

# ВЕСТНИК

*Белорусско-Российского университета*

*Научно-методический журнал  
Издается с октября 2001 г.*

*Периодичность – 4 раза в год*

2(71) 2021

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<b>ДОВГАЛЕВ А. М., ТАРАДЕЙКО И. А.</b> Прогрессивная конструкция инструмента для совмещенного магнитно-динамического накатывания .....	4
<b>ПРУДНИКОВ А. П., БОДУНОВА А. Д.</b> Скорости скольжения в зацеплении планетарной торовой винтовой передачи .....	12
<b>ТАРАСИК В. П., ПУЗАНОВА О. В.</b> Управление фрикционными гидромеханической передачи .....	20
<b>ШЕЛЕГ В. К., ДОВГАЛЕВ А. М., ТАРАДЕЙКО И. А.</b> Повышение точности обработки нежестких ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием .....	31

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<b>КОВАЛЬ А. С., КОНДРАТЕНКО А. Г.</b> Модель безредукторного электропривода лифта на базе низкоскоростного асинхронного двигателя с регулированием потока.....	42
<b>КОВАЛЬЧУК В. М.</b> Оценка электромагнитной совместимости по дозе фликера .....	50

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

**БОРИСОВ В. И., НИКИТИН А. С., ПРОКОПЕНКО Е. Н.,  
СЕРГЕЕВ С. С.** Акустическое поле излучения пьезопреобразова-  
теля в виде двухмерной прямоугольной фазированной решетки ..... 58

**ТАРАСЕНКО О. В., КРЕСЕЛЮК Ю. В., ИВЖЕНКО А. А.**  
Прибор для контроля микротвердости и толщины виброупрочнен-  
ного слоя ферромагнитного изделия ..... 68

- *Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам*
- *Публикуемые материалы рецензируются*
- *Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014  
для предприятий и организаций – 000142*

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING

<b>DOVGALEV A. M., TARADEIKO I. A.</b> Breakthrough tool design for combined magnetodynamic rolling .....	4
<b>PRUDNIKOV A. P., BODUNOVA A. D.</b> Sliding speeds in planetary torus helical transmission .....	12
<b>TARASIK V. P., PUZANOVA O. V.</b> Friction clutch control in hydromechanical transmission .....	20
<b>SHELEG V. K., DOVGALEV A. M., TARADEIKO I. A.</b> Increasing the accuracy of non-rigid ferromagnetic parts processing by using combined magnetodynamic rolling .....	31

### ELECTRICAL ENGINEERING

<b>KOVAL A. S., KONDRATENKO A. G.</b> Model of gearless electric drive for elevators based on a low-speed induction motor with flow regulation .....	42
<b>KOVALCHUK V. M.</b> Estimation of electromagnetic compatibility by the dose of flicker.....	50

### INSTRUMENT MAKING

<b>BORISOV V. I., NIKITIN A. S., PROKOPENKO E. N., SERGEEV S. S.</b> Acoustic radiation field of a piezoelectric transducer in the form of a two-dimensional rectangular phased array .....	58
<b>TARASENKO O. V., KRESELYUK YU. V., IVZHENKO A. A.</b> Device for controlling microhardness and thickness of a vibration-hardened layer of a ferromagnetic product .....	68

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621:787

*А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко*

### ПРОГРЕССИВНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ СОВМЕЩЕННОГО МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО НАКАТЫВАНИЯ

UDC621:787

*A. M. Dovgalev, I. A. Taradeiko*

### BREAKTHROUGH TOOL DESIGN FOR COMBINED MAGNETODYNAMIC ROLLING

#### **Аннотация**

В статье приведены сведения о новом инструменте для совмещенного магнитно-динамического накатывания, снабженном демпфирующим кольцом и накопителем смазочного материала. Приведены результаты исследований повышения стойкости деформирующих шаров предложенного инструмента и снижения шумовых характеристик процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания.

#### **Ключевые слова:**

деформирующие шары, накатывание, магнитопровод, цилиндрический постоянный магнит, магнитная система, износ и стойкость сферической поверхности шаров, шероховатость поверхности, уровень шума, уровень звукового давления, уровень звука.

#### **Abstract**

The article presents information on a new tool provided with a damping ring and a lubricant accumulator to be used in combined magnetodynamic rolling. The results of studies on increasing the durability of deforming balls of the tool proposed and reducing noise characteristics of the process of combined magnetodynamic rolling are presented.

#### **Keywords:**

deforming balls, rolling, magnetic circuit, cylindrical permanent magnet, magnetic system, wear and durability of the spherical surface of balls, surface roughness, noise level, sound pressure level, sound level.

#### **Введение**

Для повышения долговечности деталей машин достаточно широкое применение находят статические и динамические методы поверхностного пластического деформирования [1–4].

В последние годы возрос интерес к разработке методов поверхностного пластического деформирования, при реализации которых осуществляют комплексное энергетическое воздействие на поверхностный слой упрочняемой

детали [5–7]. К их числу относится метод совмещенного магнитно-динамического накатывания, при котором на поверхностный слой ферромагнитной детали одновременно воздействуют вращающимся магнитным полем и колеблющимися деформирующими шарами, осуществляющими импульсно-ударное деформирование [8–10].

Предложенный метод совмещенного магнитно-динамического накатывания (СМДН) позволяет получить на поверхности ферромагнитных деталей

антифрикционный наноструктурированный поверхностный слой, обладающий новыми физико-механическими характеристиками и высокими эксплуатационными свойствами [11, 12].

Важной характеристикой процесса СМДН является долговечность применяемого комбинированного инструмента, определяющая производительность, точностные и качественные характеристики обработки.

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время отсутствуют сведения о стойкости деформирующих шаров комбинированных инструментов, осуществляющих процесс СМДН.

В связи с этим проведение исследований стойкости элементов комбинированного инструмента представляется важной и своевременной технологической задачей. Например, сведения о стойкости деформирующих шаров инструмента позволяют осуществлять их своевременную замену и обеспечивать требуемые качественные характеристики и микрорельеф упрочняемой поверхности ферромагнитных деталей.

Проведенные исследования процесса СМДН показали, что долговечность комбинированного инструмента определяется в первую очередь стойкостью деформирующих шаров, а также величиной износа торцовых поверхностей элементов, образующих кольцевую камеру [13].

При осуществлении процесса СМДН деформирующие шары находятся в магнитном поле и осуществляют вращение вокруг продольной оси инструмента, вращение вокруг собственных осей, радиальные колебательные движения в плоскости их расположения. При этом деформирующие шары периодически взаимодействуют с упрочняемой поверхностью ферромагнитной детали и наружной поверхностью оправки (или магнитной системы), а также контактируют с торцами элементов, образующих кольцевую камеру. Возникающие в зонах перио-

дического контакта деформирующих шаров с поверхностью детали и элементами инструмента силы трения, силовые и температурные воздействия, вызванные высокой скоростью деформирования микронеровностей упрочняемого металла, определяют износ их сферических рабочих поверхностей.

