
УДК 629.3

В. П. Тарасик, В. С. Савицкий

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ
ФРИКЦИОНАМИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ**

UDC 629.3

V. P. Tarasik, V. S. Savitsky

**OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF THE MECHANISM FOR CONTROLLING
HYDROMECHANICAL TRANSMISSION FRICTION CLUTCHES**

Аннотация

Выбраны критерии оптимальности, проведено планирование эксперимента, построены регрессионные модели зависимостей критериев от параметров механизма управления фрикционами, осуществлена оптимизация параметров.

Ключевые слова:

карьерный самосвал, гидромеханическая передача, механизм управления фрикционами, параметры механизма, критерии качества переходных процессов.

Abstract

The optimality criteria are selected, the experiment planning is done, regression models of criteria dependence on the parameters of the friction clutches control mechanism are constructed, the optimization of the parameters is carried out.

Key words:

quarry dump truck, hydromechanical transmission, friction clutch control mechanism, mechanism parameters, criteria of quality of transient processes.

Одним из средств повышения эффективности автомобилей является применение автоматических трансмиссий, позволяющих оптимизировать реализацию энергии двигателя, существенно обезопасить движение и создать комфортные условия водителю. В настоящее время широко используются гидромеханические передачи, управление переключением передач которых осуществляется посредством мехатронных систем. В состав мехатронной системы автоматического управления (МСАУ) входят: электронный блок управления (микропроцессорный контроллер), селектор выбора режимов управления, механизмы управления фрикционами

(МУФ), электронная панель отображения информации о работе механизмов двигателя и трансмиссии и необходимый для этой цели комплекс датчиков.

При создании МСАУ для карьерных самосвалов БелАЗ наиболее сложной проблемой оказалась разработка МУФ. Назначение МУФ – управление потоком энергии рабочей жидкости, подаваемой в гидроцилиндр фрикциона, и обеспечение требуемой характеристики изменения давления в нём в процессе переключения передачи.

Конструкция МУФ представлена на рис. 1. В состав МУФ входят регулятор давления и усилитель энергии сигнала управления.

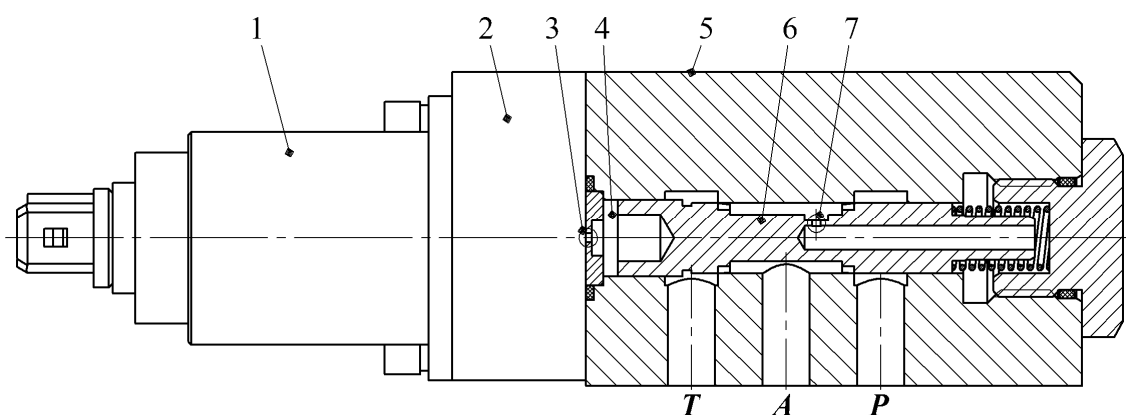


Рис. 1. Конструкция механизма управления фрикционными

Регулятор давления состоит из пропорционального электромагнита 1 и гидравлического клапана 2 с обратной связью по давлению. Поскольку энергия электромагнита ограничена, то МУФ выполнен по двухступенчатой схеме. Первая ступень – регулятор давления (РД), а вторая ступень 5, обеспечивающая усиление формируемого сигнала управления, представляет собой регулятор-распределитель (РР). Гидроклапан РД выполнен с шариковым запорно-регулирующим органом, а РР – с золотниковым. Золотник 6 показан в положении дросселирования канала подачи рабочей жидкости *P* и канала слива *T* в процессе регулирования давления в ка-

нале *A* подачи к гидроцилиндру фрикциона. Рабочая полость 4 регулятора-распределителя связана дроссельным отверстием 3 с выходом РД. В золотнике 6 выполнено дроссельное отверстие 7 обратной связи РР по регулируемому давлению в канале *A*.

