

виях торможения с груженым прицепом 6,6 кН, с порожним - 4 кН.

Существенное влияние на распределение тормозных сил и как следствие на эффективность торможения трактора и прицепа оказывает передаточное число трансмиссии. С уменьшением передаточного числа снижается эффективность торможения как трактора, так и прицепа. При этом у трактора в агрегате с груженым прицепом на заднем мосту наблюдается отрицательная удельная сила, т. е. ведущий момент, которая с уменьшением передаточного числа увеличивается.

Неравнозначное снижение эффективности торможения звеньев поезда с уменьшением передаточного числа трансмиссии приводит к снижению усилий растяжения в тягово-сцепном устройстве. Так, при переходе с 9-й передачи на 16-ю (при  $k_n = 0,05$ ) усилие в тягово-сцепном устройстве при агрегатировании трактора с груженым прицепом уменьшается в 3,6, а с порожним - в 4 раза.

На основании анализа можно сделать вывод о том, что для обеспечения способствующих устойчивому движению звеньев поезда растягивающих усилий между трактором и прицепом при торможении двигателем целесообразно подключать ведущий мост прицепа. При этом для исключения ведущего момента на задних колесах трактора, возникающего за счет наличия кинематического несоответствия, необходимо увеличивать передаточное число трансмиссии или повышать момент сопротивления двигателя.

#### Л и т е р а т у р а

1. А. с. 718307 (СССР). Двухзвенное транспортное средство / Н.В.Богдан, В.П.Бойков, А.М.Расолько, Е.А.Романчик. - Оpubл. в Б. И., 1980, № 8.

УДК 629.113.012

А.М.Кривицкий (БПИ)

#### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ РАЦИОНАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИСПЫТАНИИ ШИН

Для обоснования и выбора оптимальных параметров шины, обеспечивающих ей и трактору требуемые эксплуатационные качества, необходимо знать зависимости выходных характеристик шины в виде функций от ряда эксплуатационных факторов (нагрузка, давление в шине и т. п.), а также зависимости между

самими параметрами с целью их дальнейшего использования на стадии проектирования трактора. Для решения этих задач возможны два подхода. Требуемые зависимости можно определить теоретически, при исследовании той или иной расчетной схемы, либо путем анализа опытных данных существующих моделей шин. Последний подход основывается в большинстве случаев на использовании корреляционного и регрессионного анализов [1].

Задача настоящей работы – найти и исследовать функциональные зависимости, характеризующие сопротивление шины боковому уводу.

Мерой указанной характеристики служит отношение боковой силы к углу увода, называемое, как известно, коэффициентом сопротивления боковому уводу. Однако необходимо иметь в виду [2], что, кроме этой основной характеристики, имеется еще ряд зависимых переменных (сопротивление движению, боковая сила, опрокидывающий и стабилизирующий моменты, нормальный прогиб шины, крутильная жесткость и др.), являющихся функциями большого числа независимых переменных (нормальной нагрузки на шину, крутящего (тормозного) момента, угла увода, угла развала, давления в шине и т. п.) и также оказывающих влияние на сопротивление шины уводу.

Этот комплекс функциональных зависимостей может быть выражен так:

$$P_y, M \text{ и др.} = f(p_w, G_k, \delta, \gamma, M \text{ и т. п.}).$$

Преимущество такого выражения заключается в возможности его преобразования с помощью записи в частных производных к виду, позволяющему раскрыть зависимости, знание которых представляет интерес. Применительно к указанной выше задаче записать в частных производных дает:

$$P_y = \frac{\partial P_y}{\partial p_w} p_w + \frac{\partial P_y}{\partial G_k} G_k + \frac{\partial P_y}{\partial \delta} \delta + \frac{\partial P_y}{\partial M} M, \quad (1)$$

где каждая частная производная определяет степень изменения зависимой переменной  $P_y$  от одной независимой переменной.

Чтобы выявить влияние каждого независимого параметра, ему нужно задать не менее четырех-пяти различных значений. Но для этого необходимо провести большое количество опытов. Так, например, для полного исследования зависимости (1) на асфальтобетоне в случае, когда независимые переменные принимают по пять различных значений, потребуется проделать  $5^4 = 625$  различных комбинаций экспериментов (не считая повторения каждого из опытов для получения устойчивых средних значений). Разумеется, выполнение такого эксперимента, тем более для боль-

шого числа шин и на различных опорных поверхностях, очень трудоемко.

