

УДК 629.423:620.179.14

Б. М. ГОРКУНОВ, Г. В. КРИВЯКИН, Е. С. АФАНАСЬЕВА

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА НАГРУЗОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ НАКЛОНА КУЗОВА

Разработан измерительный комплекс для определения нагрузочной характеристики масштабной физической модели системы наклона кузова вагона на базе вихретокового метода бесконтактного контроля механически-деформированного состояния цилиндрических изделий ферромагнитных материалов. Проведен сравнительный анализ экспериментальной нагрузочной характеристики механизма наклона и расчетной нагрузочной характеристики, полученной путем математического моделирования.

**Ключевые слова:** масштабная физическая модель, нагрузочная характеристика, система наклона кузова, измерительный комплекс, вихретоковый преобразователь, идентификация.

**Введение.** Важной задачей при исследовании процессов в сложных механических системах является идентификация математических моделей, описывающих эти процессы. Одним из наиболее достоверных методов идентификации математических моделей механических систем является исследование свойств реальной системы в процессе натурных испытаний. Но в ряде случаев проведение таких испытаний является затруднительным, так как требует, по сути, изготовления полноразмерного образца исследуемого изделия. Более целесообразно в таком случае использовать масштабную физическую модель исследуемой системы. Этот подход заключается в решении математической модели с использованием параметров масштабной физической модели и последующем сравнении полученных результатов с результатами физического моделирования.

Для идентификации разработанной нами математической модели расчета нагрузочной характеристики была создана масштабная физическая модель механической части системы принудительного наклона кузова. Эта модель в составе измерительного комплекса позволяет получить значения усилий, необходимых для поворота масштабной наклоняемой балки на заданный угол, то есть экспериментальную нагрузочную характеристику.

**Физическая модель.** Созданная нами физическая модель механической части системы наклона кузова представляет собой копию реальной системы в масштабе 1:4. Её схема представлена на рис. 1.

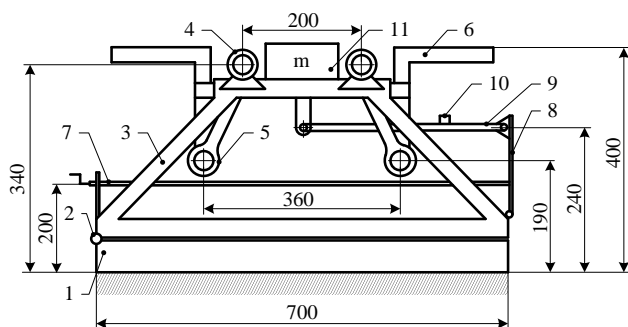


Рис. 1 – Схема масштабной физической модели механизма наклона

Модель состоит из базовой рамы 1, на которой с помощью шарнира 2 закреплена промежуточная рама 3, имитирующая раму тележки вагона. Это дает возможность промежуточной раме 3 поворачиваться относительно базовой рамы 1 на определенный угол, имитируя, таким образом, возвышение наружного рельса в кривых. К промежуточной раме 3 с помощью подшипниковых узлов 4 и рычагов подвеса 5 присоединена наклоняемая балка 6. Поворот наклоняемой балки 6 относительно промежуточной балки 3 осуществляется при помощи винтовой пары 7 и качающегося кронштейна 8, усилие от которого передается к наклоняемой балке 6 при помощи шарнирной тяги 9. На шарнирной тяге 9 установлен датчик преобразователя усилий 10. На наклоняемой балке 6 расположен груз 11 массой  $m$ , имитирующий вес надрессорного строения. Таким образом, усилие, приложенное к шарнирной тяге 9 для поворота наклоняемой балки 6 на заданный угол, и будет являться искомым усилием для построения экспериментальной нагрузочной характеристики.

**Измерительный комплекс.** Для определения усилия в шарнирной тяге описанной выше модели нами предложен измерительный комплекс, реализующий вихретоковый метод бесконтактного контроля электромагнитных и геометрических параметров изделий ферромагнитных материалов [1]. Достоинства этого метода обусловлены его хорошей защищенностью от помех и влияния условий среды измерения, наличием электрического выходного сигнала, что позволяет существенно упростить процесс обработки получаемых данных и удовлетворительной погрешностью измерения (2-3%). Кроме того такой метод дает возможность реализовать на базе измерительной схемы замкнутую систему управления, которая в дальнейшем может быть использована на реальном объекте.

