

УДК 629.083

В.В. Аулін, д.т.н.

А.В.Гриньків

Замота Т.М., к.т.н.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ ЧУТЛИВОСТІ

Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград, Aulin52@mail.ru

На основі методів теорії чутливості розглянуто адаптивну стратегію технічної експлуатації. Наведено сутність методу теорії чутливості для функції стану транспортних засобів. Показано можливість оцінки інформації про технічний стан систем та отримання регресійних рівнянь відмов агрегатів транспортних засобів в залежності від їх пробігу, а також відповідних рівнянь чутливості. Розроблено рекомендації по підтриманню експлуатаційної надійності транспортних засобів адаптивними технічними діями.

Ключові слова: транспортний засіб, технічне обслуговування, теорія чутливості, передаточна функція, ресурс, пробіг, адаптивна стратегія.

Вступ

Серед сукупності методів та заходів забезпечення експлуатаційної надійності транспортних засобів (ТЗ) в сучасних умовах на увагу заслуговують моніторинг та керування технічним станом їх агрегатів та більшості процесів, що протікають в них, електричними датчиками, блоками та системами автоматичного керування, що дає також можливість підтримувати належний рівень використання ресурсу та продуктивності виконання поставлених цілей на стадіях життєвого циклу. Зазначене реалізується вчасним проведенням технічного обслуговування (ТО), згідно вибраної стратегії технічного обслуговування і ремонту (ТОіР).

Наявність в конструкції автомобілів електричних та електронних систем керування агрегатами дало поштовх до підвищення не тільки продуктивності та економічності використання ТЗ, а також створило підґрунтя для переходу із планово-запобіжної стратегії (ПЗС) до адаптивної стратегії (АС) ТОіР. Остання ґрунтується на постійному моніторингу технічного стану агрегатів і ТЗ в цілому, а джерелом ідентифікації є діагностична інформація, на базі якої проводиться оцінка значення залишкового ресурсу та розробляється система технічних дій. Отримана діагностична інформація підлягає подальшій обробці з використанням математичних методів теорії графів, теорії систем, теорії чутливості (сенситиву), теорії ймовірності, статистики та ін.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз існуючих підходів до підвищення та забезпечення експлуатаційної надійності ТЗ виявив, що для використання їх повного ресурсу ТЗ потрібно розробити такі технічні дії, які будуть налаштовуватися до умов експлуатації та режимів роботи агрегатів і ТЗ в цілому [1,2].

Узагальнення інформації з технічної діагностики автомобілів наведено в роботі Біліченка В.В [3]. Розробка нового підходу до експлуатації і ТО та її використанням до важких умов сільськогосподарського виробництва відображено в працях Кокорева Г.Д [4]. Автор також зосереджує увагу на необхідності визначення оптимального періоду контролю технічного стану автомобілів, але не було підібрано математичний апарат і не обґрунтовано визначення сукупності критеріїв значимості діагностичних параметрів.

При дослідженні технічного стану ТЗ, в залежності від умов їх використання, особливо впливу умов на значення діагностичних параметрів та їх реагування під час істотної зміни умов та режимів експлуатації на увагу заслуговує використання теорії чутливості та еластичності функцій [5].

Кузьменко А.Г. за допомогою теорії чутливості функцій вирішував проблему розрахунку динамічної системи та визначав похибку відображення функції трибологічних систем [5]. Реалізація теорії чутливості відображена і в роботах Захаріна Ф.М. і Юсупова Р.М. [6,7]. Автори проводили теоретичні дослідження міри чутливості функцій для визначення параметрів налаштування автоматичних систем. Але використання даної теорії для експлуатації технічних систем автори не застосовували.

Постановка завдання

Для адаптивної стратегії ТОiP, насамперед, необхідно вибрати інформацію, яка найбільш точно відображає технічний стан ТЗ та яку можна використати для корегування ТО під час експлуатації. Вибір інформативно важливих параметрів різних систем та агрегатів необхідний для спрощення і створення прогресивних алгоритмів діагностування та вдосконалення систем самодіагностики шляхом зменшення і уточнення кількості точок діагностики та місць встановлення датчиків. Для обробки отриманої бази даних діагностики технічного стану агрегатів і ТЗ в цілому важко підібрати найбільш ефективний математичний апарат, який би задовольняв основні умови вибору необхідної інформації: чутливість, однозначність, інформативність, універсальність. Метою даної роботи є теоретичне обґрунтування математичного методу обробки статистичної інформації про технічний стан і експлуатаційну надійність агрегатів ТЗ та виявлення умов переходу з планово-запобіжної стратегії ТОiP на адаптивну.