Износ деформирующих шаров комбинированного инструмента приводит к увеличению шероховатости и появлению погрешности геометрической формы их сферической поверхности. Увеличение шероховатости деформирующих шаров инструмента в процессе износа приводит, в свою очередь, к росту высоты микронеровностей упрочняемой поверхности детали, а следовательно, и к снижению качественных характеристик обработки.

Исследования процесса СМДН позволили установить, что интенсивный износ деформирующих шаров наблюдается в начальный момент работы (в момент пуска) инструмента, когда скорость относительного проскальзывания деформирующих шаров по торцовой поверхности элементов кольцевой камеры максимальна, а смазка в зоне их контакта отсутствует.

### ***Усовершенствованная конструкция комбинированного инструмента***

Выявленные особенности износа деформирующих шаров позволили разработать усовершенствованную конструкцию комбинированного инструмента, обеспечивающего повышение их стойкости и снижение уровня шума в процессе СМДН (рис. 1).

Комбинированный инструмент, наряду с оправкой 1, деформирующими шарами 2, кольцевой камерой 3, двумя магнитными системами, первая из которых содержит кольцевые магнитопроводы 4, 5, аксиально установленные цилиндрические постоянные магниты 6, 7 (предназначена для намагничивания ферромагнитной детали), вторая вклю-

чает зубчатый магнитопровод 8, аксиально установленные цилиндрические постоянные магниты 9, 10 (предназначена для сообщения деформирующим шарам 2 колебательных движений), снабжен демпфирующим кольцом 11 и накопителем жидкого смазочного

материала в виде фетрового кольца 12.

Демпфирующее кольцо 11 выполнено из пружинного материала, установлено на кольцевых бутиках 13, 14 с зазором и имеет возможность самоустановки в радиальном направлении [14].

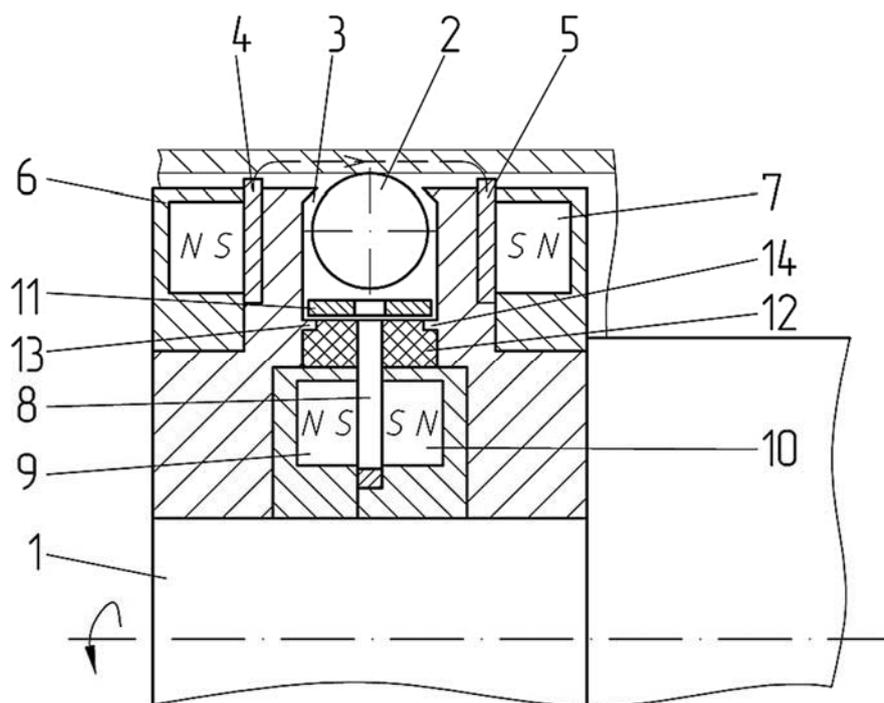


Рис. 1. Конструкция комбинированного инструмента для СМДН с демпфирующим кольцом и накопителем смазочного материала: 1 – оправка; 2 – ферромагнитные деформирующие шары; 3 – кольцевая камера; 4, 5 – кольцевые магнитопроводы; 6, 7, 9, 10 – цилиндрические постоянные магниты; 8 – зубчатый магнитопровод; 11 – демпфирующее кольцо; 12, 13 – кольцевые буртики; 14 – фетровое кольцо

В процессе СМДН деформирующее кольцо 11 самоустанавливается и исключает жесткое силовое взаимодействие деформирующих шаров 2 с магнитной системой инструмента. Одновременно накопитель жидкого смазочного материала в виде фетрового кольца 12 удерживает смазку, подаваемую в зону обработки, и обеспечивает непрерывное смазывание деформирующих шаров (в том числе в начальный момент работы инструмента). В результате повышается стойкость деформирующих шаров 2 инструмента и существенно снижается уровень шума в зоне обработки.

### **Исследование стойкости деформирующих шаров**

Отделочно-упрочняющую обработку СМДН кольцевых заготовок и контрольных деталей осуществляли на вертикально-фрезерном станке мод. ВФ 130.

Материал кольцевых заготовок для изнашивания деформирующих шаров – сталь 45 (30...35 HRC). Материал контрольных деталей – сталь 45 (190...200 НВ). Отверстие кольцевых заготовок для изнашивания деформирующих шаров и контрольных деталей предварительно растачивали в размер  $\varnothing 110\text{H}8$  мм. Шеро-

ховатость поверхности контрольных деталей после растачивания по параметру  $R_a$  составляла 3,0...3,2 мкм.

Параметры усовершенствованного комбинированного инструмента: диаметр деформирующих шаров – 12 мм; материал деформирующих шаров – ШХ 15 (62...65 HRC); материал цилиндрических постоянных магнитов – Nd Fe B; размер применяемых цилиндрических магнитов ( $D \times h$ ) – 15 × 5 мм; количество магнитов, осуществляющих воздействие на деформирующие шары – 22 шт.; количество цилиндрических постоянных магнитов, осуществляющих намагничивание поверхностного слоя упрочняемых нежестких стальных колец – 32 шт.; материал магнитопроводов – сталь Ст 3; толщина демпфирующего кольца – 2 мм; материал демпфирующего кольца – сталь 65Г. Исходная шероховатость сферической поверхности деформирующих шаров комбинированного инструмента  $R_a = 0,1$  мкм.

Режимы процесса СМДН: частота вращения инструмента – 2240 мин<sup>-1</sup>; подача – 80 мм/мин; индукция магнитного поля, действующего на поверхность кольцевых ферромагнитных заготовок,  $B = 0,130$  Тл; радиальный зазор между деформирующими шарами и демпфирующим кольцом инструмента – 3,0 мм; охлаждение – масло индустриальное.

Износ деформирующих шаров оценивали в ходе осуществления процесса СМДН внутренней цилиндрической поверхности упомянутых заготовок. Комбинированному инструменту сообщали вращение и возвратно-поступательное движение (вниз-вверх относительно кольцевой заготовки).

Процесс СМДН останавливали через каждые 10 мин работы инструмента, что исключало нагрев заготовки и магнитной системы более 60 °С. Через каждые 5 ч работы деформирующих шаров комбинированного инструмента производили отделочно-упрочняющую обработку контрольной детали с измерением

шероховатости ее поверхности. Одновременно измеряли шероховатость поверхности деформирующих шаров на профилометре-профилографе «Mitutoyo» мод. SJ-210 (Япония).