Принципиальная электрическая схема измерительного комплекса на базе вихретокового преобразователя (ВТП) приведена на рис. 2 [2]. Измерительный комплекс состоит из рабочего трансформаторного преобразователя 1 с исследуемым образцом 3, и идентичного ему вспомогательного трансформаторного преобразователя 2, первичные (намагничивающие) обмотки, которых содержат равное количество витков  $W_{\text{нам}1} = W_{\text{нам}2}$ . Эти обмотки

последовательно соединены и подключены к генератору синусоидального тока 4. Вторичные (измерительные) обмотки трансформаторов имеют также равное количество витков  $W_{изм1}=W_{изм2}$ . Выходными сигналами ВТП являются суммарное  $U_{\Sigma}$  и разностное (вносимое)  $U_{вн}$  напряжения при условии постоянства напряженности и частоты зондирующего поля. Эти параметры фиксируются вольтметром 5.

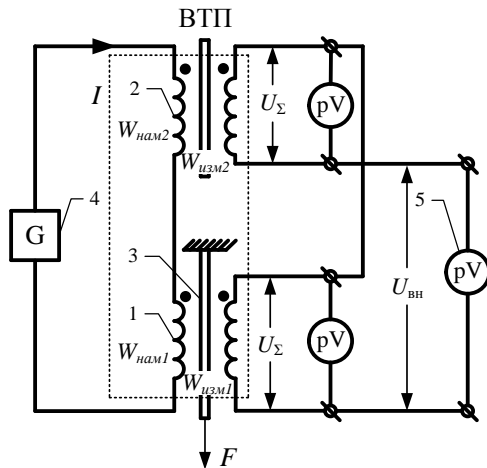


Рис. 2 – Электрическая схема измерительного комплекса

Суть предлагаемого метода измерений состоит в том, что сначала, в отсутствие механической нагрузки на тяге (образце) устанавливается значение частоты поля  $f_n$ , соответствующее рациональному с точки зрения чувствительности и точности преобразователя режиму работы ВТП. При этом фиксируется значение  $U$  выходного сигнала ВТП. Затем, при каждом фиксированном положении механически нагруженного образца изменяется значение частоты поля до тех пор, пока амплитуда выходного сигнала ВТП станет равной прежней  $U$  при отсутствии механического напряжения на образце.

Поскольку относительная магнитная проницаемость  $\mu_r$  и удельная электрическая проводимость  $\sigma$  у ферромагнитных материалов зависят кроме структуры самого материала и от механического воздействия на него [3], то амплитуда ЭДС при синусоидальном токе в рабочем трансформаторном преобразователе будет зависеть от изменения механических напряжений в тяге (образце). При этом формула для определения механического напряжения  $\sigma_m$  в образце в пределах закона упругости имеет вид [4]:

$$\sigma_m = \pm k_a \left( \frac{x(U)}{x_0(U)} - 1 \right),$$

где «+» и «-» – соответствуют растяжению и сжатию тяги соответственно;

$k_a$  – размерный коэффициент;

$x(U)$  – зависимость обобщенного параметра  $x$  от  $U$  при нагруженной тяге;

$x_0(U)$  – та же функция, при отсутствии нагрузки.

Обобщенный параметр  $x$  объединяет в себе геометрические, магнитные и электрические характеристики изделия [2]. В случае

цилиндрического образца параметр  $x$  определяется из выражения:

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\mu_0 \mu_r \sigma \omega},$$

где  $d$  – диаметр тяги, м;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная, Гн/м;

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала изделия;

$\sigma$  – удельная электрическая проводимость изделия, См/м;

$\omega = 2\pi f$  – циклическая частота поля;

$f$  – частота поля, Гц.

Для определения размерного коэффициента  $k_a$  нами была проведена тарировка измерительной схемы с контрольным образцом тяги. Тарировка проводилась путем приложения к тяге вертикальных нагрузок с известными величинами и замером соответствующих значений электрических напряжений в измерительной обмотке. Как следует из определения амплитудного метода, изменение напряжения в измерительной обмотке пропорционально изменению механических напряжений в контрольном образце, что и дает нам возможность рассчитать нужное значение коэффициента  $k_a$ .

