процесу буріння досліджувались на основі аналізу взаємозв'язків показників процесу буріння окремо з кожною керувальною дією:  $F$  або  $n$ . Проте, швидкість обертання долота залежить від осьової сили на долото  $n=f(F)$ , яка обумовлена видом механічних характеристик привода долота і механізму подачі бурильного інструменту.

Результатами досліджень [8] доведено, що для опису функціональної залежності швидкості обертання долота  $n$  від осьової сили на долото  $F$  підходить емпірична формула Naerl Model

$$n = a \cdot b^F \cdot F^c, \quad (2)$$

де  $a=1,27$ ;  $b=0,66$ ;  $c=-0,32$  – значення коефіцієнтів моделі (2) для умов експерименту, описаного в [8].



Рисунок 1 – Структурна схема процесу буріння свердловин електробуром

Відносна похибка моделі дорівнює 0,0037, а абсолютна середньо-квадратична похибка –  $S=0,0016$ .

Відзначимо, що задовільні результати дає також опис зв'язку  $n=f(F)$  моделями Weibull Model, Rational Function, MMF Model та ін.

Отже, під час ідентифікації математичної моделі процесу буріння за умов, що  $F = \text{var}$ ,  $n = \text{const}$  незалежно від експериментатора при зміні осової сили  $F \in (F_{\min}, F_{\max})$  швидкість обертання долота  $n = \text{var}$ . Внаслідок цього отримані результати не відповідають умові, що експеримент проведено з  $n = \text{const}$ . Проте, відзначимо, що добуток  $F \cdot n$  характеризує потужність, яка підводиться до долота. За таких умов доцільно досліджувати властивості процесу буріння, користуючись інформацією, яку можна отримати під час буріння свердловин електробуром. При цьому потужність на долоті  $P(t)$  є контрольованою величиною. Контрольованими є також струм двигуна  $I(t)$ , проходка долота  $h(t)$ , відносне зношення оснащення долота  $\varepsilon(t)$  і механічна швидкість буріння  $V_m(t)$ .

Як об'єкт дослідження розглянемо процес буріння свердловин в умовах Прикарпаття електробуром E215-8 з долотом діаметром 243 мм з телеметричною системою СТЕ-164, струмоприймачем ТЕ-2, станцією керування і захисту УЗЕБ та знижувальним трансформатором ТМТБ-560-6. Свердловина РГ-801Д, проектна глибина 2343 м.

Методи дослідження такого об'єкта при випадкових впливах базуються на використанні методів математичної статистики, а інформаційною базою слугують результати експериментальних досліджень.

Визначимо математичне сподівання, дисперсію, середньо-квадратичне відхилення за допомогою програмного пакету Mathcad [9] користуючись характеристиками вибірок даних потужності електробура  $P$  [кВт], струму, який споживається двигуном електробура  $I$  [А], відносного зношення долота  $\varepsilon$ , механічної швидкості буріння  $V_m$  [м/год]:

$$\begin{aligned}
 & \text{ORIGIN:=1} \\
 & P:=(190 \ 190 \ 167 \ 170 \ 190 \ 188 \ 193 \ 190 \ 140 \\
 & \quad 180 \ 145 \ 150 \ 173 \ 170 \ 186 \ 186 \ 185 \ 172 \\
 & \quad 156 \ 148 \ 148 \ 148 \ 148 \ 149 \ 150 \ 149)^T \\
 & \text{ORIGIN:=1} \\
 & I:=(90 \ 90 \ 85 \ 87 \ 89 \ 92 \ 94 \ 92 \ 80 \ 84 \ 82 \ 83 \ 87 \\
 & \quad 85 \ 90 \ 91 \ 90 \ 87 \ 85 \ 83 \ 82 \ 82 \ 82 \ 85 \ 87 \ 88)^T \\
 & \text{ORIGIN:=1} \\
 & \varepsilon:=(0.28 \ 0.25 \ 0.27 \ 0.33 \ 0.22 \ 0.24 \ 0.24 \ 0.5 \ 0.4 \\
 & \quad 0.4 \ 0.54 \ 0.44 \ 0.47 \ 0.41 \ 0.43 \ 0.35 \ 0.48 \\
 & \quad 0.5 \ 0.45 \ 0.63 \ 0.63 \ 0.55 \ 0.56 \ 0.41 \ 0.4)^T \\
 & \text{ORIGIN:=1} \\
 & V_m:=(3.55 \ 3.66 \ 3.3 \ 3.75 \ 2.98 \ 4.63 \ 4.08 \ 4.08 \\
 & \quad 1.98 \ 2.55 \ 1.87 \ 2.28 \ 2.1 \ 2.42 \ 2.31 \ 2.87 \\
 & \quad 2.05 \ 2 \ 2.21 \ 1.6 \ 1.58 \ 1.8 \ 1.78 \ 2.42 \ 2.5)^T
 \end{aligned}$$

Результати аналізу наведено в таблиці 3.