Износ деформирующих шаров инструмента, выражающийся в увеличении шероховатости их сферической поверхности, приводил к увеличению шероховатости поверхности обрабатываемых заготовок. Согласно рекомендациям, за критерий износа деформирующих шаров принимали максимально допустимое увеличение шероховатости их сферической поверхности, при которой шероховатость обрабатываемой заготовки не выходит за пределы рассматриваемого класса шероховатости, заданного чертежом [15].

Анализ результатов экспериментальных исследований, представленных на рис. 2 и 3, показывает, что стойкость деформирующих шаров зависит от твердости упрочняемых заготовок. При СМДН заготовок из стали 45 ГОСТ 1050–88 (130...200 НВ) период стойкости деформирующих шаров составил 77,2 ч, а при СМДН заготовок из стали 45 (30...35 HRC) – 52,4 ч.

Предельная шероховатость сферической поверхности деформирующих шаров при упрочнении СМДН контрольных деталей из стали 45 (190...200 НВ) составила 0,48 мкм, а при обработке контрольных деталей из стали 45 (30...35 HRC) –  $R_a = 0,42$  мкм.

Изношенные деформирующие шары комбинированного инструмента с шероховатостью сферической поверхности по параметру  $R_a$  более 0,42 мкм (при обработке стальных заготовок твердостью 30...35 HRC) и более 0,48 мкм (при обработке стальных заготовок твердостью 190...200 НВ) подлежат замене на новые или требуют восстановления (снижения шероховатости сферической поверхности известными технологиями отделочной обработки).

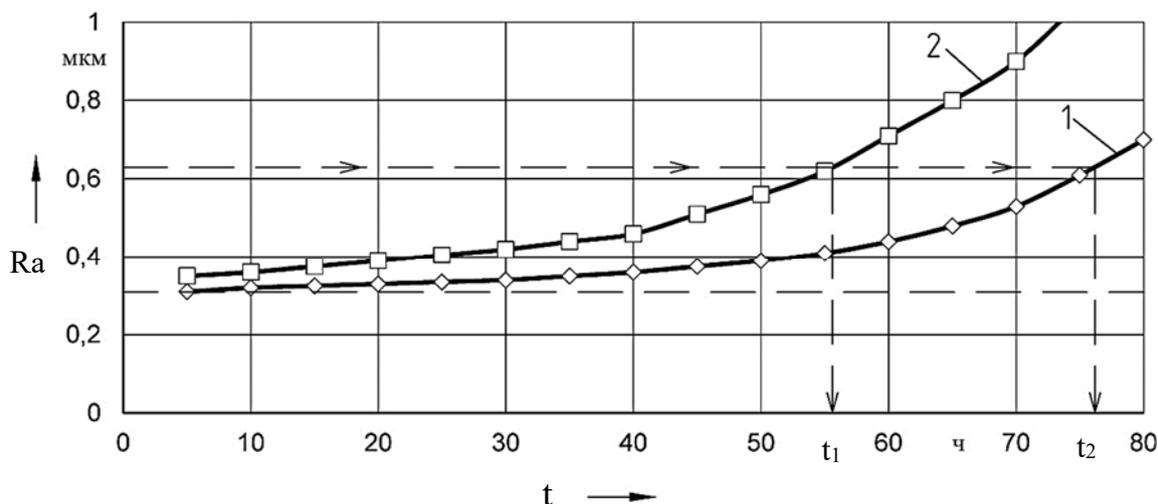


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности контрольных деталей от времени работы инструмента: 1 – при обработке деталей из стали 45 (190...200 НВ); 2 – при обработке деталей из стали 45 (30...35 HRC)

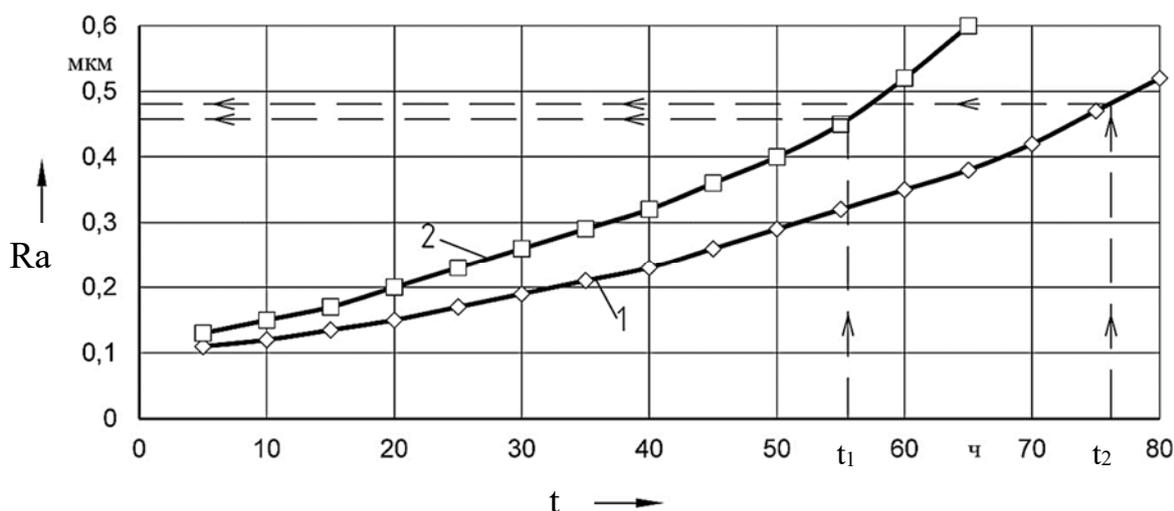


Рис. 3. Зависимость шероховатости сферической поверхности шаров от времени работы инструмента: 1 – при обработке деталей из стали 45 (190...200 НВ); 2 – при обработке деталей из стали 45 (30...35 HRC)

### **Исследование шумовых характеристик процесса СМДН**

При СМДН наличие шума в зоне обработки в основном обусловлено импульсно-ударным взаимодействием деформирующих шаров с поверхностью упрочняемой нежесткой ферромагнитной детали, а также с элементами магнитной системы комбинированного

инструмента [16].

Исследования шумовых характеристик процесса СМДН при применении усовершенствованного комбинированного инструмента, описанного выше, осуществляли с помощью прибора для измерения шума и вибраций ВШВ-003-М2 (согласно ГОСТ 12.050–86 *Методы измерения шума на рабочих местах*).

Измерение шума при СМДН

производили с целью оценки его соответствия допустимому уровню шума станков (согласно отраслевому стандарту ОСТ 2Н89-40-75) и выявления преимуществ усовершенствованного комбинированного инструмента, оснащенного специальным демпфирующим кольцом, исключая ударное взаи-

модействие деформирующих шаров с магнитной системой [14].

Постоянный шум характеризуют уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, результаты измерения которых представлены на рис. 4.

