

УДК 622.691.4:681.518.52

Семенцов Г.Н., д.т.н., професор; Фешанич Л.І., аспірант  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## АНАЛІЗ ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ, ОТРИМАНИХ В РЕЗУЛЬТАТІ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО ЗЛИТТЯ ДАНИХ

*У даній статті проведено аналіз законів розподілу випадкових процесів, отриманих внаслідок багатопараметричного злиття основних параметрів, що характеризують роботу відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату, та здійснено перевірку відповідності результату твердженням центральної граничної теореми (формулювання Ляпунова). Проаналізовано систему автоматичного керування газоперекачувального агрегату № 9, яка експлуатується на дотискувальній компресорній станції підземного сховища газу “Більче-Волиця”. Приведено приклад побудови гістограми відносних частот при злитті випадкових процесів та перевірено гіпотезу про нормальний закон розподілу відповідно до критерію Пірсона. Встановлено, що сумарний випадковий сигнал підпорядковується нормальному закону розподілу, що відповідає твердженню теореми Ляпунова.*

Помпаж, газоперекачувальний агрегат, нормальний закон розподілу, критерій Пірсона, теорема Ляпунова

### **Постановка проблеми.**

З позиції автоматизації процесів керування задачу злиття даних в системі автоматичного керування (САК) газоперекачувальним агрегатом (ГПА) з газотурбінним приводом слід розглядати як спосіб підвищення ефективності взаємозв'язку між об'єктом керування і автоматичними керуючими пристроями, що дозволяє поєднати переваги стохастичних властивостей окремих контрольованих параметрів з обчислювальними можливостями мікропроцесорної техніки, забезпечити підвищення швидкодії системи антипомпажного регулювання і захисту.

Відзначимо, що основною функцією злиття даних є використання контрольованих параметрів в інтеграційній моделі, у рамках якої можливо більш ефективно вирішити головні завдання системи автоматичного керування ГПА.

Найбільш поширеними методами злиття даних є метод Демпстера - Шафера, злиття ваг, фільтр Калмана, нечіткий інтеграл та метод Ойнера –Вейча – Карно [1]. Застосування одного із методів багатопараметричного злиття даних в САК ГПА може покращити продуктивність системи оцінювання неточних значень в декількох напрямках, таких як швидкодія, точність, надійність і робастність. Вирішення цієї проблеми залежить від наявності інформації про стохастичні властивості сигналів, що беруть участь у багатопараметричному злитті даних.

### **Аналіз досліджень і публікацій.**

Проблемам реалізації методів злиття даних присвячено чимало праць західних учених. Серед них слід відмітити I.Bloch [2], S.B.Cho, I.H Kim [3], R. Azouzi [4], E. Granger [5], R.I. Stranley, P.D. Garder, K.C. Ho [6], W.F. Wang [7], Hegarat-Masde [8] та ін. У вітчизняній науці представлено обмежене коло робіт, присвячених методам злиття даних. У цьому руслі працюють Куссульт Н.Н., Шелестов А.Ю., Скакун С.В. [9], Станкевич С.А., Білецький І.Г., Пономаренко С.О., Целіщев І.Ю. [10], Попов М.О., Рябоконтенко О.Д., Петрошенко О.Ю. [11] та ін.

Найбільш перспективним серед об'єктів керування нафтової і газової промисловості, що потребують вирішення проблеми злиття даних є процес компримування газу. Проте істотно бракує знань щодо реалізації методів злиття даних в системах автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами (ГПА) дотискувальних компресорних станцій (ДКС) підземних сховищ газу (ПСГ). Водночас проблемам застосування методів злиття даних у процесі керування ГПА приділяється недостатньо уваги.

### **Мета роботи.**

Метою даної роботи є визначення закону розподілу випадкового процесу, отриманого після багатопараметричного злиття даних, та перевірка відповідності результату твердженням теореми Ляпунова, щодо нормального розподілу.