Для наиболее рациональной схемы выбора опытных точек, при которых можно так спланировать сочетание различных факторов, чтобы при минимальном числе опытов наиболее равномерно охватить всю область возможных сочетаний влияющих факторов, нами была использована методика рационального планирования экспериментов [3], основанная на построении комбинационных квадратов с неповторяющимися сочетаниями по всем строкам и столбцам, по которой была составлена схема проведения опытов с целью определения зависимости боковой силы от основных влияющих факторов. В качестве независимых переменных были приняты: давление воздуха в шине, нормальная нагрузка колеса, угол увода.

Схема проведения эксперимента определялась для случая четырех независимых переменных, которые принимали по пять различных значений. Переход к трехфакторной схеме (принятый нами вариант) осуществлялся при условии, что один из факторов (например, взятый нами в качестве четвертого – крутящий момент колеса) принимает постоянное значение (в нашем случае  $M = 0$ ).

Способ построения комбинационного квадрата изложен в [3]. Полученный по указанной методике и затем трансформированный путем перетасовки столбцов и строк комбинационный квадрат представляет собой сокращенную схему для планирования опытов и представлен на рис. 1. При этом число опытов сокращается ( $5^3 = 125$  до 25). Каждому номеру опыта соответствует определенное сочетание независимых факторов, которое в дальнейшем не повторится. Так, например, клетке с № 10 соответствует опыт со следующими значениями независимых переменных:  $p_w = 0,27$  МПа,  $G_k = 5,5$  кН,  $\delta = 0,26$  рад.

В результате проведенного по схеме (рис. 1) эксперимента были получены значения боковой силы, которые записаны в соответствующие клетки указанной схемы. Полученные результаты обработаны двумя методами:

1) усреднением и пересчетом результатов для нахождения искомой зависимости вторичного фактора от всех первичных факторов по методике последующей обработки комбинационного квадрата [3];

2) по методике [4], согласно которой считалось, что характер функций  $P_y = f(p_w, G_k, \delta)$  известен – многочлен определенной степени, и задача сводилась к определению коэффициентов этого многочлена, т. е. к отысканию параметров уравнения регрессии.

В результате получены уравнения, связывающие боковую силу с выбранными независимыми переменными:

а) по первому методу обработки:  
для углов увода  $\delta \leq 0,1$  рад

| $G_k, \text{кН}$ | $\delta$ | 5,5     |         |         |         | 6,7     |         |         |         | 7,9     |         |         |         | 8,5     |         |         |         | 9,1     |         |         |         |  |
|------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--|
|                  |          | $0,002$ | $0,004$ | $0,007$ | $0,010$ | $0,002$ | $0,004$ | $0,007$ | $0,010$ | $0,002$ | $0,004$ | $0,007$ | $0,010$ | $0,002$ | $0,004$ | $0,007$ | $0,010$ | $0,002$ | $0,004$ | $0,007$ | $0,010$ |  |
| 0,27             | $M=0$    |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         | 10      |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
| 0,24             |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
| 0,20             |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
| 0,15             |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
| 0,10             |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |
|                  |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |  |

Рис. 1. Большой комбинационный квадрат.

$$P_y = \frac{\delta}{1,235 - 0,091\delta} [\lg(p_w G_k) - 1] \lg \frac{k G_k p_w}{3}, \quad (2)$$

где  $k = \frac{45}{\delta^2} + \frac{7,5}{\delta} + 3,5$ ;

для углов увода  $\delta > 0,1$  рад

$$P_y = \frac{\delta}{1,235 - 0,091\delta} [\lg(p_w G_k) - 1] \frac{k p_w G_k}{\delta},$$

где  $k = \frac{\delta^2}{5} - (\delta + 2)$ ;

б) по второму методу:

$$P_y = -1,43 + 1,6 p_w + 0,15 G_k + 35,5\delta - 55,5\delta^2. \quad (3)$$

Сравнение зависимостей, построенных по уравнениям (2), (3), с экспериментальными (рис. 2) показывает на их хорошее совпадение. Однако уравнение (3), полученное в результате обра-

ботки экспериментальных данных на ЭВМ, гораздо проще уравнения (2) и, кроме того, для его получения не требуется больших затрат ручного труда, громоздких построений и определенных навыков. В виде уравнения (3) можно представить зависимости и других выходных характеристик шины от влияющих факторов [4].