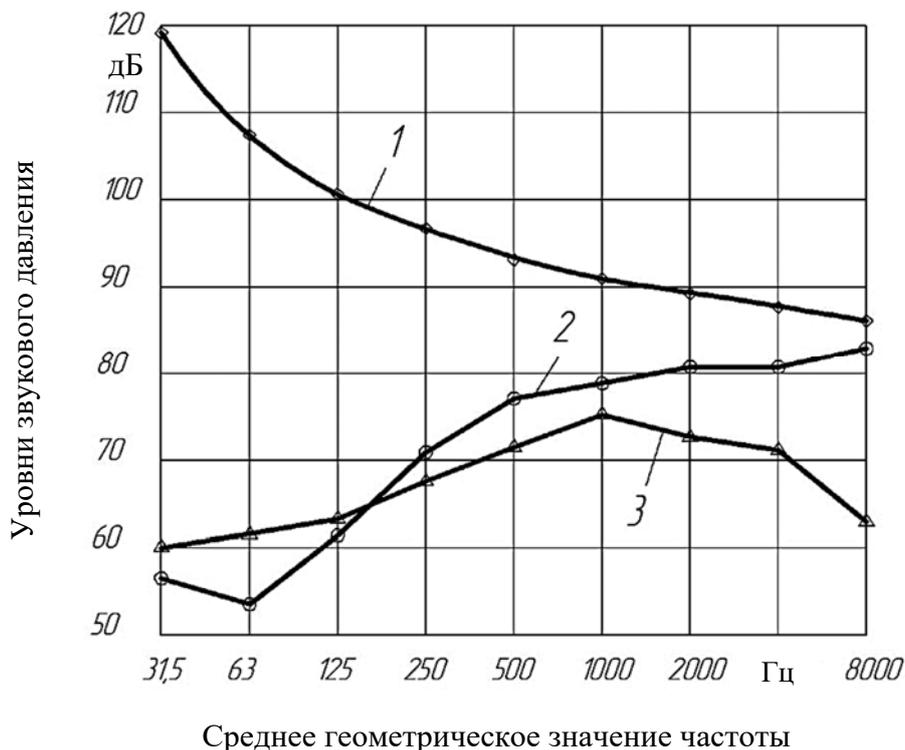


Рис. 4. Октавные уровни звукового давления исследуемых методов обработки: 1 – допустимый уровень шума станков (ОСТ 2Н89-40-75); 2 – магнитно-динамическое накатывание; 3 – СМДН с усовершенствованным комбинированным инструментом

Результаты экспериментальных исследований позволили установить, что уровни звукового давления при магнитно-динамическом накатывании и СМДН не превышают допустимые уровни звукового давления для металлорезающих станков (ОСТ 2Н89-40-75).

Важной характеристикой постоянного шума также является уровень звука, экспериментальные измерения которого для исследованных методов обработки представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, уровень звука

при осуществлении процессов магнитно-динамического накатывания и СМДН не превышает установленных норм (ОСТ 2Н89-40-75).

Усовершенствованный комбинированный инструмент, снабженный демпфирующим кольцом, позволяет снизить уровень звука по отношению к магнитно-динамическому накатыванию на 4...12 дБА, а по отношению к СМДН традиционным комбинированным инструментом – на 2...5 дБА, что существенно улучшает условия труда.

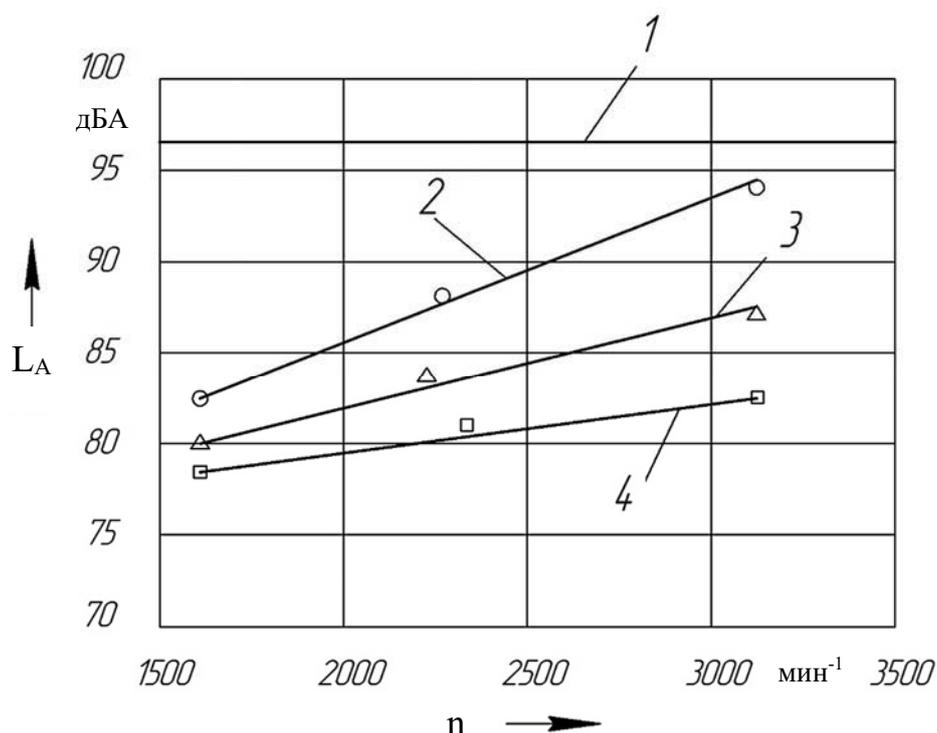


Рис. 5. Уровень звука при различных частотах вращения комбинированного инструмента: 1 – допустимый уровень звука металлорежущих станков; 2 – магнитно-динамическое накатывание; 3 – СМДН; 4 – СМДН комбинированным инструментом с демпфирующим кольцом

### Заклучение

Разработан и исследован комбинированный инструмент для СМДН внутренней цилиндрической поверхности нежестких ферромагнитных деталей, снабженный демпфирующим кольцом и накопителем смазочного материала (патент ВУ 19423).

Установлено, что период стойкости деформирующих шаров усовершенствованного комбинированного инструмента составляет 77,2 ч (для заготовок из стали 45 твердостью 180...200 НВ) и 52,4 ч (для заготовок из стали 45

твердостью 30...35 HRC). Предложенный инструмент обеспечивает повышение стойкости деформирующих шаров (в сравнении с традиционными инструментами для магнитно-динамического накатывания) в 9,5–10,1 раза.

Выявлено, что усовершенствованный комбинированный инструмент, снабженный демпфирующим кольцом, позволяет снизить уровень звука по отношению к инструментам для магнитно-динамического накатывания на 4...12 дБА, а по отношению к инструментам для СМДН – на 2...5 дБА.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смелянский, В. М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – Москва: Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. Технология и инструменты для отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник в 2 т. / Под общ. ред. А. Г. Сулова. – Москва: Машиностроение, 2014. – Т. 1. – 480 с.