**Виклад основного матеріалу досліджень.**

В Україні на ДКС ПСГ “Більче-Волиця” створена і експлуатується система автоматичного керування ГПА №9, яка дає змогу реалізовувати складні задачі автоматичного керування і захисту [12].

Структурна схема САК ГПА Ц-6,3 складається з первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) і виконавчих механізмів (на рис.1 не показано); пристрою керування (ПК); комп'ютерної мережі; пристрою оператора (ПО) – робочої станції [12].

САК ГПА виконує наступні функції:

- автоматичний пуск агрегату з ручним (за командою оператора) завантаженням в трасу і підтримку заданого режиму роботи:

- автоматичне розвантаження на холостий хід;
- підтримку агрегату в стані готовності до запуску з контролем умов готовності;
- автоматичний пуск агрегату;
- нормальну зупинку агрегату;
- аварійну зупинку агрегату із стравлюванням газу із контура нагнітача за командою оператора або у випадку спрацювання захисту;

- екстрену аварійну зупинку агрегату при відмові основних функціональних вузлів САК впливом на виконавчі механізми через фізичні канали.

Швидкодія каналів дискретного керування та захисту ГПА – не більше 100 мс, а каналів керування та захисту ГПА стосовно температурних параметрів – не більше 3 с.

Вхідні та вихідні сигнали електричних трактів (ЕТ) наступні:

Кількість вхідних сигналів: постійного струму 4-20 мА – 30; імпульсних з частотою 0-10 кГц – 4; від термопар – 4; від термометрів опору – 24; дискретних – 144.

Всі вхідні аналогові і дискретні канали гальванічно розв'язані від внутрішньої шини та між собою. Всі аналогові канали і ПВП нагнітача іскробезпечного виконання.

Кількість вихідних сигналів: постійного струму 4-20 мА – 2; дискретних – 64.

Максимальний струм навантаження, який комутують виконавчі органи САК при кожному вихідному сигналі керування не перевищує:

- 2,0 А за напругою 220 В, 50 Гц змінного струму;
- 5,0 А за напругою 24 В постійного струму;
- 1,0 А за напругою 220 В постійного струму.

САК ГПА – засіб автоматичного керування, що містить вимірювальні канали, до складу яких входять відповідні електричні тракти (ЕТ) і ПВП.

Вимірювальні канали (ВК) САК ГПА Ц-6,3 мають структуру двох видів:

- давач (ПВП) – лінія зв'язку – модуль зв'язку з об'єктом і процесор в складі комплексу;
- давач (ПВП) – нормуючий перетворювач – лінія зв'язку – модуль зв'язку з об'єктом і процесор в складі комплексу.

Ця сукупність засобів вимірювання і ліній зв'язку, розподілених у просторі, складає неперервний вимірювальний ланцюг від давача до термінального пристрою.

Система захисту компресора від помпажу включає вимірювання параметрів, які характеризують робочий режим компресора [13]. Відповідними давачами вимірюють перепад тиску на звужуючому пристрої перед нагнітачем ( $dP_{konph}$ ), швидкість обертання силової турбіни ( $N_{ст}$ ), горизонтальну вібрацію передньої опори нагнітача ( $Gg_{PON}$ ), вертикальну вібрацію передньої опори нагнітача ( $Gv_{PON}$ ), горизонтальну вібрацію задньої опори нагнітача ( $Gg_{ZON}$ ), вертикальну вібрацію задньої опори нагнітача ( $Gv_{ZON}$ ), ступінь підвищення тиску газу ( $E$ ).

Нами розглядаються синхронні реалізації кінцевої довжини для досліджуваних параметрів, тривалість яких 200 секунд.

За результатами експериментальних досліджень статистичних характеристик випадкових процесів у САК ГПА визначили, що перепад тиску на конфузори, швидкість обертання силової турбіни, горизонтальна вібрація передньої опори нагнітача, вертикальна вібрація передньої опори нагнітача, горизонтальна вібрація задньої опори нагнітача, вертикальна вібрація задньої опори нагнітача підпорядковуються логнормальному закону розподілу, а ступінь підвищення тиску - закону розподілу Вейбулла [14].