Виклад основного матеріалу

Теоретичне обґрунтування використання математичного методу обробки статистичної інформації про технічний стан ТЗ

Експлуатацію ТЗ з теоретичної точки зору уявімо як математичну модель причинно-наслідкових зв'язків між сукупність факторів, які відображають причину, та цільовою функцією, яка характеризує наслідок. При цьому велика кількість елементів агрегатів ТЗ взаємодіють як між собою, так із зовнішнім середовищем. Інформацію про процеси, які протікають в них під час експлуатації ТЗ та технічний стан отримують різними фізичними методами, а при її обробці можна використати методи узагальненої теорії графів та теорії чутливості цільової функції, що описують технічний стан агрегатів і ТЗ в цілому.

При зміні цільових функцій технічного стану та їх чутливості від зміні істотних факторів спостерігаються наступні ситуації:

- малі зміни факторів приводять до малих змін цільових функцій, що свідчить про стійку поведінку цільової функції або стійкий стан системи причинно-наслідкових зв'язків;
- малі зміни факторів приводять до різкої зміни цільової функції, що свідчить про нестійку поведінку цільової функції і нерівноважний стан досліджуваної системи.

Решта ситуацій характеру зміни цільових функцій при зміні факторів знаходиться в межах вище зазначених ситуацій і потребують ретельних досліджень. В даній роботі увага зосереджена на той факт, що крім загального характеру протікання залежності цільових функцій технічного стану агрегатів і ТЗ в цілому є закономірність їх приросту від приросту сукупності факторів або закономірності зміни чутливості цільових функцій.

Запропонована міра чутливості є настільки важливою, що для її дослідження та визначення будуватиметься необхідний математичний апарат, що базується на властивостях чутливості функції стану. Розрізняють абсолютну та відносну чутливість функції стану технічних об'єктів.

Найбільш поширеною мірою абсолютної чутливості функцій стану до зміни факторів є їх кінцевий приріст або диференціал. Для функції стану $S(D)$ одного фактору (діагностичного параметру) D , маємо:

$$dS(D) = \frac{dS(D)}{dD} dD. \quad (1)$$

Абсолютна чутливість функції стану, як правило, є розмірною величиною, тобто похідна від функції стану є розмірною мірою по діагностичним параметрам її чутливості:

$$\frac{dS(D)}{dD} = S'(D). \quad (2)$$

Якщо функція стану залежить від вектора діагностичних параметрів $D=(D_1, D_2, \dots, D_n)$, то розрізняють цілу систему часткових абсолютних чутливостей функції стану:

$$\frac{\partial S(D_1, D_2, \dots, D_n)}{\partial D_1} = S'_{D_1}(D_1, D_2, \dots, D_n); \quad \frac{\partial S(D_1, D_2, \dots, D_n)}{\partial D_2} = S'_{D_2}(D_1, D_2, \dots, D_n); \dots; \quad \frac{\partial S(D_1, D_2, \dots, D_n)}{\partial D_n} = S'_{D_n}(D_1, D_2, \dots, D_n). \quad (3)$$

Відносна безрозмірна чутливість цільової функції стану $S^s(D)$ або її сенситив дорівнює:

$$\text{sen}(S(D)) = S^s(D) = \frac{dS(D)}{S(D)} \cdot \frac{dD}{D}, \quad (4)$$

де $dS(D)/S(D)$ – відносний приріст цільової функції, dD/D – відносний приріст діагностичного параметру.

Можна бачити, що сенситив (відносна чутливість) функції стану є безрозмірною величиною. Виходячи з формули (4), сенситив функції технічного стану можна записати в наступному вигляді:

$$\text{Sen}S(D) = \frac{dS(D)}{dD} \cdot \frac{D}{S(D)} = S'(D) \cdot \frac{D}{S(D)}. \quad (5)$$

Рівняння (5) визначає взаємозв'язок відносної чутливості функції однієї змінної та абсолютної чутливості функції технічного стану.