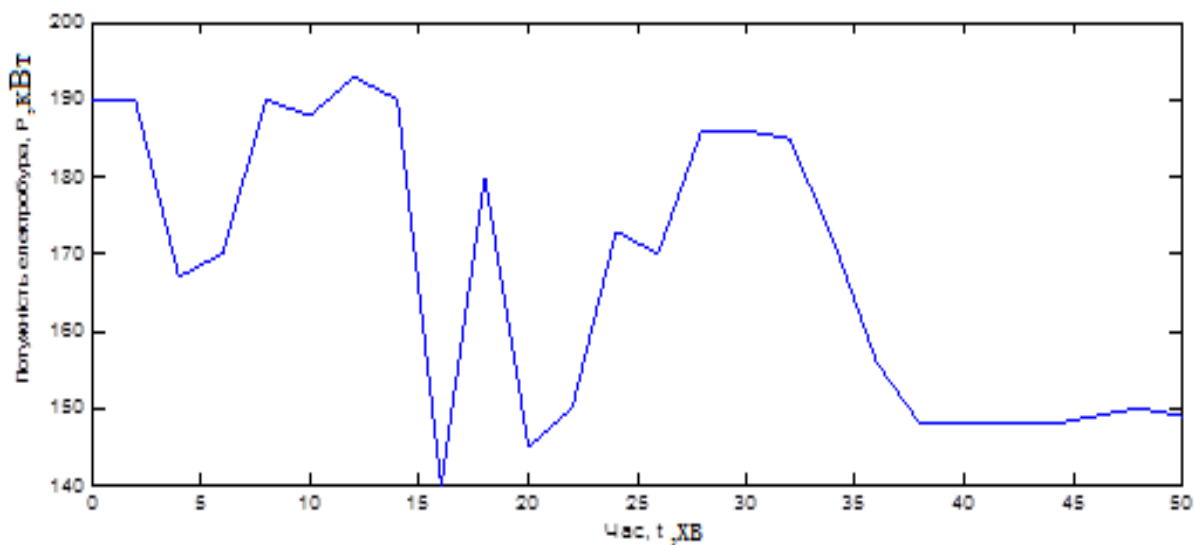


Рисунок 2 – Графік зміни потужності, яку споживає електробур E215-8, у часі

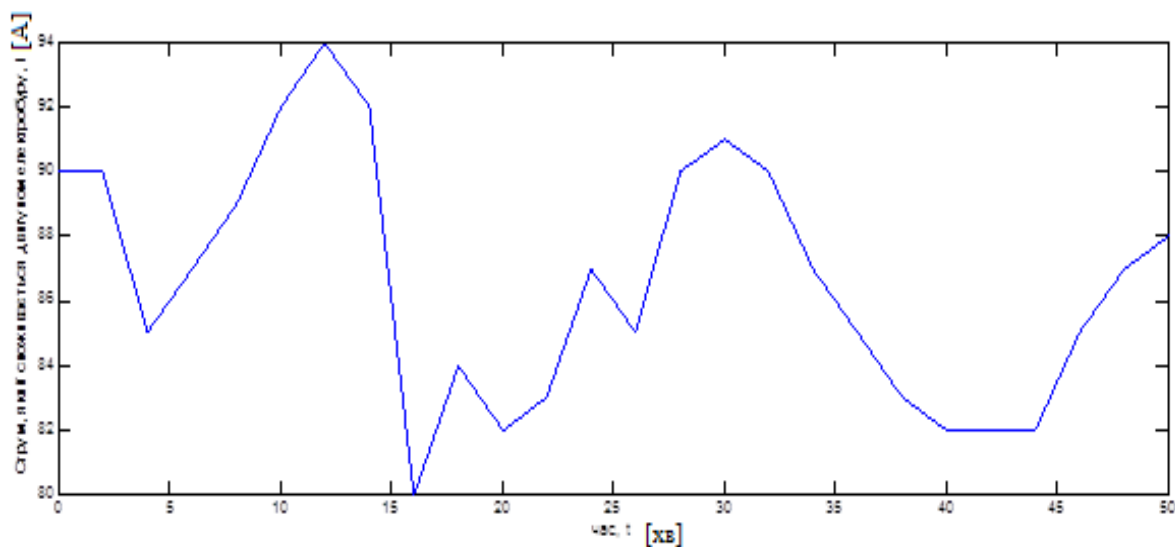


Рисунок 3 - Графік зміни струму, який споживається двигуном електробура E215-8, у часі