Конструкция золотника РР представлена на рис. 2. Золотник содержит напорный 1 и сливной 2 пояски, на кромках 3 которых выполнены выточки 4, предназначенные для снижения амплитуды колебаний давления в канале *A* (см. рис. 1) и стабилизации осциллирующих перемещений золотника.

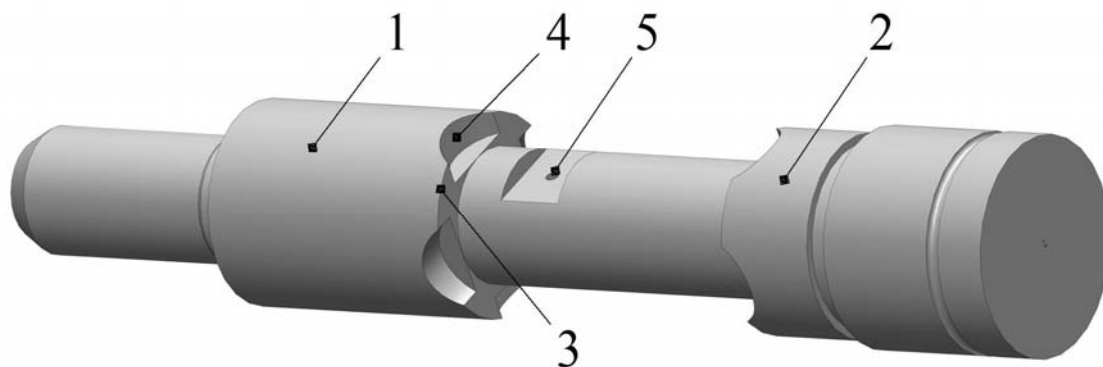


Рис. 2. Золотник регулятора-распределителя

При изготовлении опытных образцов РР выполнялся с различными перекрытиями Δ_{Π} дросселирующих щелей:

положительным, отрицательным и нулевым. На рис. 3, а показана схема, поясняющая формирование этих перекрытий.

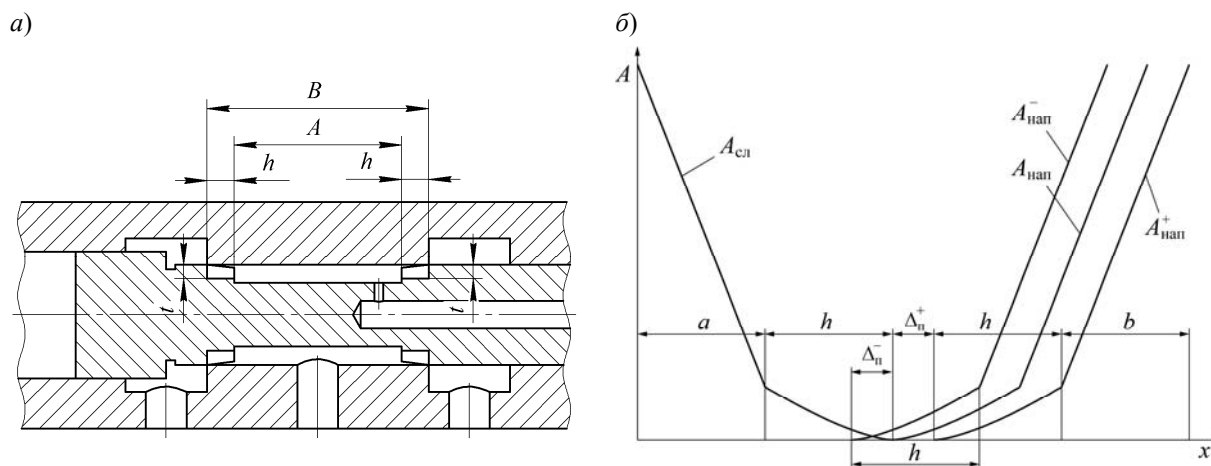


Рис. 3. Схема определения перекрытия дросселирующих щелей (а) и график зависимостей их площадей от перемещения золотника x (б)

Величина Δ_{Π} определяется по формуле

$$\Delta_{\Pi} = B - A - 2h, \quad (1)$$

где A – расстояние между кромками золотника; B – расстояние между кромками корпуса РР; h – глубина выточек.