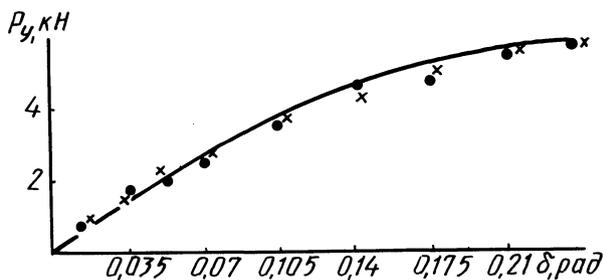


Рис. 2. Зависимость боковой силы от угла бокового увода шины 9,5/9-20 мод. ВФ-222, при  $p_w = 0,24$  МПа и  $G_k = 9,1$  кН; — эксперимент; • — по уравнению (2); x — по уравнению (3).

Таким образом, применение методики рационального планирования экспериментов, основанной на построении комбинационного квадрата, при исследовании шин позволяет довольно просто подготовить план проведения эксперимента и существенно сократить число опытов (в общем случае в  $n^2$  раз). Эту же схему можно использовать и для исследования других агрегатов трактора и автомобиля в лабораторно-дорожных условиях. Использование же для обработки результатов сокращенного эксперимента методов регрессионно-корреляционного анализа позволяет получать удобные для практического использования эмпирические зависимости при любом числе независимых переменных и их комбинаций без значительного снижения точности получаемых при этом функциональных зависимостей.

### Л и т е р а т у р а

1. Статистическое исследование зависимостей между жесткостными параметрами шины / В.И.Кнороз, А.И.Блохина, А.Е.Межов, А.С.Шелухин. — Автомобильная промышленность, 1978, № 7, с. 18-19.
2. Управляемость и устойчивость автомобиля: Сб. ст./Пер. с англ. под ред. А.С.Литвинова. — М., 1963. — 268 с.
2. Протогьяконов М.М., Тедер Р.П. Методика рационального планирования экспериментов. — М., 1970, с. 76.
4. Бойков В.П., Кривицкий А.М. Аппроксимация экс-

периментальных зависимостей параметров деформации тракторных шин. - В сб.: Автотракторостроение: Автоматизированные системы управления мобильными машинами. Минск, 1980, вып. 14, с. 74-76.

УДК 629.114.2

А.Б.Бруек (БПИ)

## УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА 4 x 4 СО ВСЕМИ УПРАВЛЯЕМЫМИ КОЛЕСАМИ

По мере повышения скоростей движения трактора и роста объема перевозок сельскохозяйственных грузов тракторными поездами очень важно обеспечить безопасность движения, вследствие чего первоочередной задачей является улучшение устойчивости тракторов и тракторных поездов. При этом первостепенную роль играет устойчивость движения при выполнении сельскохозяйственных работ, особенно при междурядной обработке, севе.

Рассмотрим движение трактора, который под действием внешних возмущений отклонился в боковом направлении на расстояние  $y_{CH}$ , а его продольная ось повернулась на угол  $\beta$  (рис. 1). Чтобы вернуть трактор на заданную траекторию, водитель поворачивает управляемые колеса на углы  $\alpha_i$ . Повороту трактора препятствует момент сопротивления  $M_c$ .

Так как нас интересует боковое и курсовое отклонения трактора под действием внешних сил от заданного направления движения, то за обобщенные координаты примем  $y_{CH}$  и  $\beta$ . Углы увода ведущих мостов выразим через обобщенные скорости [1, 2]. Уравнения движения трактора при малых отклонениях имеют следующий вид:

$$m\ddot{y}_{CH} + (K_{y1} + K_{y2})\frac{\dot{y}_{CH}}{v} - (K_{y1}l_1 + K_{y2}l_2)\frac{\dot{\beta}}{v} - (P_{k1} + P_{k2} - P_f - P_{kp} + K_{y1} + K_{y2})\beta = A;$$

$$(K_{y2}l_2 - K_{y1}l_1)\dot{y}_{CH} + I\ddot{\beta} + (K_{y2}l_2^2 - K_{y1}l_1^2)\frac{\dot{\beta}}{v} + (K_{y1}l_1 - K_{y2}l_2)\beta = B, \quad (1)$$

$$\text{где } A = (P_{k1} - P_{f1})\alpha_1 - (P_{k2} - P_{f2})\alpha_2 + P_{kp}\gamma + K_{y1}\alpha_1 + K_{y2}\alpha_2; \\ B = (P_{k1} - P_{f1})l_1\alpha_1 - (P_{k2} - P_{f2})l_2\alpha_2 + K_{y1}l_1\alpha_1 + K_{y2}l_2\alpha_2.$$