

УДК 629.016

ФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО УСТАНОВЛЕНИЮ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВАЗ-21703 НА КРИТЕРИЙ ЕГО РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Денисов И.В., Смирнов А.А.

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: denisoviv@mail.ru, AlexiFoX@yandex.ru

Представлены результаты исследований по определению степени влияния диагностических параметров, используемых для контроля технического состояния ЭМУ РУ ВАЗ-21703, с предложенным критерием работоспособности. В процессе стендовых испытаний получены практические значения факторов «максимальный ток потребления», «максимальный компенсирующий момент» и «время срабатывания ЭМУ», а также установлена их тесная связь с исследуемым показателем. Ввиду слабого влияния на критерий работоспособности ЭМУ РУ диагностических параметров «неравномерное вращение вала электродвигателя» и «температура обмоток электродвигателя» в факторном анализе они не учитывались. Определены коэффициенты регрессионной модели и осуществлена проверка их значимости. Степень влияния различных диагностических параметров ЭМУ РУ на критерий его работоспособности отражена в уравнении регрессии, которое по результатам проверки признано адекватным.

Ключевые слова: факторный эксперимент, электромеханический усилитель рулевого управления, ВАЗ-21703, критерий работоспособности

FACTORIAL DESIGN SOFTWARE TO DETERMINE THE EXTENT OF INFLUENCE OF PARAMETERS ELECTROMECHANICAL POWER STEERING VAZ-21703 ON THE CRITERIA OF ITS EFFICIENCY

Denisov I.V., Smirnov A.A.

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,
Vladimir; e-mail: denisoviv@mail.ru, AlexiFoX@yandex.ru

The results of studies to determine the degree of influence of the diagnostic parameters used to control the technical state of the electromechanical power steering VAZ-21703, with the proposed health criteria. In the process of bench testing the practical value factors «maximum current consumption», «maximum compensatory time» and «time of actuation of the electromechanical power steering», and also revealed their close relationship with the studied indicator. Due to weak impact on the health criteria electromechanical power steering diagnostic parameters «uneven rotation of the motor shaft and the temperature of the motor windings» in factor analysis, they were not considered. Coefficients of the regression model and verified their significance. The impact of different diagnostic parameters electromechanical power steering on the criterion of its efficiency is reflected in the regression equation, which according to the test results found to be adequate.

Keywords: factorial design, electromechanical power steering, VAZ-21703, health criteria

В работе [1] для оценки технического состояния электромеханического усилителя рулевого управления (ЭМУ РУ) автомобиля ВАЗ-21703 (LADA Priora) предложен диагностический параметр (ДП) – критерий работоспособности (КР) ϕ , равный отношению коэффициента усиления момента силы K_y к максимальному току потребления усилителя $I_{\max}$, а также установлены предельное и предельно допустимое значения КР.

$$\phi = \frac{K_y}{I_{\max}}, [A^{-1}]. \quad (1)$$

В ходе дальнейших экспериментальных исследований проводились стендовые испытания ЭМУ РУ, **цель которых** заключалась в определении практических значений

КР. Факторами, влияющими на КР, являлись установленные в [2] ДП.

Задача эксперимента состояла в получении и проверке интерполяционной формулы для предсказаний значений изучаемого параметра (КР). Как правило, интерполяционная формула представляет собой математическую модель вида

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k), \quad (2)$$

описывающую поведение объекта, которая называется функцией отклика.

Методы исследования: при проведении стендовых испытаний, методика которых описана в [3], было выявлено, что ДП «неравномерное вращение вала электродвигателя» и «температура обмоток электродвигателя» не оказывают существенного

влияния на КР. Поэтому для проведения дальнейших исследований были выбраны следующие факторы: максимальный ток потребления, ток потребления при отсутствии момента на входном валу, максимальный компенсирующий момент, время срабатывания ЭМУ. Обработка результатов эксперимента осуществлялась в соответствии с методикой, изложенной в [4].