На рис. 3, б показаны графики изменения площадей сливной $A_{сл}$ и напорной $A_{нап}$ дросселирующих щелей в зависимости от перемещения золотника x . При положительном перекрытии использованы обозначения Δ_{Π}^+ и $A_{нап}^+$, при отрицательном – Δ_{Π}^- и $A_{нап}^-$, при $\Delta_{\Pi} = 0$ и $A_{нап}$ – нулевое перекрытие.

Проведенные испытания созданных опытных образцов МУФ показали, что наибольшее влияние на характеристики процесса регулирования оказывают параметры регулятора-распределителя: коэффициент жёсткости возвратной пружины золотника $c_{вп3}$; перекрытие дросселирующих щелей Δ_{Π} ; диаметры дросселей обратной связи РР

$d_{др4}$ и связи между РД и РР $d_{др3}$. Для выявления степени влияния их на характеристики управления осуществлялось математическое моделирование, результаты которого изложены в [1]. Однако, поскольку характеристики управления зависят от множества параметров РР, однозначного ответа на их выбор получить не представляется возможным. Поэтому решалась задача оптимизации параметров.

В [2] показано, что решение поставленной задачи целесообразно осуществлять на базе использования уравнений регрессий, связывающих между собой критерии и оптимизируемые параметры объекта. Уравнения регрессий при этом получают на основе проведения планируемого вычислительного эксперимента на исходной математической модели (уравнения (1) и (2) в [1]). Планирование эксперимента позволяет существенно сократить количество прогонов исходной модели, следовательно, и затраты времени.

Для построения регрессионной модели принят квадратный полином. Струк-

тура квадратного полинома содержит основные эффекты, все парные взаимодействия и квадратичные эффекты:

$$y_j = b_{0j} + b_{1j}x_1 + b_{2j}x_2 + b_{3j}x_3 + b_{4j}x_4 + b_{5j}x_1x_2 + b_{6j}x_1x_3 + b_{7j}x_1x_4 + b_{8j}x_2x_3 + b_{9j}x_2x_4 + b_{10j}x_3x_4 + b_{11j}x_1^2 + b_{12j}x_2^2 + b_{13j}x_3^2 + b_{14j}x_4^2, \quad j = \overline{1,4}, \quad (2)$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 – нормированные значения факторов (параметров $c_{вп3}$, $\Delta_{п}$, $d_{др4}$, $d_{др3}$, подлежащих оптимизации); y_j – j -я функция отклика (критерии качества $t_{зап}$, $t_{п}$, $k_{др}$, $t_{он}$); $b_{0j}, b_{1j}, \dots, b_{14j}$ – коэффициенты j -го уравнения регрессии.

Факторы x_i являются параметрами МУФ, подлежащими оптимизации, а функции отклика y_j – критерии качества функционирования МУФ.

В качестве критериев оценки процесса функционирования МУФ были приняты следующие его выходные параметры: время заполнения гидроцилиндра $t_{зап}$; время переходного процесса $t_{п}$ на этапе регулирования; коэффициент динамичности давления при переходе к этапу регулирования $k_{др}$; гистерезис характеристики включения $t_{он}$.

Нормирование факторов осуществляется на основе соотношения

$$x_i = (X_i - X_i^0) / \Delta X_i; \quad i = \overline{1,n}, \quad (3)$$

где X_i – натуральное значение i -го фактора на нижнем или верхнем уровне варьирования; X_i^0 – натуральное значение i -го фактора в центре плана; ΔX_i – интервал варьирования; n – количество факторов.

При проведении эксперимента варьирование факторов производилось в соответствии с табл. 1.

Табл. 1. Значения факторов на уровнях варьирования при проведении эксперимента

Обозначение фактора		Единица измерения фактора	Натуральное значение фактора		
натуральное	нормированное		на нижнем уровне ($x_i = -1$)	в центре плана ($x_i = 0$)	на верхнем уровне ($x_i = +1$)
$c_{вп3}$	x_1	Н/мм	1,5	3,0	4,5
$\Delta_{п}$	x_2	мм	-0,25	0	0,25
$d_{др4}$	x_3	мм	0,6	0,8	1,0
$d_{др3}$	x_4	мм	0,6	0,8	1,0

В качестве плана эксперимента был выбран композиционный план типа B_n , получивший широкое применение благодаря экономичности и простой структуре [2]. Количество опытов N определяется по формуле

$$N = 2^n + 2n. \quad (4)$$

Согласно этой формуле для плана B_n при четырёх факторах необходимо провести 24 опыта. Нормированные

значения факторов в каждом опыте принимаются по матрице плана эксперимента (табл. 2).