3. Технология и инструменты для отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник в 2 т. / Под общ. ред. А. Г. Сулова. – Москва: Машиностроение, 2014. – Т. 2. – 444 с.
4. Энциклопедия поверхностного пластического деформирования / Под общ. ред. С. А. Зайдеса. – Иркутск : ИРНТУ, 2015. – 394 с.
5. Способ упрочнения стальных деталей и устройство для его осуществления: а. с. SU 166819 / А. С. Таранов, Ю. А. Семенов. – Опубл. 26.08.1991.
6. **Таранов, А. С.** Повышение эффективности упрочнения поверхности валов при ремонте сельскохозяйственной техники поверхностным пластическим деформированием в переменном магнитном поле : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. С. Таранов. – Челябинск, 2010. – 44 с.
7. **Таранов, А. С.** Упрочнение валов методом ППД в ПМП / А. С. Таранов // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 2. – С. 44–45.
8. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. RU 2068770 / А. М. Довгалев. – Опубл. 10.11.1996.
9. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. RU 2089373 / А. М. Довгалев. – Опубл. 10.09.1997.
10. **Довгалев, А. М.** Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А. М. Довгалев. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.
11. **Довгалев, А. М.** Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А. М. Довгалев // Обработка металлов (Технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18–35.
12. **Шелег, В. К.** Исследование триботехнических свойств поверхностей деталей, упрочненных совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В. К. Шелег, А. М. Довгалев // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Т. 7. – С. 330–334.
13. **Свирипа, Д. М.** Технологическое обеспечение качества внутренней цилиндрической поверхности деталей магнитно-динамическим раскатыванием : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. М. Свирипа. – Могилев, 2013. – 26 с.
14. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрического отверстия детали: пат. ВУ 19423 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирипа, С. А. Сухоцкий. – Опубл. 30.08.2015.
15. **Папшев, Д. Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. – Москва: Машиностроение, 1978. – 152 с.
16. **Свирипа, Д. М.** Исследование шумовых характеристик процесса магнитно-динамического упрочнения / Д. М. Свирипа, Д. М. Рыжанков, А. М. Довгалев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2009 г. : в 3 ч. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – Ч. 1. – С. 102.

*Статья сдана в редакцию 14 апреля 2021 года*

**Александр Михайлович Довгалев**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-29-345-40-56. E-mail: rct@bru.by.

**Иван Анатольевич Тарадейко**, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-33-659-38-68. E-mail: IvanTaradeiko@yandex.ru.

**Alexander Mikhailovich Dovgalev**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-29-345-40-56. E-mail: rct@bru.by.

**Ivan Anatolievich Taradeiko**, assistant, Belarusian-Russian University. Phone: +375-33-659-38-68. E-mail: IvanTaradeiko@yandex.ru.

---

УДК 621.83.06

*А. П. Прудников, А. Д. Бодунова*

## СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ В ЗАЦЕПЛЕНИИ ПЛАНЕТАРНОЙ ТОРОВОЙ ВИНТОВОЙ ПЕРЕДАЧИ

---

UDC 621.83.06

*A. P. Prudnikov, A. D. Bodunova*

## SLIDING SPEEDS IN PLANETARY TORUS HELICAL TRANSMISSION

---

### **Аннотация**

В результате проведенного кинематического анализа получены зависимости для определения угловых скоростей пальцев составных роликов и скоростей скольжения, возникающих при взаимодействии пальцев с беговыми дорожками. Выполнено сравнение скоростей скольжения в зацеплении передачи для случаев установки пальцев в составном ролике с натягом, в подшипниках качения и скольжения. На базе построенной математической модели выполнен анализ факторов, влияющих на скорость скольжения.

### **Ключевые слова:**

механическая передача, промежуточные тела качения, составной ролик, скорость скольжения.

### **Abstract**

As a result of the kinematic analysis, the dependences have been obtained to determine angular velocities of pins of the composite rollers and sliding speeds arising from the interaction between the pins and the grooves. Sliding speeds in the transmission engagement have been compared for the cases of pins being installed in a composite roller with an interference fit, in rolling and plain bearings. Based on the mathematical model constructed, an analysis of the factors influencing the sliding speed has been carried out.

### **Keywords:**

mechanical transmission, intermediate rolling bodies, composite roller, sliding speed.

---

### **Введение**

Одной из главных характеристик любой передачи является ее эффективность при передаче энергии. Планетарная торовая винтовая передача [1] обладает коэффициентом полезного действия (КПД), сопоставимым с червячными передачами, а также аналогичным широким диапазоном передаточных чисел (до 100 в одной ступени). Повышение КПД передачи позволяет снизить затраты энергии на работу приводной техники и за счет увеличения отношения полезно использованной энергии к суммарному количеству энергии, по-

данному на ведущее звено, снизить габаритные размеры передачи при сохранении требуемой нагрузочной способности и повысить ее ресурс. Снижение потерь энергии позволит также решить проблему недостаточного отвода тепла вследствие малых габаритных размеров передачи.

Одним из резервов повышения КПД планетарной торовой винтовой передачи является снижение потерь на трение при взаимодействии элементов составного ролика со звеньями передачи. Составной ролик взаимодействует посредством своих пальцев одновременно с беговыми дорожками на веду-

шем и заторможенном звене. Потери мощности на трение пропорциональны возникающим в передаче силам трения и скоростям скольжения. Снижение скоростей скольжения в передаче также позволит уменьшить износ контактирующих деталей, приводящий к уменьшению размера площади несущей поверхности, увеличению концентрации нагрузки и контактных напряжений.

В данном исследовании определим угловые скорости элементов составного ролика, проанализируем факторы, влияющие на величины скоростей скольжения в зацеплении звеньев передачи, и определим пути снижения скоростей скольжения.

Рассмотрим радиальную компоновку планетарной торовой винтовой передачи (как менее трудоёмкую с точки зрения изготовления и сборки) и три варианта конструкции составного ролика:

– пальцы установлены в составном ролике с натягом и не вращаются, что исключает возможность их перекоса и повышает надежность передачи;

– пальцы установлены в подшипниках качения, что значительно снижает потери на трение, но увеличивает габаритные размеры передачи, усложняет ее конструкцию и снижает надежность;

– пальцы установлены в подшипниках скольжения (бронзовых или пластмассовых втулках), что с точки зрения возникающих преимуществ и недостатков является промежуточным вариантом по сравнению с вышеперечисленными.

Для всех указанных случаев пальцы могут выполняться с цилиндрической или сферической наружной поверхностью.

### **Кинематический анализ**

В случае если пальцы не вращаются, то скорость их перемещения относительно беговой дорожки равна скорости скольжения.

Длина винтовой линии, образу-

ющей беговую дорожку на ведущем звене, определяется по формуле

$$L_1 = \int_0^{2\pi \cdot Z_1} \sqrt{\left(\frac{dx}{d\theta_1}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\theta_1}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\theta_1}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $z, x, y$  – уравнения винтовой линии для беговой дорожки ведущего звена радиальной компоновки передачи [1, формулы (10)–(12)],  $m$ ;  $\theta_1$  – центральный угол, рад.

Средняя скорость скольжения при перемещении пальца относительно беговой дорожки на ведущем звене определяется по формуле

$$v_{41\phi} = \frac{L_1 \cdot n_1}{60 \cdot Z_1}, \quad (2)$$

где  $n_1$  – частота вращения ведущего звена,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $Z_1$  – число витков винтовой линии, образующей беговую дорожку на ведущем звене.