Тарировка измерительной схемы проводилась при различных значениях частоты зондирующего поля. Результаты тарировки сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты тарировки измерительной схемы

$m$ , кг	$f=500$ Гц			$f=900$ Гц			$f=1400$ Гц				
	$U$ , мВ	$\sigma_m$ , МПа	$k_a$ , МПа	$U$ , мВ	$\sigma_m$ , МПа	$k_a$ , МПа	$U$ , мВ	$\sigma_m$ , МПа	$k_a$ , МПа		
0	2,2	0	0	0	3,25	0	0	3	0	0	
20	4,9	27,74	22,55	20	3,9	27,74	138,7	20	5,8	27,74	215,12
31	6	43	24,86	31	4,8	43	93,5	31	8	43	187,15
42	6,9	58,25	27,22	42	5,8	58,25	74,68	42	9,8	58,25	185

Анализируя данные табл. 1, приходим к выводу, что наиболее стабильные значения размерный коэффициент  $k_a$  имеет при частоте зондирующего поля 1400 Гц, а его максимальное значение при этом составляет 215,12 МПа, что и дает нам возможность использовать эту величину коэффициента для дальнейших расчетов.

**Результаты измерений и их анализ.** Измерения по определению механического напряжения, возникающего в цилиндрическом стальном образце, проводились для двух значений тока 100 и 250 мА в намагничивающей обмотке трансформаторного преобразователя. Частоты зондирующего поля при этом составляли 180, 400, 1000 и 1400 Гц.

Результаты измерений сведены в табл. 2 и 3.

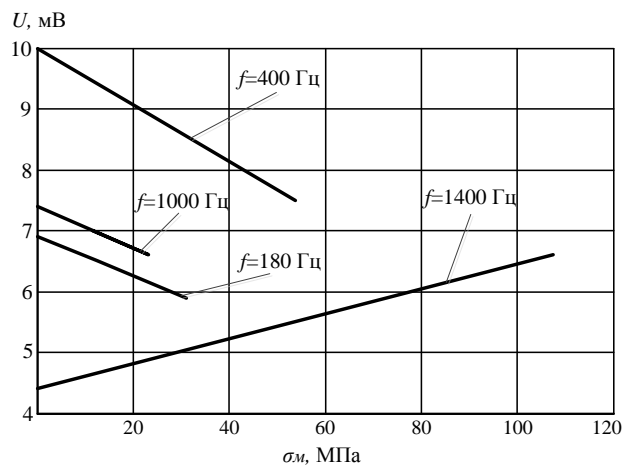
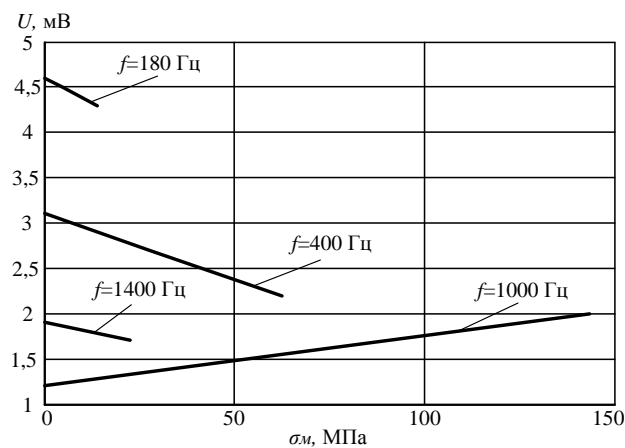
Таблица 2 – Результаты измерений при намагничивающем токе  $I=250$  мА

	$f=180$ Гц		$f=400$ Гц		$f=1000$ Гц		$f=1400$ Гц				
	$\theta_s$ , °	$U$ , мВ	$\sigma_m$ , МПа	$F_H$ , Н	$\theta_s$ , °	$U$ , мВ	$\sigma_m$ , МПа	$F_H$ , Н			
$\theta_s$ , °	0	4	8	0	4	8	0	4	8		
$U$ , мВ	6,9	6,5	5,9	10	8,9	7,5	7,4	6,6	7	4,4	6,6
$\sigma_m$ , МПа	0	12,47	31,18	0	23,66	53,78	0	23,26	11,63	0	107,56
$F_H$ , Н	0	88,1	220	0	167,18	379,9	0	164,3	82,15	0	759,9

Таблица 3 – Результаты измерений при намагничивающем токе  $I=100$  мА

	$f=180$ Гц			$f=400$ Гц			$f=1000$ Гц			$f=1400$ Гц			
	$\theta, ^\circ$	0	4	8	0	4	8	0	4	8	0	4	8
$U, \text{ мВ}$	0	4,6	4,5	4,3	3,1	2,7	2,2	1,2	1,4	2	1,9	1,7	1,9
$\sigma_m, \text{ МПа}$	0	4,67	14,03	0	27,75	62,45	0	35,85	143,4	0	22,6	0	
$F_H, \text{ Н}$	0	33	99,12	0	196,15	441,24	0	253,3	1013	0	159,9	0	

На рис. 3 и 4 приведены семейства зависимостей  $U=f(\sigma_m)$ , построенные по данным табл. 2 и 3, которые, по сути, являются градуировочными кривыми.