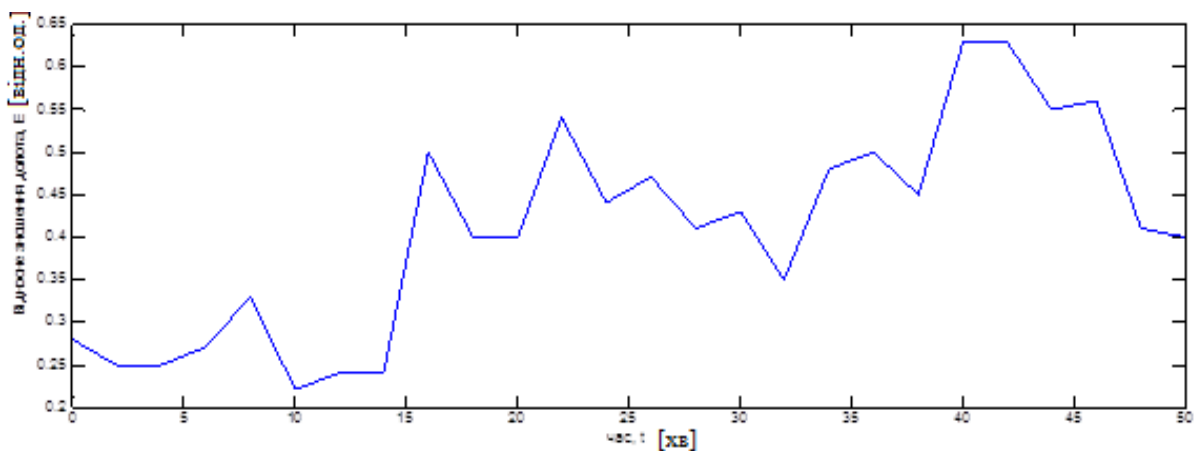


Рисунок 4 – Графік зміни відносного зношення долота у часі

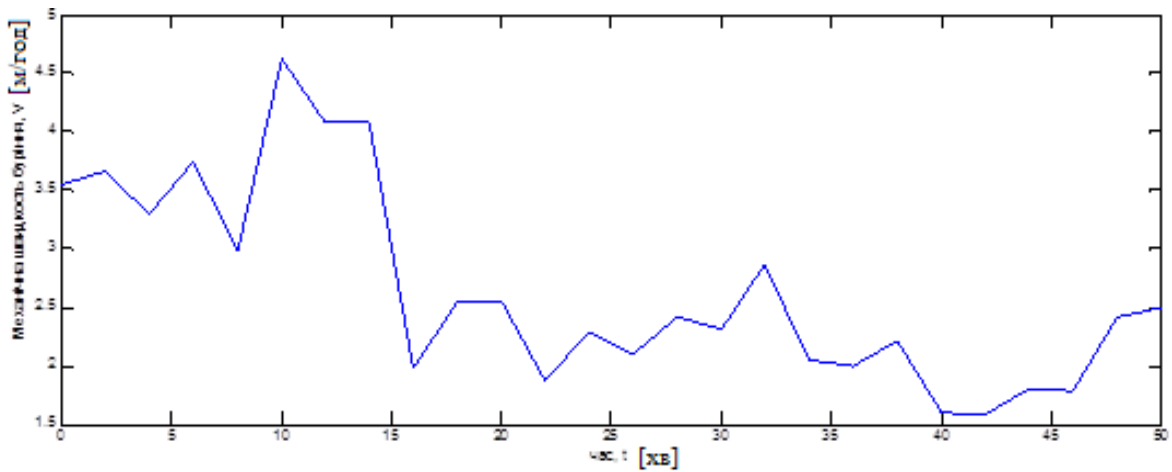


Рисунок 5 – Графік зміни механічної швидкості буріння у часі

Таблиця 3 – Дані статистичної аналізу значень параметрів процесу буріння

№	Показник	Формула	Значення параметра			
			P, кВт	I, А	ε, год/м	V <sub>м</sub> , м/год
1	Математичне сподівання	$\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n N_i$	167,7	86,6	0,409	2,65
2	Середнє геометричне	$\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n N_i}$	166,7	86,5	0,39	2,53
3	Середнє гармонічне	$(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i})^{-1}$	165,8	86,4	0,371	2,423
4	Дисперсія					
	Зміщена оцінка	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_i - m)^2$	327,6	13,8	0,014	0,696
	Незміщена оцінка	$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - m)^2$	340,7	14,3	0,015	0,724
5	Середнє квадратичне відхилення					
	Зміщена оцінка	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_i - m)^2}$	18,1	3,7	0,12	0,834
	Незміщена оцінка	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - m)^2}$	18,4	3,8	0,123	0,851
6	Медіана	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i N_i$	170	87	0,41	2,42
7	Ексцес	$\frac{\mu_3}{\delta^3} - 3$	-0,01	-0,985	-0,902	-0,313
8	Асиметрія	$\frac{\mu_3}{\delta^3}$	-1,721	0,127	0,058	0,826

де N – значення випадкового сигналу відповідного параметра;  
 n – дискретний час, крок дискретизації рівний 2 хв;  
 m – математичне сподівання;  
 δ – середнє квадратичне відхилення;  
 μ – центральний емпіричний момент 3-го порядку.

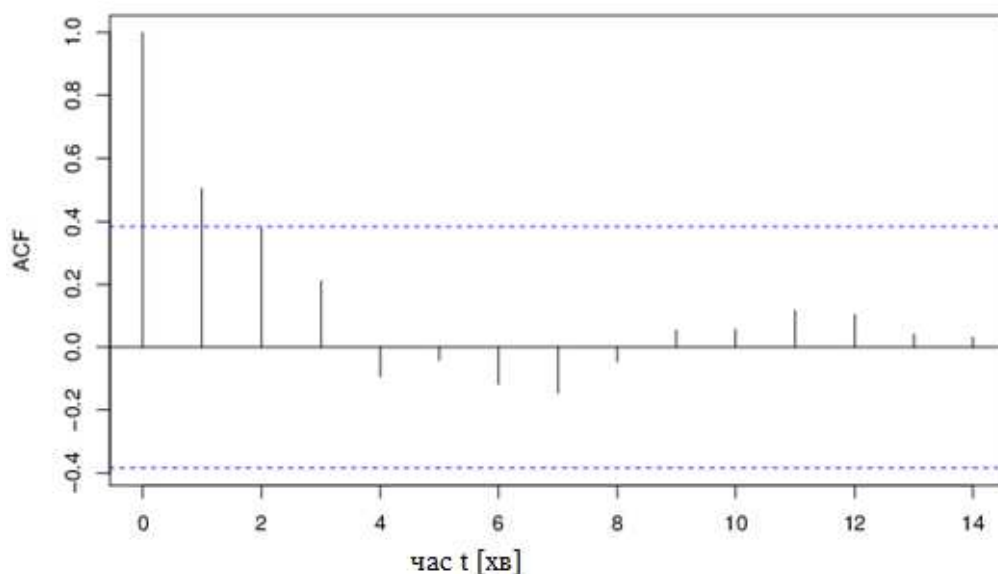


Рисунок 6 – Графік нормованої автокореляційної функції потужності, спожитої системою «струмопідвід – занурений двигун електробура»  $P$  (кВт)