Внаслідок, злиття цих параметрів отримуємо новий масив даних, для якого будемо гістограму відносних частот та перевіримо відповідність нормальному закону розподілу, використовуючи критерій Пірсона, за допомогою програмного пакету MathCAD.

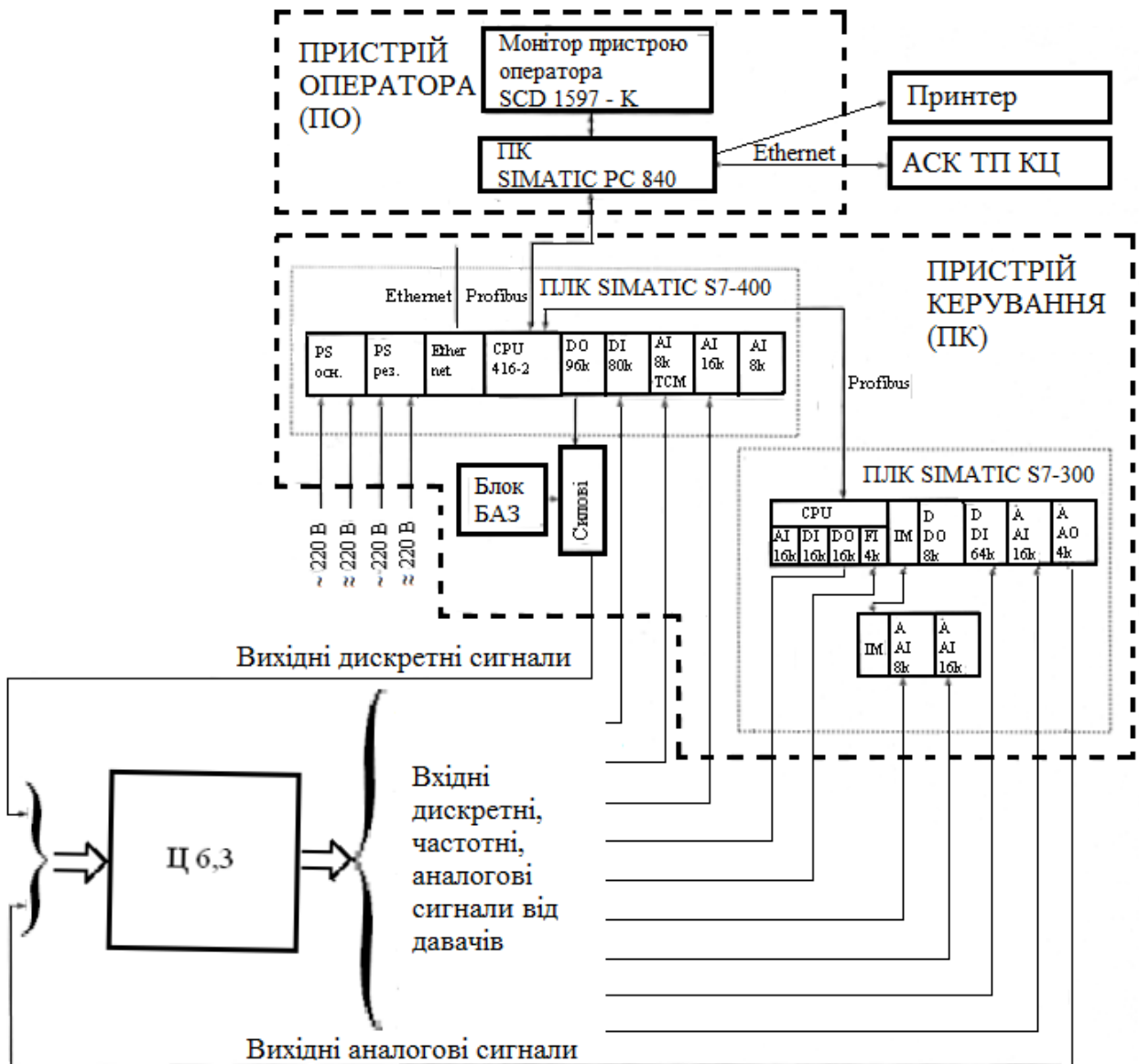


Рис. 1. Схема комплексу технічних засобів САК ГПА Ц-6,3

Обчислюємо розмах вибірки:

$$\begin{aligned}
 x_{\max} &:= \max(X) & x_{\min} &:= \min(X) & R &:= x_{\max} - x_{\min} \\
 x_{\max} &= 5.189 \times 10^3 & x_{\min} &= 5.175 \times 10^3 & R &= 13.921 \\
 X &:= \text{sort}(X)
 \end{aligned}$$

Параметри інтервалу групування даних:

$$\begin{aligned}
 \text{ceil}(1 + 3.322 \cdot \log(n)) &= 10 & m &= 10 \\
 \Delta x &:= \frac{\text{ceil}(x_{\max}) - \text{floor}(x_{\min})}{m} & \Delta &= 1.5 \\
 i &:= 0 \dots m & a_i &:= \text{floor}(x_{\min}) + \Delta \cdot (i - 1) & b_i &:= a_i + \Delta & x_i &:= \frac{a_i + b_i}{2} \\