Рис. 3 – Семейство зависимостей  $U=f(\sigma_m)$  при намагничивающем токе  $I=250$  мАРис. 4 – Семейство зависимостей  $U=f(\sigma_m)$  при намагничивающем токе  $I=100$  мА

Как видно из рис. 3 и 4 наибольшей чувствительностью (с наибольшими значениями напряжений) обладает зависимость  $U=f(\sigma_m)$  при намагничивающем токе 250 мА и частотой зондирующего поля 400 Гц. Следовательно, она и будет являться рабочей для построения искомой нагрузочной характеристики  $F_H=f(\theta)$ .

Сила, действующая на шарнирную тягу,  $F_H$  определяется из выражения:

$$F_H = \sigma_m \cdot S,$$

где  $S = \pi d^2 / 4$  – площадь сечения тяги,  $\text{м}^2$ .

Искомые значения силы  $F_H$ , рассчитанные по этой формуле, также приведены в табл. 2 и 3.

Полученная на основании проведенного эксперимента нагрузочная характеристика физической модели приведена на рис. 5.

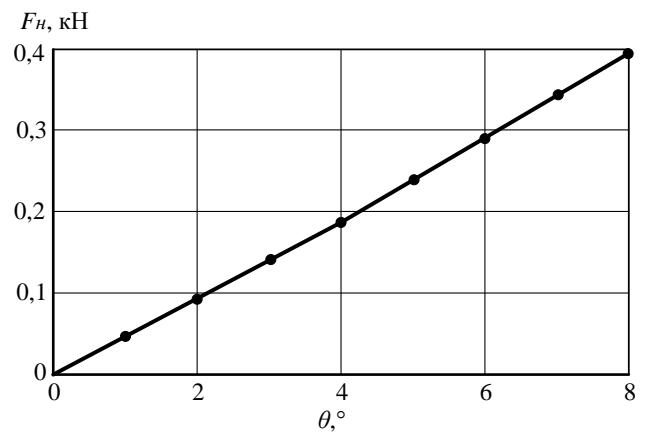


Рис. 5 – Экспериментальная нагрузочная характеристика механизма наклона

Как видно на рис. 5, полученная экспериментальная нагрузочная характеристика имеет практически линейную зависимость приложенной к шарнирной тяге усилия от угла наклона балки. Максимальное значение усилия составило 0,38 кН.

Используя ранее созданную математическую модель для расчета нагрузочной характеристики механизма наклона кузова [5], определяем расчетную нагрузочную характеристику для параметров масштабной физической модели.

На рис. 6 расчетная нагрузочная характеристика масштабной модели приведена совместно с её нагрузочной характеристикой, полученной в ходе эксперимента.

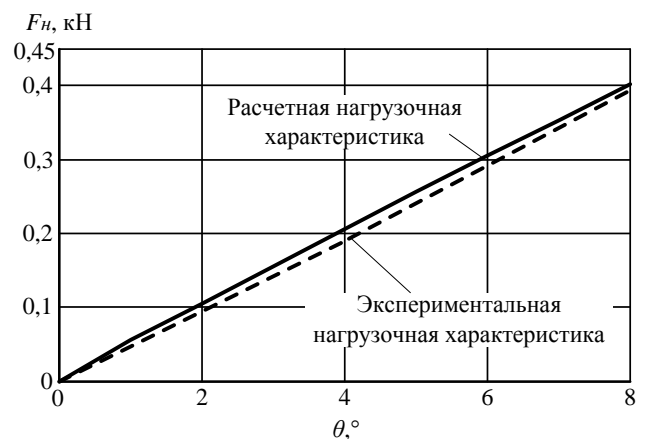


Рис. 6 – Расчетная и экспериментальная нагрузочные характеристики масштабной модели механизма наклона

Здесь видно, что характеристики имеют достаточно хорошее соответствие: расхождение между максимумами усилий составило 0,2 кН (4%), что вполне подтверждает адекватность ранее разработанной математической модели для расчета нагрузочной характеристики механизма наклона кузова.

**Выводы.** Для проверки адекватности математической модели расчета усилий в системе наклона кузова создана физическая модель механической части системы в геометрическом масштабе 1:4.

Предложен бесконтактный вихретоковый метод, а также разработан измерительный комплекс для его реализации в целях определения усилий наклона кузова.

Сравнение экспериментальных (максимальное усилие 0,38 кН) и расчетных (максимальное усилие 0,4 кН) данных показало хорошее соответствие – погрешность в пределах 4%, что подтверждает адекватность разработанной математической модели.