Аналогичным образом определяется средняя скорость скольжения, возникающая при перемещении пальца составного ролика относительно беговой дорожки на заторможенном звене:

$$v_{43\phi} = \frac{L_3 \cdot n_1}{60 \cdot Z_1}, \quad (3)$$

где  $L_3$  – длина винтовой линии, образующей беговую дорожку на заторможенном звене,  $m$ ;

$$L_3 = \int_0^{2\pi/Z_3} \sqrt{\left(\frac{dx}{d\theta_3}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\theta_3}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\theta_3}\right)^2}; \quad (4)$$

$z, x, y$  – уравнения винтовой линии для беговой дорожки заторможенного звена радиальной компоновки передачи [1, формулы (13)–(15)],  $m$ ;  $\theta_3$  – центральный угол, рад;  $Z_3$  – число витков винтовой линии, образующей беговую дорожку на заторможенном звене.

В случае если пальцы установлены

в подшипниках качения, то угловую скорость вращения пальца составного ролика определим с учетом допущения, что палец катится по беговой дорожке. В этом случае должно выполняться равенство

$$L_1 = 2\pi \cdot r_{4p} \cdot k_{41об}, \quad (5)$$

где  $r_{4p}$  – расстояние от оси вращения пальца до середины его линии контакта с беговой дорожкой, м;  $k_{41об}$  – число оборотов пальца, необходимое для его прохождения вдоль всей беговой дорожки на ведущем звене.

С учетом зависимостей (1) и (5) средняя угловая скорость пальца, контактирующего с беговой дорожкой на ведущем звене, равна

$$\omega_{41} = \frac{L_1 \cdot \omega_1}{2\pi \cdot r_{4p} \cdot Z_1}, \quad (6)$$

где  $\omega_1$  – угловая скорость ведущего звена,  $\text{с}^{-1}$ .

Аналогичным образом определяется средняя угловая скорость пальца, контактирующего с беговой дорожкой на заторможенном звене:

$$\omega_{43} = \frac{L_3 \cdot \omega_1}{2\pi \cdot r_{4p} \cdot Z_1}, \quad (7)$$

где

$$L_3 = 2\pi \cdot r_{4p} \cdot k_{43об}; \quad (8)$$

$k_{43об}$  – число оборотов пальца, необходимое для его прохождения вдоль всей беговой дорожки на заторможенном звене.

Из условия отсутствия проскальзывания в месте контакта пальца и беговой дорожки следует, что линейные скорости должны быть равны. Если это условие не соблюдается, существует скольжение, которое сопровождается потерями мощности, нагревом и интенсивным износом контактирующих по-

верхностей. Соответственно, величина скорости скольжения определяется как разность линейных скоростей на поверхностях пальца и беговой дорожки.

Поскольку составной ролик вращается относительно своей оси, то его палец перемещается по окружности в радиальном направлении относительно оси вращения ведущего звена. При этом изменяется скорость перемещения беговой дорожки, а также окружная скорость на наружной поверхности пальца вдоль оси его вращения.

Угловая скорость пальца, взаимодействующего с беговой дорожкой на ведущем звене, равна

$$\omega_{41} = \frac{\omega_1 \cdot R_{1cp} \cdot r_{4p}}{\cos\alpha_1}, \quad (9)$$

где  $R_{1cp}$  – расстояние от оси вращения ведущего звена до середины его линии контакта с пальцем, м;  $\alpha_1$  – угол наклона кривой, образующей беговую дорожку на ведущем звене, рад.

$$R_{1cp} = R_{42} + (R_4 + r_{4p} \cdot \tan\varphi) \times \\ \times \sin\varphi - \frac{r_{4p}}{\cos\varphi}, \quad (10)$$

где  $R_{42}$  – расстояние от оси вращения ведомого звена до оси вращения составного ролика, м;  $R_4$  – измеренное вдоль оси пальца расстояние от оси вращения составного ролика до середины линии контакта пальца с беговой дорожкой, м;  $\varphi$  – угол поворота составного ролика (рис. 1), рад.

Поскольку пальцы составного ролика могут быть выполнены со сферической и цилиндрической наружной поверхностью, то для случая цилиндрической поверхности  $r_{4p}$  равно радиусу цилиндрической поверхности, а для случая сферической поверхности определяется по формуле

$$r_{4p} = r_p \cdot \cos\beta, \quad (11)$$

где  $r_p$  – радиус сферической поверхности пальца, м;  $\beta$  – угол отклонения реакции, действующей на палец со стороны беговой дорожки, от плоскости, пер-

пендикулярной оси вращения пальца (для пальца с цилиндрической наружной поверхностью равен нулю), рад.

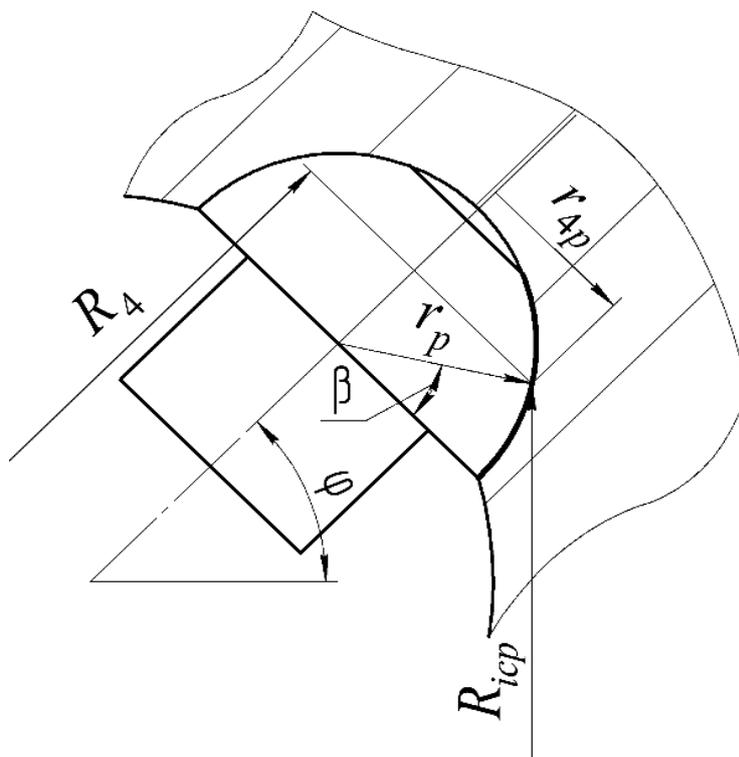


Рис. 1. Схема контакта пальца составного ролика с беговой дорожкой

Угловую скорость пальца, взаимодействующего с беговой дорожкой на заторможенном звене, определим, применив метод остановки [2, с. 194] ведомого звена:

$$\omega_{43} = \frac{\omega_1 \cdot R_{3cp} \cdot r_{4p}}{u \cdot \cos \alpha_3}, \quad (12)$$

где  $R_{3cp}$  – расстояние от оси вращения ведущего звена до середины его линии контакта с пальцем, определяется по аналогии с формулой (10), м;  $\alpha_3$  – угол наклона кривой, образующей беговую дорожку на ведущем звене, рад;  $u$  – передаточное число передачи.