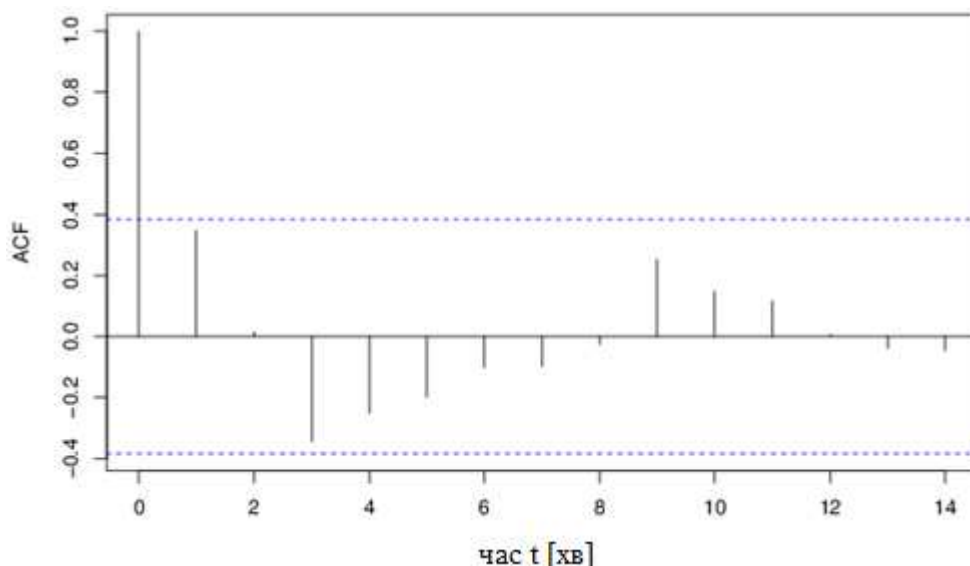


Рисунок 7 – Графік нормованої автокореляційної функції струму, який споживається двигуном електробура  $I$  (А)

Для випадкової функції математичне сподівання та дисперсія, не є достатніми для оцінки характеру протікання випадкового процесу в часі. Необхідно ще встановити зв'язок між значеннями випадкового процесу в різні моменти часу.

Інтенсивність зміни випадкового сигналу в часі можна охарактеризувати за допомогою однієї з функцій – автокореляційної функції або функції спектральної густини.

Для побудови автокореляційної функції скористаємось середовищем Autocorrelation Online [9] (рис. 6-9).

Як видно з рис. 6-9, випадкові сигнали містять приховану періодичну складову. Такий сигнал має експоненціальну – косинусну автокореляційну функцію.

$$R(\tau) = De^{-\alpha(\tau)} \cos \beta\tau. \quad (3)$$

Параметр  $\beta$  цієї функції відповідає середньому значенню “періода” прихованої складової, а параметр  $\alpha$  характеризує відносну інтенсивність інших випадкових складових, що накладені на періодичну складову. Якщо показник  $\alpha$  малий і близький до значення  $\beta/2\pi$ , то відносний рівень цих складових невеликий, і змішаний сигнал близький до гармонічного. Якщо ж показник  $\alpha$  великий і рівний  $(5 \div 10)\beta/2\pi$ , то рівень випадкових складових співмірний з “амплітудою” періодичної складової. При  $\alpha \geq 20\beta/\pi$  кореляційна функція практично збігається (з точністю 5%) з експонентою [10].

Виходячи із рисунків, визначили параметри  $\alpha$  та  $\beta$  та отримали такі рівняння нормованих автокореляційних функцій відповідних параметрів:

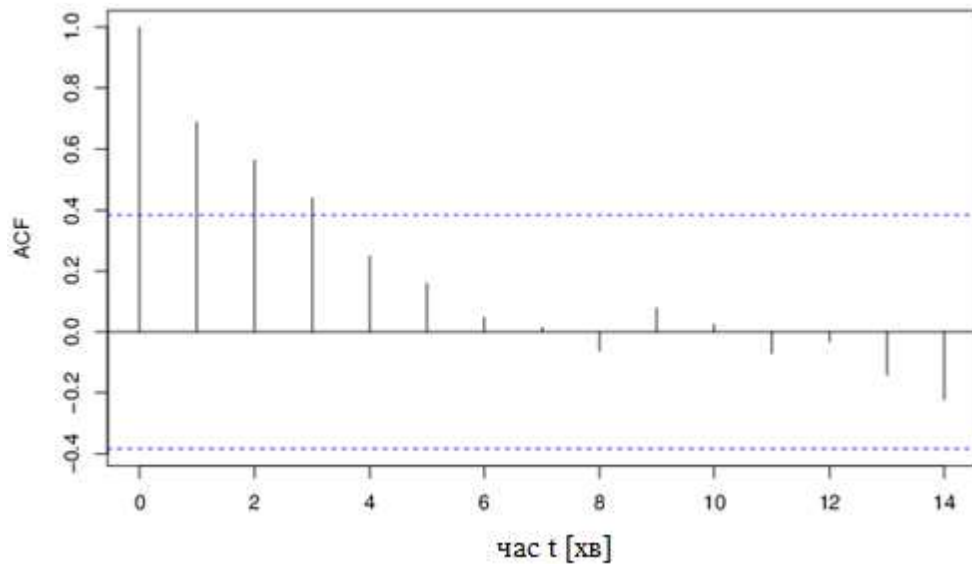


Рисунок 8 – Графік нормованої автокореляційної функції відносного зносу долота ε (год/м)