При исследовании, в области эксперимента устанавливают основные уровни и интервалы варьирования факторов. Интервал варьирования факторов определяется как

$$I = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2}. \quad (3)$$

Основной (нулевой) уровень рассчитывается по формуле

$$X_0 = \frac{X_{\max} + X_{\min}}{2}. \quad (4)$$

Результаты расчета представим в табл. 1.

Далее, зная число факторов, по формуле (5), вычислим общее число экспериментов, которые необходимо провести в данном случае.

$$N = m^k, \quad (5)$$

где m – число уровней фактора; k – число факторов.

$$N = 2^4 = 16.$$

Факторный эксперимент осуществляют с помощью матрицы планирования, в которой используют кодированные значения

$$S_1^2 = \frac{1}{3-1} ((0,584 - 0,627)^2 + (0,989 - 0,627)^2 + (0,307 - 0,627)^2) = 0,117646.$$

факторов. Для исключения систематических ошибок опыты, предусмотренные матрицей планирования необходимо выполнить в случайной последовательности. Поэтому порядок проведения опытов выбран по таблице случайных чисел и представлен в табл. 2.

Для компенсации случайных погрешностей и повышения точности эксперимента произведено равномерное дублирование с числом n параллельных опытов равным 3.

Для каждой строки матрицы планирования по результатам n параллельных опытов найдено среднее арифметическое значение параметра оптимизации:

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n Y_{ju}, \quad (6)$$

где u – номер параллельного опыта; Y_{ju} – значение параметра оптимизации в i -м параллельном опыте i -й строки матрицы планирования.

Например, для первой строки матрицы планирования $\bar{Y}_1$ составит

$$\bar{Y}_1 = \frac{1}{3} (0,584 + 0,989 + 0,307) = 0,627.$$

С целью оценки отклонений параметра оптимизации от его среднего значения для каждой строки матрицы планирования вычислена статистическая дисперсия S_j^2 :

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (Y_{ju} - \bar{Y}_j)^2. \quad (7)$$

Так, S_1^2 будет равна

Таблица 1

Интервал варьирования и основной уровень факторов

Наименование и обозначение факторов	Уровни факторов		Интервал варьирования, I	Основной уровень, X_0
	Верхний	Нижний		
Максимальный ток потребления, X_1	55	0,5	27,25	27,75
Ток потребления при отсутствии момента на входном валу, X_2	0,5	0	0,25	0,25
Максимальный компенсирующий момент, X_3	24	0	12	12
Время срабатывания ЭМУ, X_4	0,02	0,001	0,0095	0,0105

Таблица 2

Порядок реализации опытов

Номер опыта матрицы		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Порядок реализации	Y_1	14	11	1	15	8	10	6	9	2	16	12	3	7	13	5	4
	Y_2	10	6	2	13	3	12	8	15	7	1	14	11	5	9	4	16
	Y_3	12	7	5	8	13	2	3	14	11	6	10	4	15	9	16	1

Ошибка опыта S_j определяется как корень квадратный из дисперсии опыта:

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (Y_{ju} - \bar{Y}_j)^2}; \quad (8)$$

$$S_1 = \sqrt{0,117646} = 0,342996.$$

При равномерном дублировании опытов однородность ряда дисперсий проверяют с помощью G -критерия Кохрена, представляющего собой отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_N^2}. \quad (9)$$

В нашем случае

$$G_p = \frac{0,12690}{0,117646 + 0,084044 + \dots + 0,053956} = 0,1874.$$

Так как расчетное значение критерия Кохрена $G = 0,1874$ не превышает табличного $G_{\tau} = 0,3346$, то делаем вывод об однородности дисперсий. Учитывая однородность дисперсий, вычислена дисперсия воспроизводимости эксперимента:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2; \quad (10)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{16} (0,117646 + 0,084044 + \dots + 0,053956) = 0,042301.$$

Далее, по результатам эксперимента определены коэффициенты модели. Свободный член b_0 найден по формуле

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{Y}_j; \quad (11)$$

$$b_0 = \frac{1}{16} (0,627 + 0,576 + \dots + 0,333) = 0,3055.$$

Коэффициенты регрессии рассчитаны по выражению

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij} \bar{Y}_j, \quad (12)$$

где X_{ij} – кодированные значения i -го фактора в j -м опыте.