 j &:= 0 \dots m + 1 & \min(a) &= 5.173 \times 10^3 & \max(b) &= 5.19 \times 10^3
 \end{aligned}$$

Визначимо вектор відносних частот:

$$f := \frac{\text{hist}(x1, X)}{n + \Delta}$$

	0
0	$5.173 \cdot 10^3$
1	$5.175 \cdot 10^3$
2	$5.176 \cdot 10^3$
3	$5.178 \cdot 10^3$
4	$5.18 \cdot 10^3$
5	$5.181 \cdot 10^3$
6	$5.183 \cdot 10^3$
7	$5.184 \cdot 10^3$
8	$5.186 \cdot 10^3$
9	$5.187 \cdot 10^3$
10	$5.189 \cdot 10^3$
11	$5.19 \cdot 10^3$

	0
0	$5.174 \cdot 10^3$
1	$5.176 \cdot 10^3$
2	$5.177 \cdot 10^3$
3	$5.179 \cdot 10^3$
4	$5.18 \cdot 10^3$
5	$5.182 \cdot 10^3$
6	$5.183 \cdot 10^3$
7	$5.185 \cdot 10^3$
8	$5.186 \cdot 10^3$
9	$5.188 \cdot 10^3$
10	$5.189 \cdot 10^3$

	0
0	0
1	$8.333 \cdot 10^{-3}$
2	0.027
3	0.06
4	0.092
5	0.178
6	0.168
7	0.085
8	0.038
9	$5 \cdot 10^{-3}$
10	$5 \cdot 10^{-3}$