Предложенный метод и апробированный инструментарий может быть реализован в автоматизированной замкнутой системе управления привода наклона кузова.

**Список литературы:** 1. Бондаренко В.И. Бесконтактное измерение электромагнитных характеристик цилиндрических изделий / В.И. Бондаренко, Б.М. Горкунов, В.П. Себко, В.И. Тюна // Измерительная техника. – 1984. - №6. – С. 57-58. 2. Горкунов Б.М. Вихретоковый преобразователь для бесконтактного контроля механических напряжений в цилиндрических изделиях / Б.М. Горкунов //Технічна електродинаміка. Тематичний випуск, Київ, Ч.3. – 2004. – С. 25-30. 3. Горкунов Б.М. Электромагнитный преобразователь для контроля напряженно-деформированного состояния узлов оборудования

электропривода / Б.М. Горкунов, А.В. Кипенский, С.Г. Львов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Випуск 3(19). – 2012. – С. 182-185. 4. Горкунов Б. М. Сравнительный анализ метрологических характеристик амплитудно-фазовых методов вихретокового контроля ферромагнитных материалов / Б.М. Горкунов // Електротехніка і електромеханіка. – Харків. – 2007. - №5. – С. 37-41. 5. Редченко Е.С. (Афанасьева Е.С.) Совершенствование кинематической схемы и линейного двигателя электропривода для системы наклона кузовов скоростных поездов: Дисс. канд. техн. наук. – Харьков, 2014. – 173 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bondarenko V.I. Beskontaktnoe izmerenie elektromagnitnykh harakteristik tsilindricheskikh izdeliy / V.I. Bondarenko, B.M. Gorkunov, V.P. Sebko, V.I. Tyuna // Izmeritelnaya tehnika. – 1984. – No6. – P. 57–58. 2. Gorkunov B.M. Vihretokovyyi preobrazovatel dlya beskontaktnogo kontrolya mehanicheskikh napryazheniy v tsilindricheskikh izdeliyah / B.M. Gorkunov //Технічна електродинаміка. Тематичний випуск, Київ, Ч.3. – 2004. – P. 25-30. 3. Gorkunov B.M. Elektromagnitnyy preobrazovatel dlya kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uzlov oborudovaniya elektroprivoda / B.M. Gorkunov, A.V. Kipenskiy, S.G. Lvov // Elektromehanіchnі і енергозберігаючі системи. No 3(19). – 2012. – P. 182–185. 4. Gorkunov B. M. Sravnitelnyy analiz metrologicheskikh harakteristik amplitudno-fazovykh metodov vihretokovogo kontrolya ferromagnitnykh materialov / B.M. Gorkunov // Elektrotehnіka і електромеханіка. – Kharkiv. – 2007. – No5. – P. 37–41. 5. Redchenko E. S. (Afanaseva E.S.) Sovershenstvovanie kinematicheskoy shemy i lineynogo dvigatelya elektroprivoda dlya sistemyi naklona kuzovov skorostnykh poezdov: Diss. kand. tehn. nauk. – Kharkov, 2014. 173 p.

Поступила (received) 25.08.2015

**Горкунов Борис Митрофанович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры приборов и методов неразрушающего контроля, тел.: (050) 281-38-79; e-mail: [gorkunov@kpi.kharkov.ua](mailto:gorkunov@kpi.kharkov.ua).

**Gorkunov Boris Mitrofanovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of devices and methods of non-destructive control; тел.: (050) 281-38-79; e-mail: [gorkunov@kpi.kharkov.ua](mailto:gorkunov@kpi.kharkov.ua).

**Кривякин Геннадий Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрического транспорта и тепловозостроения; тел.: (050) 501-24-60; e-mail: [vehicle\\_dynamic@ukr.net](mailto:vehicle_dynamic@ukr.net).

**Krivjakin Gennady Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of electrical transport and locomotive bilding; тел.: (050) 501-24-60; e-mail: [vehicle\\_dynamic@ukr.net](mailto:vehicle_dynamic@ukr.net).

**Афанасьева Елена Сергеевна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры электрического транспорта и тепловозостроения; тел.: (095) 120-46-88; e-mail: [redchenko.elena@mail.ru](mailto:redchenko.elena@mail.ru).

**Afanasjeva Elena Serhejevna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer at the Department of electrical transport and locomotive bilding; тел.: (095) 120-46-88; e-mail: [redchenko.elena@mail.ru](mailto:redchenko.elena@mail.ru).

[Введите текст]

[Введите текст]