Результаты эксперимента приведены в табл. 3. Для получения коэффициентов уравнений регрессий (2) они были подвергнуты регрессионному анализу, включающему три основных этапа [2]: статистический анализ результатов эксперимента, получение уравнений регрессий, оценка адекватности и работоспособности полученной регрессионной модели.

Табл. 2. Матрица плана эксперимента

Номер опыта	Нормированное значение фактора				Номер опыта	Нормированное значение фактора			
	x_1	x_2	x_3	x_4		x_1	x_2	x_3	x_4
1	-1	-1	-1	-1	13	-1	-1	+1	+1
2	+1	-1	-1	-1	14	+1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	-1	15	-1	+1	+1	+1
4	+1	+1	-1	-1	16	+1	+1	+1	+1
5	-1	-1	+1	-1	17	-1	0	0	0
6	+1	-1	+1	-1	18	+1	0	0	0
7	-1	+1	+1	-1	19	0	-1	0	0
8	+1	+1	+1	-1	20	0	+1	0	0
9	-1	-1	-1	+1	21	0	0	-1	0
10	+1	-1	-1	+1	22	0	0	+1	0
11	-1	+1	-1	+1	23	0	0	0	-1
12	+1	+1	-1	+1	24	0	0	0	+1

Табл. 3 Значения функций отклика в точках плана эксперимента

Номер опыта	Значения функций отклика в точках плана эксперимента				Номер опыта	Значения функций отклика в точках плана эксперимента			
	y_1	y_2	y_3	y_4		y_1	y_2	y_3	y_4
1	0,555	0,198	4,690	0,052	13	0,527	0,973	2,841	0,034
2	0,586	0,175	3,176	0,051	14	0,557	0,843	2,346	0,034
3	0,556	0,298	4,535	0,051	15	0,526	0,474	2,896	0,033
4	0,587	0,248	3,023	0,051	16	0,556	0,114	2,430	0,033
5	0,546	0,178	3,329	0,047	17	0,533	0,120	3,010	0,038
6	0,577	0,151	2,741	0,046	18	0,563	0,104	2,568	0,038
7	0,546	0,254	3,406	0,046	19	0,547	0,253	2,790	0,038
8	0,576	0,206	2,771	0,046	20	0,548	0,103	2,790	0,038
9	0,536	0,240	3,124	0,041	21	0,556	0,160	2,929	0,043
10	0,566	0,114	2,677	0,040	22	0,545	0,135	2,764	0,037
11	0,535	0,208	3,150	0,040	23	0,562	0,208	3,0075	0,047
12	0,567	0,071	2,626	0,040	24	0,543	0,148	2,7285	0,035

На первом этапе для каждой функции отклика осуществлено построение модели среднего и проведен её статистический анализ. При этом определены средние значения функций отклика \bar{y} и дисперсии моделей среднего S_y^2 , характеризующие рассеяние ре-

зультатов эксперимента относительно y и оценивающие погрешность модели среднего:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i; \tag{5}$$

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2, \quad (6)$$

где y_i – значение функции отклика в i -й точке плана; N – количество проведенных опытов, $N = 24$.

На втором этапе определены коэффициенты регрессий (методика изложена в [2]). На третьем этапе проверена пригодность полученных уравнений регрессий. Для этого вычислены по уравнениям регрессий предсказываемые значения функций отклика в каждой точке спектра плана \hat{y}_i и определена остаточная дисперсия $S_{\text{ост}}^2$, оценивающая погрешность полученной модели:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{N - N_B} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2, \quad (7)$$

где N_B – число коэффициентов в уравнении регрессии, $N_B = 15$.

Качество предсказания, обеспечиваемого полученными регрессионными моделями, оценивают по критерию Фишера F и коэффициенту детерминации R^2 .