У разі залежності функції стану від вектора діагностичних параметрів, їхні часткові сенситиви дорівнюють:

$$\begin{aligned} \text{Sen}S_{D_1}(D_i) &= S'_{D_1}(D_i) \cdot \frac{D_1}{S_{D_1}(D_i)}; \text{Sen}S_{D_2}(D_i) = S'_{D_2}(D_i) \cdot \frac{D_2}{S_{D_2}(D_i)}; \dots; \\ \text{Sen}S_{D_n}(D_i) &= S'_{D_n}(D_i) \cdot \frac{D_i}{S_{D_n}(D_i)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Використовуючи правило диференціювання логарифмічної функції, маємо:

$$\text{sen}S(D) = S^s(D) = \frac{d(\ln S(D))}{d \ln D} = \frac{(\ln S(D))' S(D)}{(\ln D)' D}. \quad (7)$$

Таким чином, чутливість і частинна чутливість можуть бути визначені як відношення похідної (частинної похідної) від логарифму функції стану до похідної логарифму діагностичного і частинних діагностичних параметрів. Такий термін застосовується в теорії автоматичного регулювання (АР), але, як правило, при цьому розглядаються не функції стану технічного об'єкту, а диференціальне рівняння процесу його зміни.

На практиці в основному використовують абсолютні і відносні чутливості (сенситиви) першого і другого порядків:

$$S^{ss}(D) = S^s(S^s(D)) = \frac{dS^s(D)}{dD} \cdot \frac{D}{S^s(D)}. \quad (8)$$

Абсолютна чутливість першого порядку від функції стану – це швидкість зміни приросту функції стану від зміни значень діагностичних параметрів, а абсолютна чутливість другого порядку від функції стану – це швидкість швидкості зміни функції стану або прискорення зміни приросту функції зі зміною приросту діагностичного параметру. Абсолютну чутливість другого і більш високих порядків можна використовувати для аналізу сходження розрахункових алгоритмів. Сенситив відносної чутливості першого і другого порядку функції стану від діагностичних параметрів є безрозмірним, а отже зручним при аналізі бази даних, особливо при використанні інформаційних технологій і методів обробки на ПК.

Визначення чутливості узагальнюється на випадок довільного числа суми або різниці функцій зміни діагностичних параметрів, що складають функцію стану системи та агрегатів ТЗ:

$$S(D) = U_1(D) + U_2(D) + U_3(D) + U_4(D) + U_5(D) + \dots = \sum_{i=1}^n U_i(D), \quad (9)$$

де $U_i(D)$ – функція зміни діагностичних параметрів, $i = \overline{1, N}$ – номер відповідного агрегату.

Відносна чутливість (сенситив) вище зазначеної функції буде мати вигляд:

$$S^s(D) = S^s(U_1(D)) \frac{U_1(D)}{\sum U_i(D)} + S^s(U_2(D)) \frac{U_2(D)}{\sum U_i(D)} + S^s(U_3(D)) \frac{U_3(D)}{\sum U_i(D)} + S^s(U_4(D)) \frac{U_4(D)}{\sum U_i(D)} + \dots + S^s(U_5(D)) \frac{U_5(D)}{\sum U_i(D)} + \dots \quad (10)$$

де $S^s(D)$ – загальний сенситив (відносна чутливість) функції стану від діагностичних параметрів D ; $S^s(U_i)$ – часткові сенситиви (часткові відносні чутливості); $U_i(D)$, $i = 1, N$ – функції зміни відповідного діагностичного параметру для різних агрегатів ТЗ.

Подібно до похідних існують таблиці сенситивів елементарних цільових функцій, виявлено сукупність властивостей [5] серед яких на увагу заслуговують наступні :

- сенситив будь-якої функції є безрозмірною величиною;
- постійний множник перед цільовою функцією не впливає на її сенситив;
- сенситив степеневі цільової функції не залежить від факторів і є постійною величиною, яка дорівнює показнику степеня та ін.

Використання теорії сенситивів для виявлення умов адаптивного технічного обслуговування ТЗ

Спостереження за технічним станом ТЗ підчас його експлуатації на протязі кожних 10 тис.км. пробігу автомобілів КамАЗ – 4310 дали можливість сформувати статистичну базу даних відмов, в якій m , p – кількість відмов системи, на протязі певного інтервалу пробігу ТЗ та їх загальна кількість; $P(L)$ - розрахована ймовірності відмов для відповідного пробігу ТЗ (табл. 1).