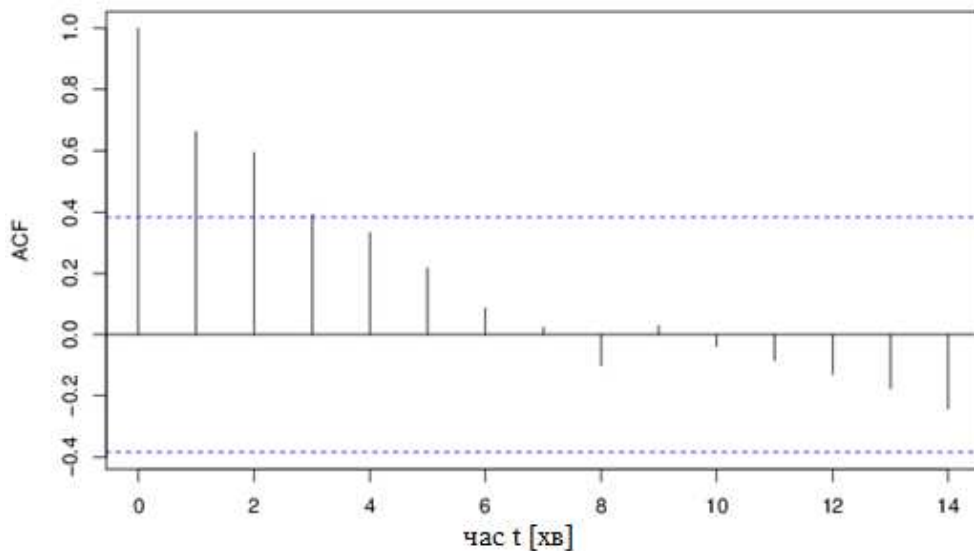


Рисунок 9 – Графік нормованої автокореляційної функції механічної швидкості буріння V<sub>м</sub> (м/год)

$$R_{PP}(t) = 327.6e^{-0.44(t)} \cos 0.785t, \quad (4)$$

$$R_{II}(t) = 13,775e^{-0.31(t)} \cos 1.05t, \quad (5)$$

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(t) = 0.014e^{-0.4(t)} \cos 0.39t, \quad (6)$$

$$R_{V_m V_m}(t) = 0.696e^{-0.6(t)} \cos 0.39t. \quad (7)$$

Автокореляційним функціям (1)-(7) відповідають спектральні густини, що обчислені за формулою:

$$S(\omega) = \frac{D\alpha}{\alpha^2 + (\beta - \omega)^2} + \frac{D\alpha}{\alpha^2 + (\beta + \omega)^2}, \quad (8)$$

$$S_P(\omega) = \frac{144,14}{0,19 + (0,785 - \omega)^2} + \frac{144,14}{0,19 + (0,785 + \omega)^2}, \quad (9)$$

$$S_I(\omega) = \frac{4.27}{0,1 + (1,05 - \omega)^2} + \frac{4.27}{0,1 + (1,05 + \omega)^2}, \quad (10)$$

$$S_\varepsilon(\omega) = \frac{0.01}{0,16 + (0,39 - \omega)^2} + \frac{0.01}{0,16 + (0,39 + \omega)^2}, \quad (11)$$

$$S_{V_m}(\omega) = \frac{0.42}{0,36 + (0,39 - \omega)^2} + \frac{0.42}{0,36 + (0,39 + \omega)^2}. \quad (12)$$

Спектральна густина є додатною функцією у всьому діапазоні частот – від 0 до  $\infty$ . Вона не містить відомостей про фази окремих гармонічних складових.

Побудовано спектральні густини з використанням програмного пакету Matchcad [9] (рис. 10, 11, 12, 13).

З використанням аналогічної програми MathCad побудовано спектральну густина для струму, який споживається двигуном (рис. 11), відносного зносу долота (рис. 12), механічної швидкості буріння (рис. 13).



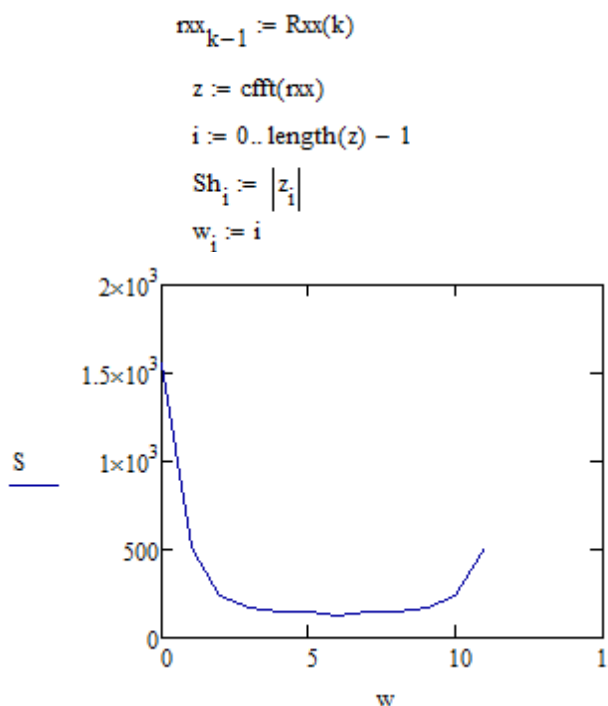


Рисунок 10 – Графік спектральної густини потужності, спожитої системою «струмопідвід – занурений двигун електробура»

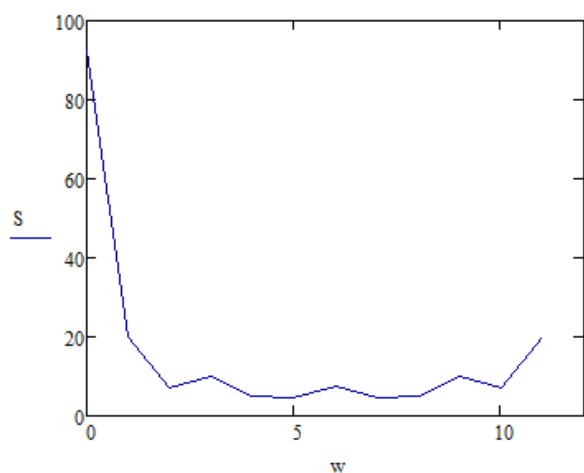


Рисунок 11 – Графік спектральної густини струму, який споживається двигуном електробура