Так коэффициент регрессии b_1 будет равен

$$b_1 = \frac{1}{16} ((-1) \cdot 0,627 + 1 \cdot 0,567 + \dots + 1 \cdot 0,33) = -0,0686.$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия, определены как

$$b_{il} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij} X_{lj} \bar{Y}_j. \quad (13)$$

Результаты расчета коэффициентов регрессии представлены в табл. 3.

После вычисления коэффициентов модели необходимо проверить их значимость. Проверка значимости коэффициентов осуществляется двумя способами: сравнением абсолютной величины коэффициента с доверительным интервалом и с помощью t -критерия Стьюдента.

При проверке значимости коэффициентов первым способом для определения доверительного интервала необходимо найти дисперсии коэффициентов регрессии.

Дисперсия i -го коэффициента рассчитана по формуле

$$S^2 \{b_i\} = \frac{1}{nN} S_y^2; \quad (14)$$

$$S^2 \{b_i\} = \frac{1}{3 \cdot 16} \cdot 0,042301 = 0,00088127.$$

Доверительный интервал Δb_i определен по выражению

$$\Delta b_i = \pm t_{\tau} S \{b_i\}; \quad (15)$$

где t_{τ} – табличное значение критерия Стьюдента при принятом уровне значимости и числе степеней свободы f , с которым определялась дисперсия S_y^2 , $S \{b_i\}$ – ошибка в определении i -го коэффициента регрессии.

$$S \{b_i\} = \sqrt{S^2 \{b_i\}}. \quad (16)$$

При равномерном дублировании опытов число степеней свободы находят как

$$f = (n - 1)N = (3 - 1) \cdot 16 = 32;$$

$$S \{b_i\} = \sqrt{0,00088127} = 0,02968617.$$

Таблица 3

Значения коэффициентов регрессии

$b_0 = 0,3055$	$b_1 = -0,0686$	$b_2 = -0,0104$	$b_3 = -0,0447$	$b_4 = -0,0826$	
$b_{12} = -0,0375$	$b_{13} = 0,0083$	$b_{14} = 0,0696$	$b_{23} = 0,0389$	$b_{24} = 0,0271$	$b_{34} = 0,0856$
$b_{123} = 0,0270$	$b_{124} = 0,0740$	$b_{134} = -0,0391$	$b_{234} = -0,0022$	$b_{1234} = -0,0174$	

При 5%-м уровне значимости и числе степеней свободы 32 табличное значение критерия Стьюдента составляет $t_{\tau} = 2,04$. Тогда доверительный интервал Δb_i будет равен

$$\Delta b_i = \pm 2,04 \cdot 0,02968617 = \pm 0,06055979.$$

Коэффициент считается значимым, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. При сравнении полученных значений Δb_i с данными табл. 3 сделан вывод о значимости коэффициентов регрессии $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{34}, b_{124}$.

При проверке значимости коэффициентов регрессии вторым способом критерий t_p найден из выражения

$$t_p = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}} \quad (17)$$

и сопоставлен с табличным t_{τ} . Коэффициент значим, если $t_p > t_{\tau}$. Статистически незначимые коэффициенты исключаются из модели. Результаты расчета t_p представлены в табл. 4.

После сравнения расчетных значений t_p с табличными сделан вывод о значимости коэффициентов регрессии $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{34}, b_{124}$.

Таким образом, уравнение регрессии примет вид

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{34} X_3 X_4 + b_{124} X_1 X_2 X_4. \quad (18)$$

После расчета коэффициентов модели и проверки их на значимость определена дисперсия $S_{ад}^2$ адекватности:

$$S_{ад}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^N (\bar{Y}_j - \hat{Y}_j)^2}{N - (k + 1)}, \quad (19)$$

где $\hat{Y}_j$ – значение параметра оптимизации, вычисленное по модели для условий j -го опыта; k – число факторов.