Таблиця 1

Кількість відмов систем та агрегатів ТЗ за пробігом та їх ймовірність

Системи та агрегати		Інтервали, тис.км						
		0...10	10...20	20...30	30...40	40...50	50...60	60...70
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Паливна	m	2	4	6	7	6	6	7
	P(L)	0.0149	0.0299	0.0448	0.0522	0.0448	0.0448	0.0522
Циліндро-поршнева група	m	0	0	0	1	1	1	1
	P(L)	0	0	0	0.0075	0.0075	0.0075	0.0075
Коробка переключення передач	m	0	0	1	1	1	1	1
	P(L)	0	0	0.0075	0.0075	0.0075	0.0075	0.0075
Шини	m	4	6	5	7	6	7	8
	P(L)	0.0299	0.0448	0.0373	0.0522	0.0448	0.0522	0.0597
Гальмівна	m	5	4	6	7	7	8	7
	P(L)	0.0373	0.0299	0.0448	0.0522	0.0522	0.0597	0.0522
Всього	m	11	14	18	23	21	23	24
	P(L)	0.0821	0.1045	0.1343	0.1716	0.1567	0.1716	0.1791

За отриманою базою даних в пакеті прикладних програм на ПК будуємо криві залежності ймовірності відмови систем та агрегатів від пробігу автомобіля ТЗ (рис. 1).

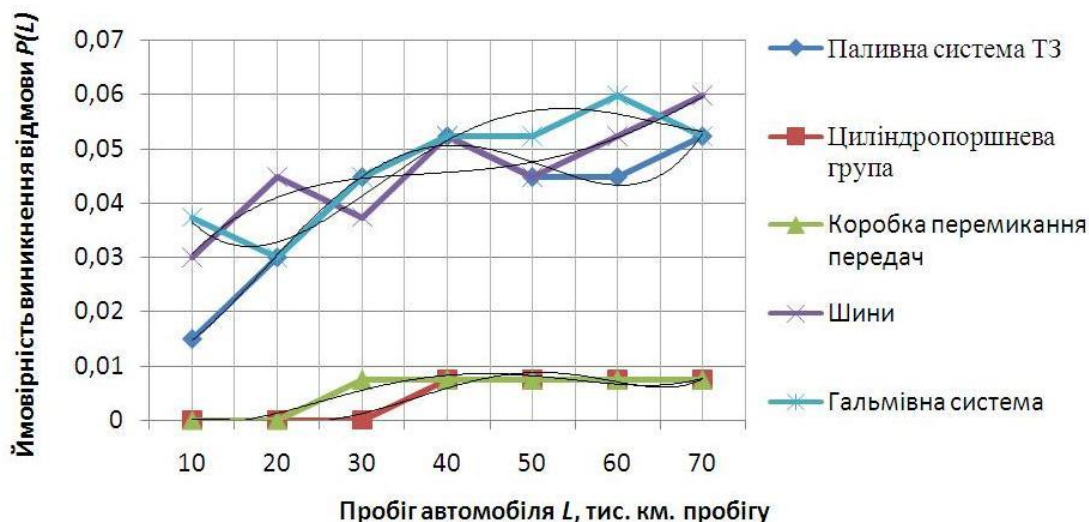


Рис. 1 – Залежність статистичної ймовірності відмов систем та агрегатів ТЗ від пробігу автомобіля

Для систем та агрегатів автомобіля також отримано відповідні рівняння регресії, як математичні моделі з коефіцієнтом достовірності апроксимації R^2 :

- паливна система:

$$P(L) = -0.000009L^5 + 0.002L^4 - 0.018L^3 + 0.064L^2 - 0.081L + 0.048, R^2 = 0.993; \quad (9)$$

- циліндро-поршнева група:

$$P(L) = 0.003L - 0.004, R^2 = 0.777; \quad (10)$$

- коробка перемикання передач:

$$P(L) = 0.001L^3 + 0.009L^2 - 0.015L + 0.007, R^2 = 0.906; \quad (23)$$

- шини:

$$P(L) = -0.00006L^4 + 0.001L^3 - 0.01L^2 + 0.031L + 0.007, R^2 = 0.805; \quad (24)$$