$$\text{mean}(X) = 5.184 \cdot 10^3 \quad \text{stdev}(X) = 2.375$$

$$m := \text{mean}(X) \quad \sigma := \text{stdev}(X)$$

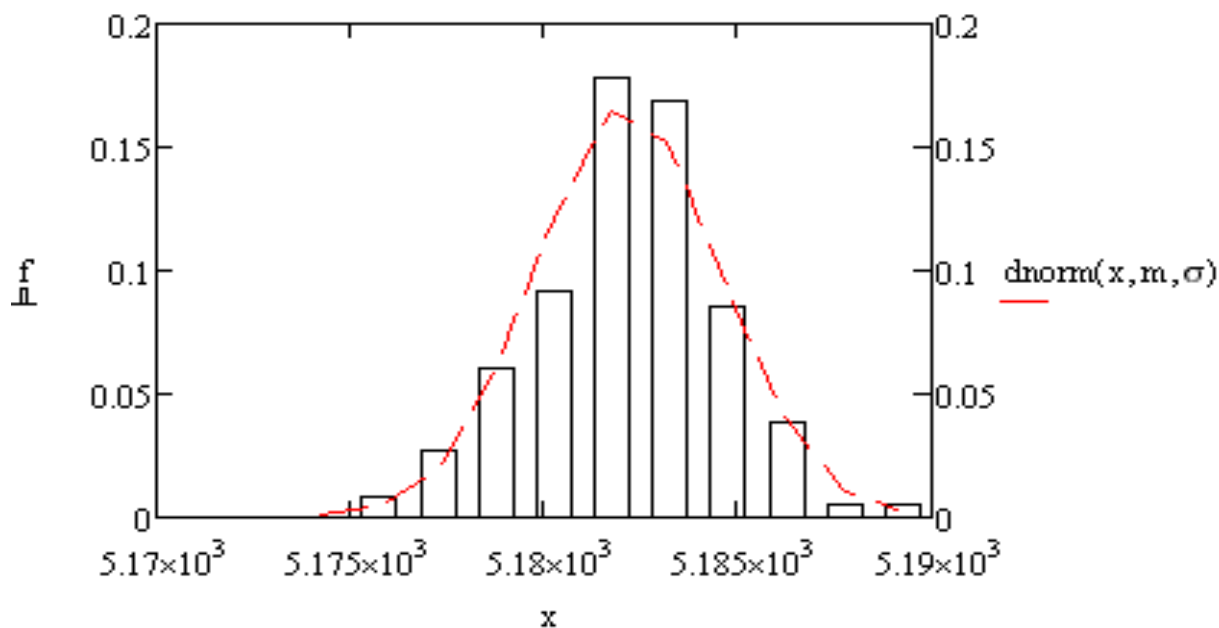


Рис. 2. Гістограма відносних частот при злитті випадкових процесів

За отриманим рис. 2 можна припустити, що даний розподіл підпорядковується нормальному закону розподілу. Для підтвердження даної гіпотези скористаємось критерієм Пірсона.

Перевіряємо нормальний закон розподілу вибірки ( $X$ ) з використанням коефіцієнтів асиметрії та ексцеса:

$$A := \text{skew}(X); \quad E := \text{kurt}(X);$$

$$A = -0.177; \quad E = 0.251.$$

$$DA := \frac{6 \cdot (n-2)}{(n+1) \cdot (n+3)}; \quad DE := \frac{24 \cdot n \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{(n+1)^2 \cdot (n+3) \cdot (n+5)};$$

$$3 \cdot \sqrt{DA} = 0.365; \quad 5 \cdot \sqrt{DE} = 0.251.$$

Оскільки коефіцієнти асиметрії та ексцесу задовольняють нерівності:

$$|A| \leq 3 \cdot \sqrt{DA}; \quad |E| \leq 5 \cdot \sqrt{DE}.$$

гіпотеза про нормальний розподіл елементів вибірки підтверджується.

Перевіряємо нормальний закон розподілу вибірки (X) з використанням критерію узгодженості Пірсона. Обчислюємо середнє арифметичне, дисперсію та стандартне відхилення:

$$Mx := \text{mean}(X); \quad s1 = \text{stdev}(X); \quad s2 := \text{var}(X);$$

$$Mx = 5.182 \times 10^3; \quad s1 = 2.375; \quad s2 = 5.64.$$

Область зміни випадкової величини (X) розділяємо на 10 інтервалів, вираховуємо кількість елементів вибірки, що потрапили в кожен з інтервалів, теоретичну імовірність потрапляння і дані інтервали за умови нормального розподілу:

$$m := 10 \quad \Delta x := \frac{\text{ceil}(x \text{ max}) - \text{floor}(x \text{ min})}{m}$$

$$j := 1 \dots m + 1 \quad x_j := \text{floor}(x \text{ min}) + \Delta x \cdot (j - 1) \quad x_1 := -\infty \quad \Delta x = 1.5$$

$$k := 1 \dots m \quad v := \text{hist}(x, X) \quad p_k := \text{pnorm}(x_{k+1}, Mx, s1) - \text{pnorm}(x_k, Mx, s1) \quad x_{m+1} := \infty$$