При определении критерия Фишера принимается нулевая гипотеза о том, что модель среднего $\bar{y}(\bar{X})$ достаточно хорошо описывает исследуемый процесс. Регрессионная модель окажется адекватной, если выдвинутая гипотеза будет опровергнута. Критерий Фишера равен отношению дисперсии модели среднего S_y^2 к остаточной дисперсии $S_{\text{ост}}^2$:

$$F = S_y^2 / S_{\text{ост}}^2. \quad (8)$$

Уравнение регрессии адекватно описывает результаты эксперимента, если полученное по формуле (8) значе-

ние F больше табличного значения критерия Фишера F_T , определяемого при принятом уровне значимости q (для технических объектов рекомендовано принимать $q = 0,05$) и числа степеней свободы k_1 и k_2 , с которыми определены дисперсии S_y^2 и $S_{\text{ост}}^2$. В данном случае $k_1 = N - 1$, $k_2 = N - N_B$. Если условие $F > F_T$ выполняется, это означает, что уравнение регрессии описывает результаты эксперимента в F_T раз лучше модели среднего. Тогда нулевая гипотеза отвергается и регрессионная модель адекватна.

Коэффициент детерминации можно найти по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{(N - N_B) S_{\text{ост}}^2}{(N - 1) S_y^2}. \quad (9)$$

Значение R^2 определяет долю рассеяния экспериментальных значений функции отклика, учитываемую регрессионной зависимостью. Модель считается работоспособной, если $R^2 \geq 0,75$.

Значения коэффициентов регрессий приведены в табл. 4. Там же даны значения моделей среднего \bar{y} , дисперсий моделей среднего S_y^2 , остаточных дисперсий $S_{\text{ост}}^2$, критериев Фишера F , F_T и коэффициентов детерминации R^2 . Из представленных данных следует, что для всех функций отклика $F > F_T$ и $R^2 \geq 0,75$. Таким образом, полученные регрессионные модели адекватны и работоспособны.

На рис. 4 приведены графики зависимостей критериев качества от нормированных значений оптимизируемых параметров, полученные по уравнениям регрессий (2).

Табл. 4. Параметры регрессионных моделей выходных параметров

Коэффициент регрессии	Значение коэффициента регрессии для показателя качества				
	$t_{зап}$	t_n	$k_{др}$	$t_{он}$	
b_0	0,547438	0,106313	2,727792	0,038063	
b_1	0,015278	-0,05094	-0,368	-0,00017	
b_2	$-4,8 \cdot 10^{-19}$	-0,06383	-0,00483	-0,00028	
b_3	-0,00489	0,089778	-0,24486	-0,00294	
b_4	-0,00989	0,07050	-0,32561	-0,00594	
b_5	$6,25 \cdot 10^{-5}$	-0,01806	-0,00581	0,000188	
b_6	-0,00019	-0,01431	0,113313	$6,25 \cdot 10^{-5}$	
b_7	$-6,2 \cdot 10^{-5}$	-0,03781	0,144875	$6,25 \cdot 10^{-5}$	
b_8	-0,00031	-0,07469	0,03625	$-6,2 \cdot 10^{-5}$	
b_9	-0,00019	-0,10044	0,019688	$-6,3 \cdot 10^{-5}$	
b_{10}	$6,25 \cdot 10^{-5}$	0,118813	0,132063	-0,00044	
b_{11}	0,000562	0,005688	0,061208	$-6,3 \cdot 10^{-5}$	
b_{12}	$6,25 \cdot 10^{-5}$	0,071687	0,062208	$-6,2 \cdot 10^{-5}$	
b_{13}	0,003062	0,041187	0,118458	0,001938	
b_{14}	0,005063	0,071688	0,140208	0,002938	
Среднее значение функции отклика \bar{y}	0,554	0,249	3,014354	0,041625	
Дисперсия модели среднего S_y^2	0,00029	0,048536	0,309285	$3,82 \cdot 10^{-5}$	
Остаточная дисперсия $S_{ост}^2$	$3,59 \cdot 10^{-7}$	0,015481	0,04358	$6,25 \cdot 10^{-8}$	
Критерий Фишера	расчетный F	807,0463	3,135195	7,096947	611,913
	табличный F_T	2,908365	2,908365	2,908365	2,908365
Коэффициент детерминации R^2	0,999515	0,87519	0,944863	0,999361	

Как видно из рис. 4, критерии качества конфликтны на всём интервале варьирования факторов. Это означает, что улучшение одного критерия качества приводит к ухудшению другого. Например, при увеличении диаметров дросселей $d_{др4}$ и $d_{др3}$ (факторы x_3 и x_4) происходит снижение коэффициента динамичности $k_{др}$ и гистерезиса характеристики включения $t_{он}$, но возрастает время переходного процесса t_n . Таким образом, выбрать однозначно оптимальные параметры МУФ по графи-

кам, приведенным на рис. 4, не представляется возможным. Поэтому была поставлена и решена задача оптимизации параметров МУФ.