- гальмівна система:

$$P(L) = 0.0001L^4 - 0.003L^3 + 0.02L^2 - 0.052L + 0.068, R^2 = 0.913. \quad (25)$$

Отримані рівняння були використані як цільові функції для знаходження функцій сенситивів від пробігу автомобіля. Для цього використали формули (5), (10) і було отримано відповідні рівняння сенситивів для систем та агрегатів від пробігу автомобіля:

- паливна система:

$$\begin{aligned} senP(L) = & ((-0.0000045 L^4) / (-0.000009 L^5 + 0.002 L^4 - 0.018 L^3 + 0.064 L^2 - 0.081 L + 0.048)) + ((0.008 L^3) / \\ & / (-0.000009 L^5 + 0.002 L^4 - 0.018 L^3 + 0.064 L^2 - 0.081 L + 0.048)) - ((0.054 L^2) / (-0.000009 L^5 + 0.002 L^4 - \\ & - 0.018 L^3 + 0.064 L^2 - 0.081 L + 0.048)) + ((0.128 L) / (-0.000009 L^5 + 0.002 L^4 - 0.018 L^3 + 0.064 L^2 - \\ & - 0.081 L + 0.048)) - ((0.081) / (-0.000009 L^5 + 0.002 L^4 - 0.018 L^3 + 0.064 L^2 - 0.081 L + 0.048)); \end{aligned}$$

циліндро-поршнева група:

$$senP(L) = 0.003;$$

- коробка перемикання передач:

$$senP(L) = ((0,003L^2)/(0,001L^3 + 0,009L^2 - 0,015L + 0,007)) + ((0,0018L)/(0,001L^3 + 0,009L^2 - 0,015L + 0,007)) - ((0,015)/(0,001L^3 + 0,009L^2 - 0,015L + 0,007));$$

шини:

$$senP(L) = ((-0,000024 L^3)/(-0,000006 L^4 + 0,001L^3 - 0,01L^2 + 0,031L + 0,007)) + ((0,003L^2)/((-0,000006 L^4 + 0,001L^3 - 0,01L^2 + 0,031L + 0,007)) + ((0,02L)/(-0,000006 L^4 + 0,001L^3 - 0,01L^2 + 0,031L + 0,007)) - ((0,02L)/(-0,000006 L^4 + 0,001L^3 - 0,01L^2 + 0,031L + 0,007)) + ((0,031)/((-0,000006 L^4 + 0,001L^3 - 0,01L^2 + 0,031L + 0,007)));$$

- гальмівна система:

$$senP(L) = ((0,004L^3)/(0,0001L^4 - 0,003L^3 + 0,02L^2 - 0,052L + 0,068)) - ((0,009L^2)/(0,0001L^4 - 0,003L^3 + 0,02L^2 - 0,052L + 0,068)) + ((0,04L)/(0,0001L^4 - 0,003L^3 + 0,02L^2 - 0,052L + 0,068)) - (0,052)/(0,0001L^4 - 0,003L^3 + 0,02L^2 - 0,052L + 0,068)).$$

Обчислюємо значення сенситивів функції відмов систем і агрегатів на інтервалах пробігу ТЗ і отримані результати зводимо до таблиці 2.

Таблиця 2
Значення сенситивів на інтервалах пробігу ТЗ

Системи та агрегати	Пробіг						
	10	20	30	40	50	60	70
Паливна система	0.557	0.258	0.173	0.133	0.111	0.097	0.088
Циліндро-поршнева група	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Коробка перемикачів Передач	0.172	0.108	0.079	0.062	0.052	0.044	0.038
Шини	0.416	0.174	0.105	0.074	0.055	0.043	0.034
Гальмівна система	0.38	0.168	0.108	0.079	0.063	0.052	0.044

Порівняльний аналіз даних, занесених до таблиць 1 і 2, для відповідних інтервалів пробігу автомобілів свідчить, що числові значення сенситивів можна використовувати при коригуванні технічних дій для підвищення експлуатаційної надійності систем, агрегатів і ТЗ в цілому.