Для контролю обчислюємо суми:

$$\sum_{i=1}^m p_i = 1 \quad \sum_{i=1}^m v_i = 1 \quad pn := p \cdot n$$

	0		0		0		0
0	0	0	0	0	0	0	0
1	5.175·10 <sup>3</sup>	5	7.32·10 <sup>-3</sup>	2.928			
2	5.176·10 <sup>3</sup>	16	0.031	12.568			
3	5.178·10 <sup>3</sup>	36	0.092	36.639			
4	5.18·10 <sup>3</sup>	55	0.181	72.581			
5	5.181·10 <sup>3</sup>	107	0.244	97.74			
6	5.183·10 <sup>3</sup>	101	0.224	89.484			
7	5.184·10 <sup>3</sup>	51	0.139	55.696			
8	5.186·10 <sup>3</sup>	23	0.059	23.562			
9	5.187·10 <sup>3</sup>	3	0.017	6.772			
10	5.189·10 <sup>3</sup>	3	3.304·10 <sup>-3</sup>	1.322			
11	5.19·10 <sup>3</sup>						

Обчислюємо суми:

$$\chi^2 := \sum_{i=1}^m \frac{(v_i - pn_i)^2}{pn_i} \quad \chi^2 = 13.675$$

Критичне значення критерію  $\chi^2$ :

$$\alpha := 0.05$$

$$CR := \text{qchisq}(1 - \alpha, m - 3) \quad CR = 14.067$$

Так як розраховане по вибірці значення  $\chi^2$  менше критичного значення CR, то відповідно до критерію Пірсона гіпотеза про нормальний розподіл приймається.

Згідно центральної граничної теореми (формулювання Ляпунова), випадкова величина, що отримана додаванням великої кількості випадкових величин, має розподіл близький до нормального. В результаті злиття даних отриманий масив підпорядковується нормальному закону розподілу, що відповідає твердженню теореми Ляпунова.

Обчислимо розрахункові значення критерію Пірсона для масивів, утворених при додаванні параметрів, та порівняємо їх з критичним значенням (таблиця 1).

Таблиця 1

Таблиця критичного та розрахованих значень критерію “ $\chi$ -квадрат”

№	Позначення параметру	Критичне значення критерію $\chi$ -квадрат	Розраховане значення критерію “ $\chi$ -квадрат” по вибірці					
1	dP_konph	14,067	17,953	5,503	12,077	10,198	11,757	13,675
2	N_ст							
3	Gv_PON							
4	Gg_PON							
5	Kромпаг							
6	Gg_ZON							
7	E							

Відповідно до критерію узгодженості Пірсона, з таблиці 1 видно, що при злитті двох параметрів, перепаду тиску на конфузори та частоти обертання силової турбіни, розраховане значення критерію “ $\chi$ -квадрат” більше за критичне значення, що спростовує гіпотезу про нормальний розподіл. При злитті трьох і більше параметрів розраховане значення критерію є меншим критичного, що свідчить про нормальний розподіл.

**Висновки.**

В результаті злиття основних параметрів, що характеризують роботу відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу “Більче-Волиця”, таких як перепад тиску на конфузори, швидкість обертання силової турбіни, горизонтальна вібрація передньої опори нагнітача, вертикальна вібрація передньої опори нагнітача, горизонтальна вібрація задньої опори нагнітача, вертикальна вібрація задньої опори нагнітача, ступінь підвищення тиску, отримано сумарний випадковий сигнал, який підпорядковується нормальному закону розподілу, що відповідає твердженню теореми Ляпунова.