Так, для первой строки матрицы планирования значение $\hat{Y}_1$ составило

$$\hat{Y}_1 = 0,3055 + (-0,0686) \cdot 1 + (-0,0826) \cdot 1 + 0,0696 \cdot 1 + 0,0856 \cdot 1 + 0,0740 \cdot (-1) = 0,538.$$

$$S_{ад}^2 = \frac{3 \cdot 0,13476}{16 - (3 + 1)} = 0,036648.$$

Таблица 4

Значения критерия по выражению

$t_p^0 = 10,29$	$t_p^1 = 2,31$	$t_p^2 = 0,35$	$t_p^3 = 1,5$	$t_p^4 = 2,78$	
$t_p^{12} = 1,26$	$t_p^{13} = 0,28$	$t_p^{14} = 2,34$	$t_p^{23} = 1,31$	$t_p^{24} = 0,91$	$t_p^{34} = 2,88$
$t_p^{123} = 0,91$	$t_p^{124} = 2,49$	$t_p^{134} = 1,32$	$t_p^{234} = 0,07$	$t_p^{1234} = 0,59$	

Таблица 5

Результаты многофакторного эксперимента

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3	$\bar{Y}_j$	S_j^2	s_j	$\hat{Y}_j$
1	+	+	+	+	+	0,584	0,989	0,307	0,627	0,117646	0,342996	0,538
2	+	+	+	+	+	0,675	0,788	0,239	0,567	0,084044	0,289904	0,409
3	+	+	+	+	+	0,989	0,370	0,985	0,781	0,126900	0,356231	0,686
4	+	+	+	+	+	0,078	0,106	0,111	0,098	0,000316	0,017786	0,262
5	+	+	+	+	+	0,243	0,493	0,098	0,278	0,039925	0,199812	0,367
6	+	+	+	+	+	0,116	0,105	0,470	0,230	0,043110	0,207630	0,238
7	+	+	+	+	+	0,423	0,243	0,592	0,419	0,030460	0,174529	0,515
8	+	+	+	+	+	0,152	0,078	0,081	0,104	0,001754	0,041885	0,090
9	+	+	+	+	+	0,086	0,384	0,122	0,197	0,026457	0,162657	0,210
10	+	+	+	+	+	0,061	0,137	0,423	0,207	0,036436	0,190882	0,064
11	+	+	+	+	+	0,092	0,088	0,130	0,103	0,000537	0,023180	0,062
12	+	+	+	+	+	0,100	0,123	0,439	0,221	0,035884	0,189432	0,212
13	+	+	+	+	+	0,384	0,403	0,072	0,286	0,034544	0,185861	0,382
14	+	+	+	+	+	0,093	0,161	0,149	0,134	0,001317	0,036295	0,235
15	+	+	+	+	+	0,403	0,439	0,061	0,301	0,043524	0,208624	0,234
16	+	+	+	+	+	0,439	0,067	0,494	0,333	0,053956	0,232285	0,383
$G_p = 0,1874$					$S_y^2 = 0,042301$			$\sum \bar{Y}_j = 4,888$		$\sum S_j^2 = 0,676814$		
$G_{\tau} = 0,3346$					$S\{b_i\} = 0,00088127$			$\Delta b_i = \pm 0,06055979$		$F_p = 0,866$		
$f = 32$					$S\{b_i\} = 0,029686175$			$S_{ад}^2 = 0,036648$		$t_{\tau} = 2,04$		

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты эксперимента по установлению влияния диагностических параметров ЭМУ РУ на критерий работоспособности показаны в табл. 5.

Далее выполнена проверка гипотезы об адекватности полученной математической модели [5]. Для этого использовался критерий Фишера:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}. \quad (20)$$

$$F_p = \frac{0,036648}{0,042301} = 0,866.$$

Поскольку $F_p = 0,866 < F_{\tau} = 2,1$ для принятого уровня значимости и соответствующем числе степеней свободы, то модель считаем адекватной.