Скорость скольжения в любой  $j$  точке контакта пальца с беговой дорожкой определяется по формулам

$$v_{41\phi j} = \frac{\omega_1 \cdot R_{1cpj}}{\cos \alpha_1} - \omega_{41} \cdot r_{4pj}; \quad (13)$$

$$v_{43\phi j} = \frac{\omega_1}{u \cdot \cos \alpha_3} \cdot R_{3cpj} - \omega_{43} \cdot r_{4pj}. \quad (14)$$

В случае если пальцы установлены в подшипниках скольжения, то они перекатываются по беговым дорожкам и при этом скользят по поверхности гнезд (отверстий), в которых они установлены в составном ролике.

При равномерном вращении пальца составного ролика и перемещения вдоль беговой дорожки выполняется условие равенства мощностей

$$M_{4i} \cdot \omega_{4i} = F_{ic} \cdot v_{ic}, \quad (15)$$

где  $i$  – индекс звена, вдоль относительно которого перемещается палец (1 – ведущее звено, 3 – заторможенное звено);  $M_{4i}$  – момент трения на пальце, находящемся в контакте с  $i$ -м звеном, Н·м;  $\omega_{4i}$  – угловая скорость вращения пальца, находящегося в контакте с  $i$ -м звеном,

рад/с;  $F_{ic}$  – сила трения, возникающая на линии контакта пальца и беговой дорожки на  $i$ -м звене, Н;  $v_{ic}$  – скорость перемещения беговой дорожки  $i$ -го звена относительно пальца, м/с.

На рис. 2 представлена схема контакта пальца с беговой дорожкой.

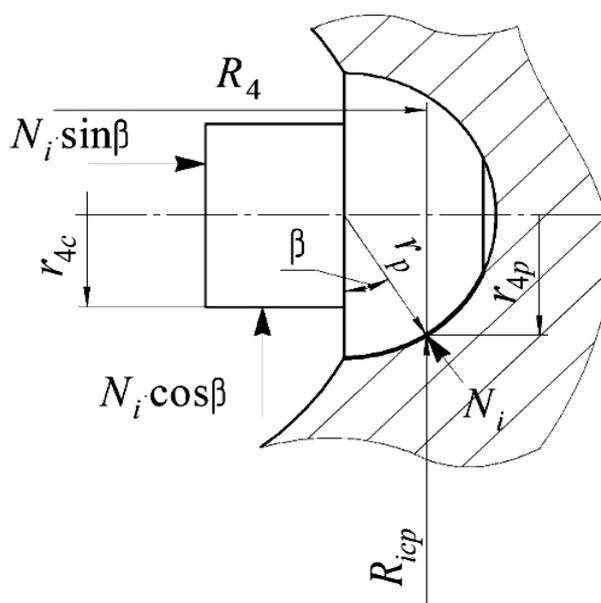


Рис. 2. Схема контакта пальца с беговой дорожкой при установке в подшипнике скольжения

Примем допущение, что действующая на палец со стороны беговой дорожки реакция  $N_i$  приложена по середине линии контакта и обеспечивает по ней равномерное распределение давления, а также постоянство коэффициента трения в зоне контакта. Учтем силы трения, возникающие на пальце составного ролика при его взаимодействии как с беговой дорожкой, так и непосредственно самим роликом, в котором палец установлен. На основании этого определим силу и момент трения:

$$F_{ic} = N_i \cdot \delta_k; \quad (16)$$

$$M_{4i} = N_i \cdot \delta_k \cdot r_{4p} + N_i \cdot \cos\beta \cdot \delta_c \times \\ \times r_{4c} + N_i \cdot \sin\beta \cdot \delta_c \cdot \frac{r_{4c}}{2}, \quad (17)$$

где  $N_i$  – реакция, действующая на палец составного ролика со стороны соответствующей беговой дорожки, Н;  $\delta_k$  – коэффициент трения качения;  $\delta_c$  – коэффициент трения скольжения;  $r_{4c}$  – радиус поверхности пальца, посредством которой он установлен в подшипнике скольжения, м.

Скорость перемещения беговой дорожки  $i$ -го звена относительно пальца определяется по формуле

$$v_{4i\phi} = \frac{L_i \cdot \omega_1}{2 \cdot \pi \cdot Z_1}. \quad (18)$$

Средняя угловая скорость пальца составного ролика определяется по формуле

$$\omega_{4i} = \frac{\omega_1 \cdot L_i \cdot \delta_k}{2\pi \cdot Z_1 \cdot \left( \delta_k \cdot r_{4p} + \cos\beta \cdot \delta_c \cdot r_{4c} + \sin\beta \cdot \delta_c \cdot \frac{r_{4c}}{2} \right)}. \quad (19)$$

Рассчитав угловые скорости вращения пальцев составного ролика, можно определить скорость скольжения в любой  $j$  точке контакта пальца с соответствующей беговой дорожкой по формулам (13) и (14).

Скорости скольжения на цилиндрической  $v_{4i\phi n}$  и торцевой  $v_{4i\phi m}$  поверхностях пальца, посредством которых он установлен в составном ролике, определяются по формулам

$$v_{4i\phi n} = \omega_{4i} \cdot r_{4c}; \quad (20)$$

$$v_{4i\phi m} = \omega_{4i} \cdot \frac{r_{4c}}{2}. \quad (21)$$

Основные потери мощности в планетарной торовой винтовой передаче, приводящие к снижению ее КПД, вызываются скольжением пальцев при их взаимодействии с беговой дорожкой и составным роликом. Указанные потери мощности при установке пальцев составного ролика в подшипниках скольжения определяются по формуле

$$P_{ном} = n_y \cdot \sum_{p=1}^2 (v_{4i\phi} \cdot F_{ic} + N_i \cdot \delta_c \times (v_{4i\phi n} \cdot \cos\beta + v_{4i\phi m} \cdot \sin\beta)), \quad (22)$$

где  $n_y$  – среднее число составных роликов, передающих нагрузку.

При работе планетарной торовой винтовой передачи часть составных роликов не участвует в передаче нагрузки. Это происходит в момент, когда один из пальцев не взаимодействует с беговой дорожкой заторможенного звена вследствие компоновки и геометрических параметров передачи. При этом второй палец взаимодействует с беговой дорожкой на ведущем звене, чтобы со-

ставной ролик продолжал вращаться, но нагрузку он не передает.

Количество составных роликов, пальцы которых не передают нагрузку, определяется размерами ведомого вала, которые, в свою очередь, зависят от передаваемой нагрузки.