1. Давиденко Л.І. Методи злиття даних для виявлення явища помпажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів / Л.І. Давиденко, Г.Н., Семенов // Науковий вісник ІФНТУНГ., 2013, №2 (35), с.174-180.

2. Bloch I. Information combination operators for data fusion: a comparative review with classification / I. Bloch // IEEE transactions on systems, man, and cybernetic. – Part A : systems and humans, 1996, 26. – P. 52-67.

3. Cho S.B. Multiple network fusion using fuzzy - logic / /S. B. Cho, I. H. Kim /,IEEE Transactions on Neural Networks, №6(2), 1995, p. 497-501

4. Azouzi R. On-line prediction of surface finish and dimension deviation in turning using neural network based sensor fusion./ R. Azouzi, M. Guillot // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, №.37, p. 1201-1217.

5. Granger E. A what-and-where fusion neural network for recognition and tracking of multiple radar emitters. / E. Granger, M.A. Rubin, S. Grossberg, P. Lavoie // Neural Networks, №14 (3) (2001), p. 325–344.

6. Stanley R.J. Feature and decision level sensor fusion of electromagnetic induction and ground penetrating radar sensors for landmine detection with hand-held units. / R.J. Stanley, P. Gader, D. Ho // Information Fusion, 2002, №3(3), p.215-223.

7. Wang W.F. PET-MRI image registration and fusion using artificial neural networks / W.F. Wang // *Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications*, 2003, №15, p. 111-118.
8. Hegart – Mascle S.L. Multi-scale data fusion using Dempster–Shafer evidence theory. / Le Hegart-Masclé, D. Richard, C. Otlet // *Integrated Computer Aided Engineering*, №10, 2003, p. 9-22.
9. Шелестов А.Ю. Информационная система агромониторинга на основе геопространственных данных / А.Ю. Шелестов, Кравченко А.Н., Скакун С.В., Куссуль Н.Н. // *Кибернетика и системный анализ*. – 2013. – № 1. – С. 145-153.
10. Станкевич С. А. Оцінювання інтерпретаційних властивостей багатоспектральних зображень при плануванні аерокосмічного знімання [Електронний ресурс] / С. А. Станкевич, М. І. Герда, І. Г. Білецький, С. О. Пономаренко, І. Ю. Целіщев // *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. – 2012. – Вип. 8(15). – С. 110-118. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Znpndndia\\_2012\\_8\(15\)\\_19.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Znpndndia_2012_8(15)_19.pdf)
11. Попов М.О. Підхід до класифікації стану лісових ресурсів по багато спектральних космічних зображеннях на основі принципу злиття даних та використання елементів ГІС-технології [Електронний ресурс] / М.О.Попов, О.Д. Рябоконеко, О.Ю. Петроченко // Режим доступу: [http://www.ulrnc.org.ua/publication/envmanag/Classification%20of%20the%20state%20of%20forest\\_ukr.pdf](http://www.ulrnc.org.ua/publication/envmanag/Classification%20of%20the%20state%20of%20forest_ukr.pdf)
12. Бляут Ю.Є. Система автоматичного керування агрегатом Ц-6.3 та метрологічне забезпечення її вимірювальних каналів / Бляут Ю.Є. // *Нафтогазова енергетика*, № 1(12). – 2010. – С. 46 – 49.
13. Патент 89302 Україна. Спосіб захисту компресора від помпажу [Текст] / Беккер М. В., Шимко Р. Я., Семенцов Г. Н., Бляут Ю. Є., Гіренко С. Г., Петеш М. О., Сукач О. В., Репета А. Ф. – №а200807810; заяв. 09.06.2008; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1. – 6 с.
14. Давиденко Л.І. Експериментальна оцінка законів розподілу випадкових процесів у системі автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу / Л.І. Давиденко // *Нафтогазова енергетика ІФНТУНГ.*, 2014. – №1(21). – С. 64-69.