Так как решаемая задача оптимизации многокритериальная, необходимо свернуть векторный критерий в скалярную целевую функцию. Принципы, положенные в основу формирования целевой функции, определяют стратегию её решения. Использована минимаксная стратегия. Она позволяет обеспечить максимальное приближение одновременно всех критериев к их экстремальным значениям.

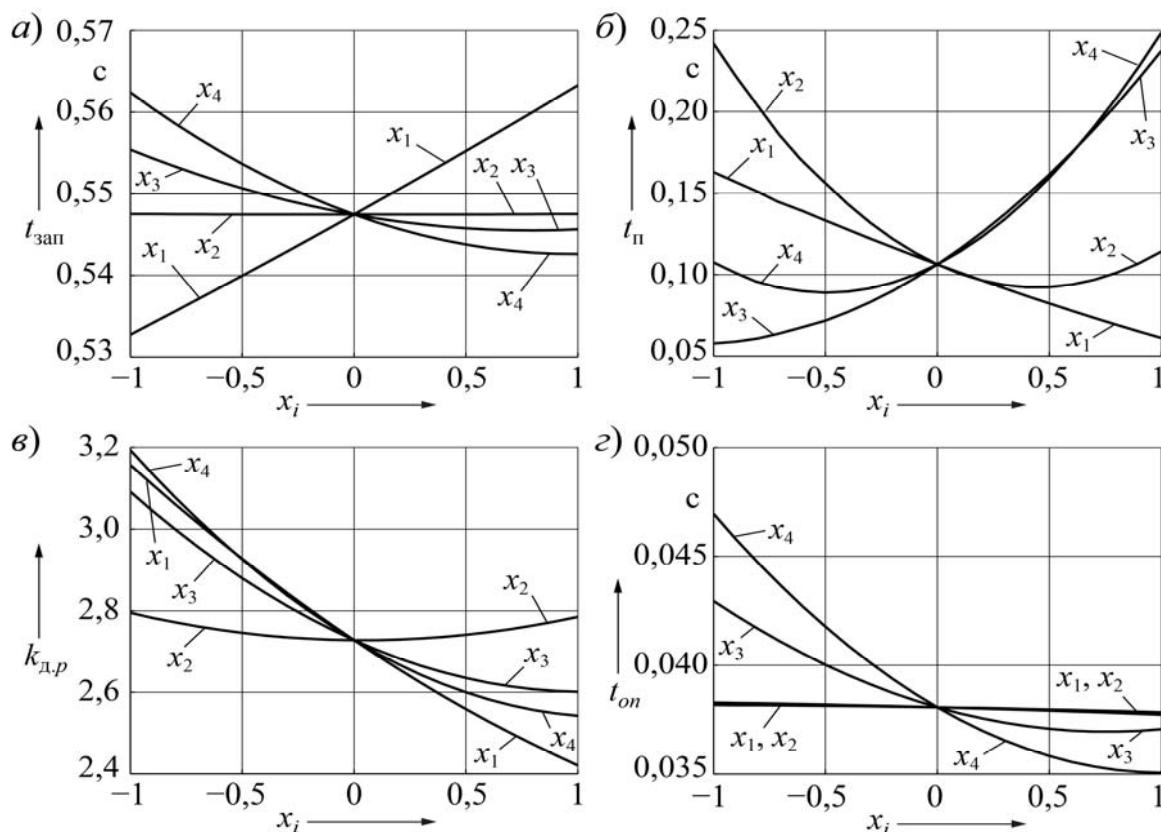


Рис. 4. Зависимости функций отклика – критериев качества процесса функционирования МУФ $t_{зап}$, $t_{п}$, $k_{др}$, $t_{он}$ от нормированных факторов $x_i, i = \overline{1,4}$