Вывод

В результате экспериментальных исследований по установлению рабочих характеристик ЭМУ РУ ВАЗ-21703 получены практические значения КР и соответствующие им величины факторов. В процессе стендовых испытаний выявлено слабое влияние ранее предложенных ДП «неравномерное вращение вала электродвигателя» и «температура обмоток электродвигателя» на исследуемый показатель работоспособности, поэтому в факторном анализе они не учитывались. По результатам эксперимента определены коэффициенты регрессионной модели и осуществлена проверка их значимости. Степень влияния различных диагностических параметров ЭМУ РУ на критерий его работоспособности отражена в уравнении регрессии, которое успешно прошло проверку на адекватность. Факторы «максимальный ток потребления», «максимальный компенсирующий момент», а также «время срабатывания ЭМУ» в наибольшей степени влияют на КР.

Список литературы

1. Денисов Ил.В., Смирнов А.А. Оценка технического состояния электромеханического усилителя рулевого управления ВАЗ-21703 с помощью критерия работоспособности // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11 (часть 12). – С. 2585–2588.
2. Денисов Ил.В., Смирнов А.А. Выбор диагностических параметров ЭМУ РУ ВАЗ-21703 с использованием

структурно-следственной схемы // Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса: материалы 4-ой международной науч.-практ. конф. – Орёл, 2014. – С. 12–14.

3. Денисов Ил.В., Нуждин Р.В., Смирнов А.А. Планирование эксперимента по нормированию критерия работоспособности электромеханического усилителя рулевого управления автомобиля категории М1 // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств: материалы XVI междунар. науч.-практ. конф. – Владимир, 2014. – С. 62–66.

4. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

5. Третьяк, Л.Н. Обработка результатов наблюдений: учебное пособие. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 171 с.

References

1. Denisov I.V., Smirnov A.A. Ocenka tehničeskogo sostojanija jelektromehaničeskogo usilitelja rulevogo upravlenija VAZ-21703 s pomoshh'ju kriterija rabotosposobnosti [Evaluation of the technical state of the electromechanical power steering VAZ-21703 using the criterion of efficiency] // Fundamental Research no. 11, 2014, pp. 2585–2588.
2. Denisov I.V., Smirnov A.A. Vybór diagnostičeskikh parametrov jelektromehaničeskogo usilitelja rulevogo upravlenija VAZ-21703 s ispol'zovaniem strukturno-sledstvennoj shemy [Selection of diagnostic parameters electromechanical power steering VAZ-21703 with structurally-effect scheme] // Aktual'nye voprosy innovacionnogo razvitija transportnogo kompleksa: materialy 4-oj mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf. [Topical issues of innovative development of the transport complex: Proceedings of the 4th International Scientific-Practical Conference]. Orel, 2014, pp. 12–14.
3. Denisov I.V., Nuzhdin R.V., Smirnov A.A. Planirovanie jeksperimenta po normirovaniju kriterija rabotosposobnosti jelektromehaničeskogo usilitelja rulevogo upravlenija avtomobilja kategorii M1 [Experimental Design for rationing criterion performance electromechanical power steering vehicle category M1] // Aktual'nye problemy jekspluatcii avtotransportnyh sredstv: materialy XVI mezhdunar. nauch.-prakt. Konf [Actual problems of operation of vehicles: Materials XVI Int. Scientific-Practical Conference]. Vladimir, 2014, pp. 62–66.
4. Spiridonov A.A. Planirovanie jeksperimenta pri issledovanii tehnologičeskikh processov [Design of experiments in the study of technological processes] Moscow: Mashinostroenie, 1981, 184 p.
5. Tretiak L.N. Obrabotka rezultatov nablyudenij [Processing of the results of observations] Orenburg: SEI OSU, 2004, 171 p.

Рецензенты:

Гоц А.Н., д.т.н., профессор кафедры «Тепловые двигатели и энергетические установки», ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир;

Кульчицкий А.Р., д.т.н., профессор, главный специалист, ООО «Завод инновационных продуктов КТЗ», г. Владимир.