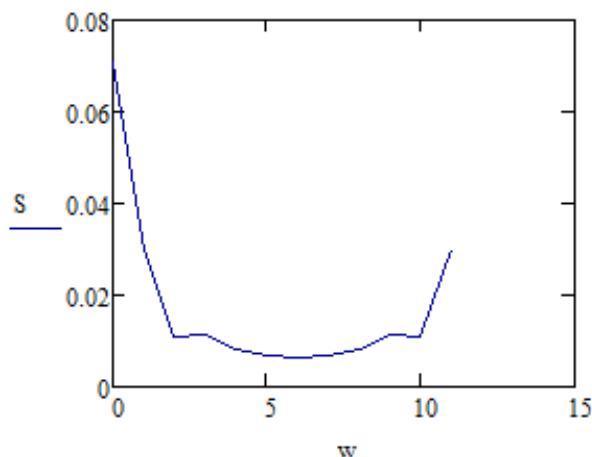


Рисунок 12 – Графік спектральної густини відносного зносу долота

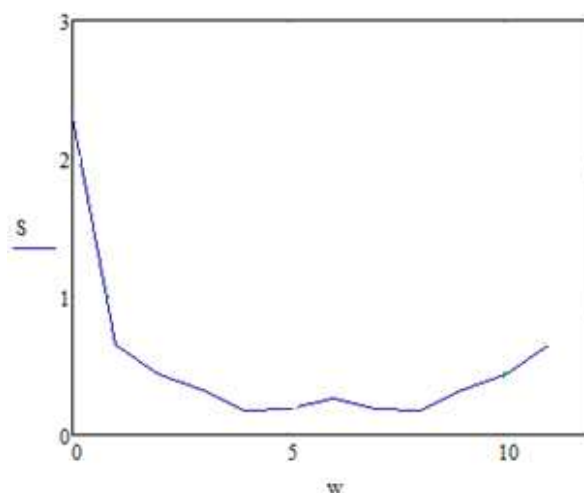


Рисунок 13 – Графік спектральної густини механічної швидкості буріння

Після проведення статистичного аналізу переходять до знаходження динамічних характеристик технологічного процесу буріння свердловин електробурами  $W(s)$  за відомими імовірнісними характеристиками. Для цього використовують рівняння Вінера-Хопфа, яке встановлює зв'язок між кореляційними функціями вхідного  $X(t)$  і вихідного  $Y(t)$  сигналів, що діють у лінійній динамічній системі:

$$R_{xy}(t) = \int_0^t K(t) R_{xx}(t) dt, \quad (13)$$

де  $R_{xy}(t)$  – взаємна кореляційна функція між вхідним і вихідними сигналами;

$R_{xx}(t)$  – автокореляційна функція вхідного сигналу;

$K(t)$  – імпульсна перехідна функція, що однозначно визначає функцію передачі

$$W(s) = \int_0^{\infty} K(t) e^{-st} dt. \quad (14)$$

Проте для розв'язання інтегральних рівнянь (12), (13) необхідно визначити взаємні кореляційні функції. Це можна зробити за допомогою розрахункової формули (14), використовуючи програмне середовище Matchcad [9].

$$R_{xy}(t) = \frac{1}{n-t} \left[ \sum_{i=0}^{n-1-\Delta t} (x_i \cdot y_{i+\Delta t}) \right], \quad (15)$$

де  $n$  – кількість значень змінних, які враховані при обчисленні кореляційних функцій;

$t$  – дискретний аргумент кореляційних функцій;

$i$  – номер значення змінної, яка використовується при обчисленні кореляційних функцій.

На рис. 14 наведено графіки взаємних кореляційних функцій, що побудовані з використанням програмного середовища Matchcad.

На основі рівняння (13) і фактичних значень кореляційних і взаємкореляційних функцій отримали передавальні функції по відповідних каналах:

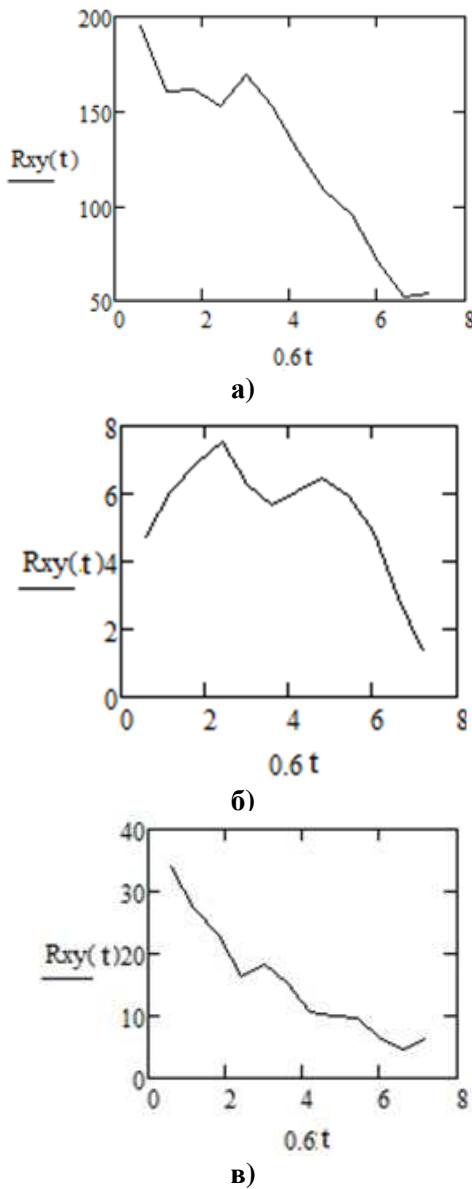


Рисунок 14 – Графіки взаємних кореляційних функцій по каналах  $P(t) - I(t)$  (а),  $P(t) - \varepsilon(t)$  (б),  $P(t) - V_m$  (в)