Целевая функция минимакса $F(\vec{X})$ при наличии регрессионной математической модели объекта соответствует выражению

$$F(\vec{X}) = \sum_{j=1}^m c_j \left(\frac{y_j(\vec{X}) - y_{j\text{extr}}}{y_{j\text{max}} - y_{j\text{min}}} \right)^2, \quad (10)$$

где $y_j(\vec{X})$ – зависимость j -го критерия от вектора оптимизируемых параметров $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; n – количество оптимизируемых параметров; $y_{j\text{extr}}$ – экстремальное значение j -го критерия; $y_{j\text{min}}, y_{j\text{max}}$ – минимальное и максимальные значения j -го критерия, достигаемые в области варьирования факторов \vec{X} (находятся по графикам на рис. 4, а–г); c_j – коэффициент веса, оценивающий значимость j -го критерия;

m – количество критериев.

Коэффициенты веса выбирают из условия

$$\sum_{j=1}^m c_j = 1; \quad c_j > 0. \quad (11)$$

Оптимальные значения параметров соответствуют минимуму целевой функции. Были приняты следующие значения коэффициентов веса: $c_1 = 0,1$; $c_2 = 0,35$; $c_3 = 0,3$; $c_4 = 0,25$. В результате получены искомые оптимальные значения параметров МУФ: $c_{вп3} = 3,617$ Н/мм; $\Delta_{п} = 0,185$ мм; $d_{др4} = 0,777$ мм; $d_{др3} = 0,93$ мм. Показатели качества процесса функционирования МУФ при этом составляют следующие величины: $t_{зап} = 0,550$ с; $t_{п} = 0,079$ с; $k_{др} = 2,523$;

$t_{on} = 0,035$ с.

На рис. 5, а представлены характеристики включения фрикциона с исходными параметрами МУФ, а на рис. 5, б – с оптимальными. На графиках приняты следующие обозначения:

$I_{эм}$ – ток в обмотке электромагнита;
 p_{y1} – давление рабочей жидкости, под-
 держиваемое переливным клапаном;
 p_{y2} – давление на выходе РД; p_{y4} – да-
 вление в гидроцилиндре фрикциона.