В основу складання графіку проведення ТО та діагностики ТЗ покладено результати аналізу значень сенситиву функції відмов систем та агрегатів на інтервалах пробігу (табл. 2) для однотипних ТЗ, які експлуатуються в однакових умовах. Виявлено, що для ТО-2 сенситив відмов систем та агрегатів ТЗ для даного парку автомобілів, повинно мати значення $SenP(L) > 0,4$. В той час для діагностування Д-2 значення сенситиву функції відмов знаходиться в межах $0,25 < SenP(L) < 0,4$. Що стосується ТО-1, то його можна проводити, у випадках, коли сенситив функції відмов знаходиться в межах $0,15 < SenP(L) < 0,25$; в той час, як при діагностуванні Д-1 маємо межі $0,1 < SenP(L) < 0,15$.

Виходячи із використання теорії сенситивів функції відмов систем та агрегатів ТЗ та меж значень її відповідних сенситивів, пов'язаних з конкретними адаптивними технічними діями, розроблено рекомендації по підтриманню експлуатаційної надійності ТЗ на належному рівні:

- після 10 тис. км. пробігу проводиться ТО-2 паливної системи, шини; Д-2 гальмівної системи та Д-1 – коробка перемикачів передач;

- після 30 тис. км. проводиться ТО-1 паливної системи та Д-1 гальмівної системи;

- після 40 тис. км. проводиться Д-1 паливної системи;

Розроблений порядок технічних дій зменшує час простою ТЗ, збільшує умови максимального використання ресурсу його систем та агрегатів. Оскільки адаптивна стратегія ТО ТЗ повинна постійно пристосовуватися до умов експлуатації та режимів роботи, то вона вимагає більш детального вивчення факторів впливу на технічний стан системи, агрегатів і ТЗ в цілому та розробку нових алгоритмів обробки не тільки статистичної апріорної, а також фактичної діагностичної інформації. В напрямку виявлення найбільш інформативних діагностичних параметрів, обробки фактичної діагностичної інформації необхідні подальші як теоретичні, так і експлуатаційні дослідження з використанням теорії чутливості функції стану, особливо теорії сенситивів.

Висновки

1. З теоретичної точки зору обґрунтовано функцію стану систем та агрегатів ТЗ і її абсолютну та відносну чутливість для окремих діагностичних параметрів та їх векторів.

2. За результатами пасивного експерименту отримано дані про надійність систем та агрегатів в залежності від пробігу ТЗ.

3. Отримано регресійні залежності ймовірності відмов та їх сенситиви систем та агрегатів від пробігу автомобіля.

4. Запропоновано використання значення сенситивів ймовірності відмов при коригуванні технічних дій для підвищення експлуатаційної надійності ТЗ.

5. Розроблені рекомендації для адаптивного технічного обслуговування систем, агрегатів та ТЗ в цілому.

Список використаних джерел

1. Аулін В.В. Проблеми підвищення експлуатаційної надійності та можливості удосконалення стратегії технічного обслуговування мобільної сільськогосподарської техніки / В.В. Аулін, А.В. Гриньків // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету: Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування. – 2015. - № 28. С126-131.

2. Аулін В.В. Інформаційне забезпечення зміни технічного стану дизелів засобів транспорту/В.В. Аулін, О.Ю. Жулай//Вісник інженерної академії наук України - №1, 2011. С166 – 172.

3. Біліченко В. В. Основи технічної діагностики колісних транспортних засобів: навчальний посібник / В. В. Біліченко, В. Л. Крещенецький, Ю.Ю. Кукурудзяк, С. В. Цимбал – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 118 с.

4. Кокорев Г.Д. Периодичность контроля технического состояния мобильной сельскохозяйственной техники/ Г.Д. Кокорев, И.А. Успенский, Н.В. Бышов, С.Н.Боричев// В электронном журнале "Научный журнал Куб-ГАУ". – 2012г., №7 (081), режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/07/pdf/36.pdf>, С.480-490

5. Кузьменко А.Г. Теоретическая и экспериментальная трибология. В 12т. Т.7 Надежность узлов трения по прочности и износу: монография/ А.Г.Кузьменко. – Хмельницкий: ХНУ, 2011. – 391с.

6. Захарин Ф.М. Прямые и обратные задачи теории чувствительности/Ф.М.Захарин, Р.М.Юсупов, В.И.Городецкий, В.М.Пономарев// АН СССР. – Техническая кибернетика, 1971. - №5 – С.177-187.

7. Юсупов Р.М. Элементы теории испытания и контроля технических систем: Монография/Р.М. Юсупов. – Ленинград: Энергия, 1978 – 420с.