$$W_1(s) = \frac{I(s)}{P(s)} = \quad (16)$$

$$= \frac{(14,3s^2 + 1)(380,6s^3 + 137,3s^2 + 10,1s + 1)}{(18,2s^2 + 1)(257,3s^3 + 115,3s^2 + 12,2s + 1)}$$

$$W_2(s) = \frac{\varepsilon(s)}{P(s)} = \quad (17)$$

$$= \frac{(17,97s^2 + 3,7s + 1)(380,6s^3 + 137,3s^2 + 10,1s + 1)}{(142,1s^2 + 21,2s + 1)(257,3s^3 + 115,3s^2 + 12,2s + 1)}$$

$$W_3(s) = \frac{V(s)}{P(s)} = \quad (18)$$

$$= \frac{(77,8s^3 + 132,4s^2 + 0,076s + 1)(380,6s^3 + 137,3s^2 + 10,1s + 1)}{(636,1s^3 + 183,9s^2 + 21,6s + 1)(257,3s^3 + 115,3s^2 + 12,2s + 1)}$$

Отже, алгоритмічна структура об'єкта керування має такий вигляд (рис. 15).

Враховуючи отримані результати, змодельовано перехідні характеристики в програмному пакеті MatLab [9] за допомогою структурних схем, зображених на рис. 16,18,20.

Аналіз перехідних характеристик свідчить, що передавальні функції об'єкта керування по досліджуваних каналах можуть бути спрощені й описані типовими динамічними ланками не вище другого порядку.

### Висновок

На основі статистичного та кореляційно-спектрального аналізу параметрів буріння свердловин електробуром визначено передавальні функції процесу буріння. Моделювання перехідних характеристик в середовищі MatLab дає підстави стверджувати, що даний процес є стійким по всіх каналах. Запропонований підхід дозволяє одразу вирішувати дві задачі оптимального керування процесом буріння – ідентифікувати структуру і параметри об'єкта керування і визначати керувальні дії в реальному часі.

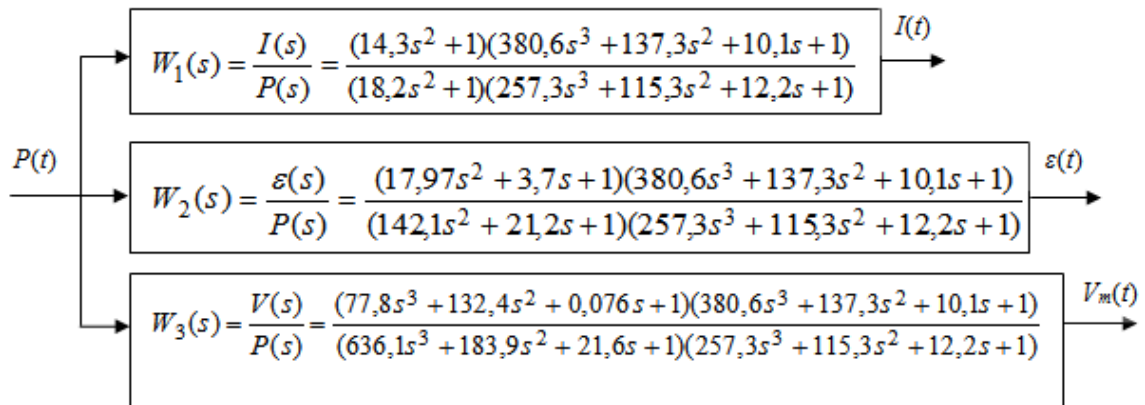


Рисунок 15 – Алгоритмічна структура процесу буріння нафтових і газових свердловин електробуром