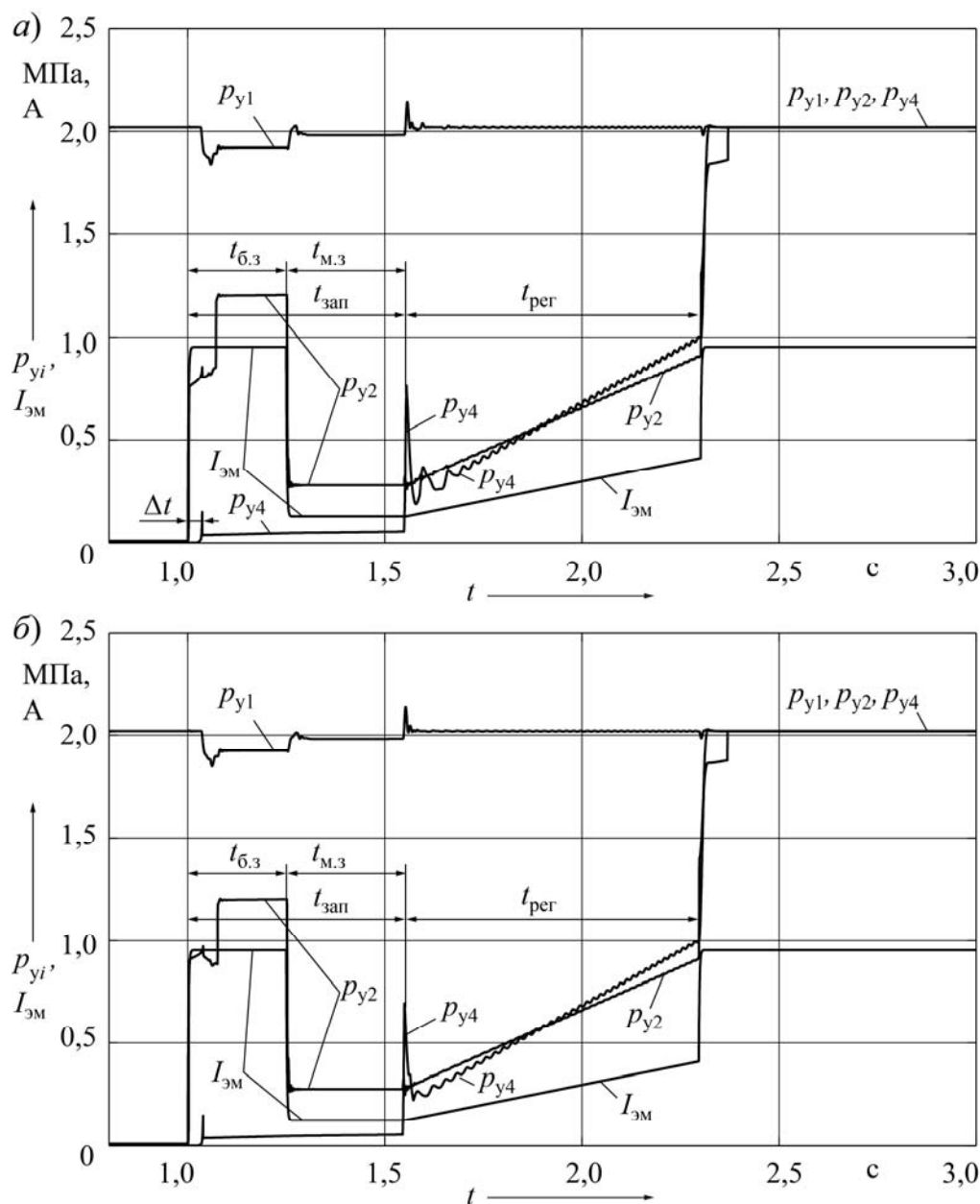


Рис. 5. Графики изменения характеристик давлений p_{yi} и тока $I_{эм}$ в обмотке электромагнита при включении передачи: а – с исходными параметрами МУФ; б – с оптимальными параметрами МУФ

При подаче тока $I_{эм}$ в обмотку электромагнита золотник РР перемещается вправо (см. рис. 1) и соединяет ка-

нал подачи рабочей жидкости P от насоса с каналом подвода A к гидроцилиндру включаемого фрикциона. После

заполнения последнего с некоторым запазданием по времени Δt в гидроцилиндре возникает давление p_{y4} , величина которого определяется усилием возвратных пружин поршня. Для ускорения заполнения гидроцилиндра на интервале времени $t_{б.з}$ устанавливается максимальный ток $I_{эм}$. Затем с целью уменьшения всплеска давления p_{y4} в гидроцилиндре на интервале времени $t_{м.з}$ величина тока $I_{эм}$ снижается. После окончания заполнения гидроцилиндра, характерным признаком которого является всплеск давления p_{y4} , в течение времени $t_{рег}$ осуществляется плавное регулирование давления в гидроцилиндре путём попеременного изменения площадей дросселирующих щелей на входах каналов P и A запорно-регулирующими органами золотника РР.

Сравнивая между собой графики, представленные на рис. 5, *а*, *б*, можно

отметить, что при использовании МУФ с оптимальными параметрами характеристика изменения давления p_{y4} в гидроцилиндре фрикциона при остановке поршня (момент времени $\approx 1,55$ с) имеет меньшую амплитуду и колебания её затухают быстрее, т. е. сокращается время переходного процесса и снижается динамичность процесса регулирования давления. При исходных значениях параметров МУФ коэффициент динамичности $k_{др} = 2,98$, а при оптимальных – $k_{др} = 2,49$, т. е. снижается в 1,2 раза. Время переходного процесса $t_{п}$ уменьшается в 1,8 раза.

Проведенные стендовые и эксплуатационные испытания созданного механизма управления фрикционом ГМП с выбранными параметрами показали высокую его эффективность и устойчивое функционирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савицкий, В. С. Математическая модель механизма управления фрикционами гидромеханической передачи карьерного самосвала / В. С. Савицкий, В. П. Тарасик // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 2 (51). – С. 71–82.
2. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем : учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2016. – 592 с.
3. Тарасик, В. П. Электрогидравлический механизм управления фрикционами гидромеханической передачи / В. П. Тарасик, Ю. С. Романович, В. С. Савицкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 2 (35). – С. 89–100.

Статья сдана в редакцию 1 марта 2016 года

Владимир Петрович Тарасик, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-36-45.

Виктор Сергеевич Савицкий, ведущий инженер, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-79-80-85.

Vladimir Petrovich Tarasik, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-25-36-45.
Viktor Sergeevich Savitsky, senior engineer, Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-79-80-85.