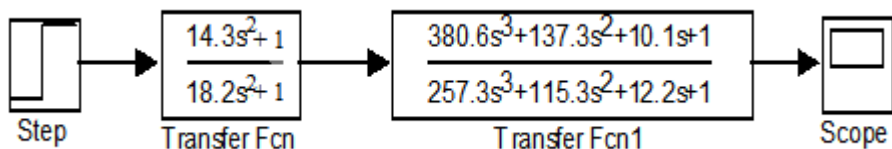


Рисунок 16 – Структурна схема передавальної функції  $W_1(p)$

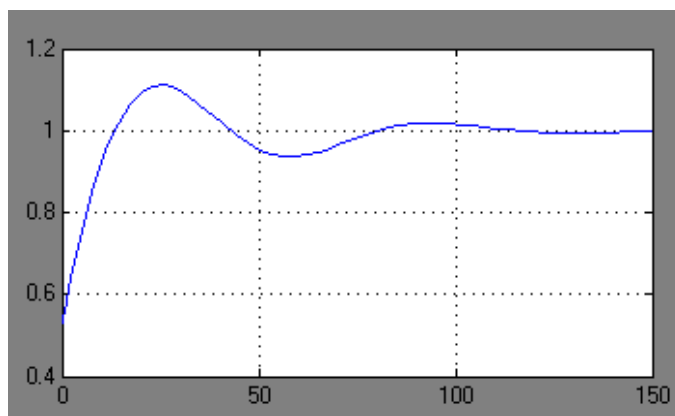


Рисунок 17 – Перехідна характеристика по каналу  $P(t) - I(t)$

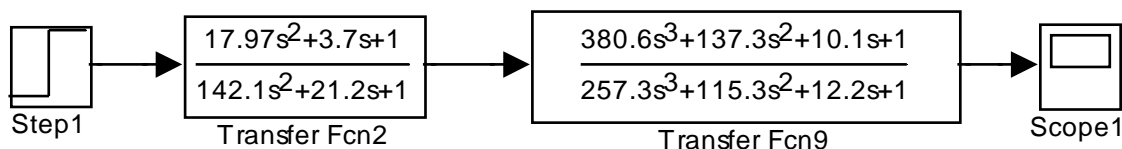


Рисунок 18 – Структурна схема передавальної функції  $W_2(p)$

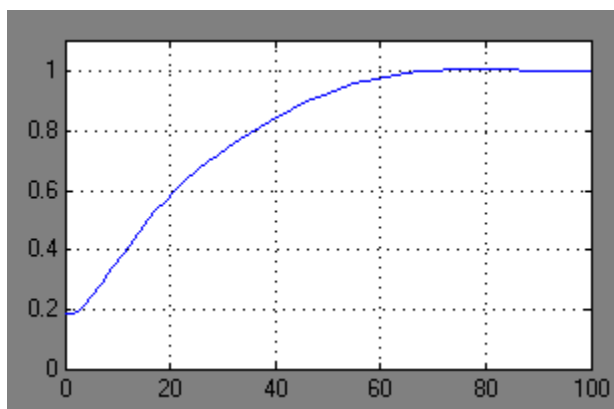


Рисунок 19 – Перехідна характеристика по каналу  $P(t) - \varepsilon(t)$

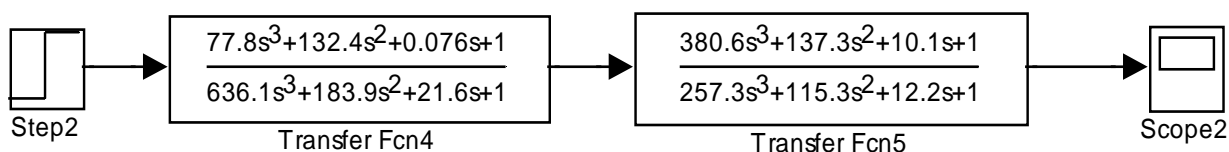
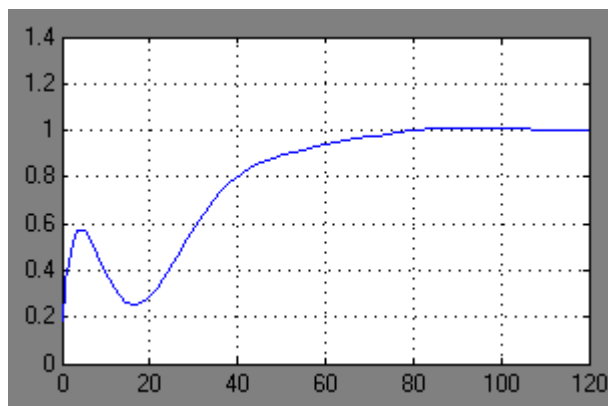


Рисунок 20 – Структурна схема передавальної функції  $W_3(p)$

Рисунок 21 – Перехідна характеристика по каналу  $P(t) - V_m(t)$ *Література*

1 Коцкулич Я.С. Проблеми і перспективи розвитку буріння на нафту і газ / Я.С.Коцкулич, Р.С.Яремійчук // Проблеми нафтогазового комплексу України 1993-2002. – Львів: УНГА, 2002. – С.52-58.

2 Фоменко Ф.М. Бурение скважин электробурами / Ф.М.Фоменко. – М.: Недра, 1974. – 272 с.

3 Балденко Ф.Д. Автоматизирование системы управления режимом бурения скважин забойными двигателями / Ф.Д. Балденко, А.П. Шмидт // Бурение и нефть. – 2003. – №4. – С.14-17.

4 Бунчак З. Електробур. Парадокси і реальність / З.Бунчак, О.Дудар, О.Кекот, О.Турянський // Електроінформ. – 2003, № 4. – С.8-11.

5 Инструкция по технологии бурения нефтяных и газовых скважин электробурами. – М.: Управление по развитию техники, технологии и организации бурения Миннефтепрома. – 1973. – 100 с.

6 ДТСУ 3258-95 (ГОСТ 15880-96). Електробури. Загальні технічні умови. – Чинний від 01.07.1997. – Київ: Держстандарт України. – 1997. – 25 с.

7 Гутак О.В. Аналіз зв'язків показників ефективності процесу буріння на засадах системного підходу / О.В. Гутак, Г.Н. Семенцов // Нафтогазова енергетика. – 2009. – № 2(11). – С.94-99.

8 Фадєєва О.В. Аналіз і удосконалення математичної моделі Галлі Вудса / О.В. Фадєєва // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 9. – С. 198-208.

9 Програмні продукти Matchcad 15, Matlab 7.9.0, Free Statistics. – Режим доступу: <http://en.freeststatistics.info/stat.php>

10 Семенцов Г.Н. Основи автоматизації виробничих процесів в бурінні: [навч.посібник] / [Г.Н.Семенцов, Я.Р.Когуч, М.М.Дранчук та ін.] – Івано-Франківськ: Факел. – 2004. – 269 с.

11 Фадєєва О.В. Удосконалення математичної моделі технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин / О.В. Фадєєва // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 6(123). – С. 55-60.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
15.05.13*

*Рекомендована до друку  
професором Костишиним В.С.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором Мещеряковим Л.І.  
(Дніпропетровський національний гірничий  
університет, м. Дніпропетровськ)*