Поскольку ролики установлены на ведомом звене с равным угловым шагом и беговые дорожки на ведущем и заторможенном звеньях выполнены винтовыми, то можно утверждать, что число составных роликов, не передающих усилие, исходя из геометрических параметров звеньев передачи пропорционально отношению  $\gamma/(2\pi)$ . Соответственно, формула для определения числа составных роликов, передающих нагрузку, имеет вид:

$$n_y = \left( 1 - \frac{2\gamma}{\pi} \right) \cdot n, \quad (23)$$

где

$$\gamma = \arccos \left( 1 - \frac{R_{s3} - (R_{42} - R_4)}{R_4} \right); \quad (24)$$

$R_{s3}$  – радиус отверстия в заторможенном звене, необходимого для установки ведомого звена, м;  $n$  – номинальное количество составных роликов в передаче.

Одним из способов снижения потерь мощности в соответствии с формулой (22) является уменьшения скорости скольжения в зацеплении. С учетом допущения о равномерности распределения давления в зоне контакта, а также одинаковом материале звеньев передачи, можно заключить, что скорости износа будут пропорциональны скорости скольжения [3, с. 358]. Следовательно, снижение скоростей скольжения приведет к увеличению КПД

и ресурса передачи.

С этой целью проанализируем факторы, влияющие на величины скоростей скольжения на пальцах составного ролика. Анализ проведем на примере планетарной торовой винтовой передачи со следующими параметрами: число витков винтовой линии для соответствующих беговых дорожек  $Z_1 = 4$ ,  $Z_2 = 12$ ;  $u = 21$ ;  $n = 7$ ;  $R_{42} = 25$  мм;  $\delta_r = 0,002$ ;  $\delta_c = 0,05$  с учетом  $n_1 = 1000$  мин<sup>-1</sup>.

Сравнение исследуемых случаев установки пальцев в составном ролике позволило установить, что минимальные скорости скольжения наблюдаются при установке пальца в подшипнике качения. Однако при этом значительно увеличиваются габариты передачи и снижается ее нагрузочная способность. Такая передача может применяться только в качестве кинематической.

В случае установки пальцев в подшипниках скольжения по сравнению с установкой их в составном ролике с натягом скорость скольжения на пальце, взаимодействующем с беговой дорожкой: на ведущем звене будет меньше на 20 %; на заторможенном – на 28 %.

Для анализа факторов, влияющих на скорость скольжения, построим математическую модель на основе методов планирования эксперимента. Иссле-

дуем случай, когда пальцы установлены в подшипниках скольжения, как оптимальный с точки зрения обеспечения баланса минимальных скоростей скольжения при малых габаритных размерах передачи. Влияние величины скорости скольжения будем оценивать с помощью потери мощности, определяемой по формуле (22). Силы, действующие на палец со стороны беговых дорожек, определим с помощью полученной ранее математической модели [4]; так, при вращающем моменте на ведомом звене  $M_2 = 250$  Н·м  $N_1 = 392$  Н;  $N_3 = 931$  Н.

В качестве факторов, влияющих на скорость скольжения, рассмотрим:

– нормированный фактор  $z_1$  – форма наружной поверхности пальцев, посредством которой он контактирует с беговой дорожкой: сферическая и цилиндрическая;

– нормированный фактор  $z_2$  – размеры пальца:  $r_p = [3; 6]$  (примем  $r_{4c} = 0,8 \cdot r_p$ );

– нормированный фактор  $z_3$  – размеры составного ролика:  $R_4 = [15; 20]$  мм.

В табл. 1 приведена матрица планирования эксперимента и полученные результаты посредством выведенных в ходе кинематического анализа зависимостей и разработанной модели.

Табл. 1. Матрица планирования

Номер эксперимента	$z_0$	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_{12}$	$z_{13}$	$z_{23}$	$z_{123}$	$P_{nom}$	$P'_{nom}$
1	+	–	–	–	+	+	+	–	77,64	77,95
2	+	+	–	–	–	–	+	+	74,63	74,2825
3	+	–	+	–	–	+	–	+	74,75	74,5075
4	+	+	+	–	+	–	–	–	70,56	70,84
5	+	–	–	+	+	–	–	+	81,4	81,6725
6	+	+	–	+	–	+	–	–	78,24	78,005
7	+	–	+	+	–	–	+	–	78,57	78,23
8	+	+	+	+	+	+	+	+	74,26	74,5625

Коэффициенты модели определяются на базе [5, формула (4.57)].

Математическая модель для трехфакторного эксперимента получит сле-

дующий вид:

$$\begin{aligned}
 P'_{\text{ном}} = & 76,26 - 1,83 \cdot z_1 - 1,72 \cdot z_2 + \\
 & + 1,86 \cdot z_3 - 0,29 \cdot z_1 \cdot z_2 - 0,034 \cdot z_1 \times \\
 & \times z_3 + 0,019 \cdot z_2 \cdot z_3 + \\
 & + 0,0038 \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_3. \quad (25)
 \end{aligned}$$

Значимость коэффициентов модели определим путем сравнения результатов, полученных с помощью зависимостей (22) и (25). Полученное отклонение не должно превышать 1 %.

Исключив незначимые коэффициенты, получим следующую модель:

$$\begin{aligned}
 P'_{\text{ном}} = & 76,26 - 1,83 \cdot z_1 - \\
 & - 1,72 \cdot z_2 + 1,86 \cdot z_3. \quad (26)
 \end{aligned}$$

Значения, предсказанные полученной моделью, приведены в табл. 1, причем отклонение от результатов, найденных по формуле (22), не превышает 0,5 %.

## Заключение

Таким образом, для планетарной торовой винтовой передачи в ходе проведенного кинематического анализа получены зависимости для определения скоростей скольжения, возникающих в процессе взаимодействия пальцев составных роликов с беговыми дорожками.

Установлено, что для передачи с рассмотренными параметрами в случае установки пальцев в подшипниках скольжения по сравнению с установкой их с натягом скорость скольжения будет меньше на 20 %...30 %.

Полученная математическая модель показала, что на величину скоростей скольжения и, соответственно, КПД передачи влияют (в порядке убывания степени влияния) размеры составного ролика, форма наружной поверхности пальцев, размеры пальца.

С точки зрения снижения скоростей скольжения и износа пальцев и повышения КПД передачи целесообразно применять составные ролики минимального радиуса с цилиндрической наружной поверхностью пальцев максимально возможного радиуса.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prudnikov, A. P. Planetary torus helical transmission / A. P. Prudnikov // International Conference on Mechanical Engineering and Modern Technologies. – 2020. – Vol. 795. – P. 1–6.
2. Иванов, М. Н. Детали машин: учебник для машиностроительных специальностей вузов / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – Москва: Абрис, 2013. – 408 с.
3. Филонов, И. П. Теория механизмов, машин и манипуляторов / И. П. Филонов, П. П. Анципорович, В. К. Акулич. – Минск: Дизайн ПРО, 1998. – 656 с.
4. Прудников, А. П. Определение действующих сил в планетарной торовой винтовой передаче / А. П. Прудников // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 68.
5. Пашкевич, В. М. Научные основы технологии машиностроения. Обработка и анализ экспериментальных данных: учебное пособие / В. М. Пашкевич. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – 236 с.

Статья сдана в редакцию 5 апреля 2021 года

**Александр Петрович Прудников**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: prudnikov\_a@tut.by.

**Анастасия Дмитриевна Бодунова**, магистрант, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: bodunok.98@mail.ru.

**Aleksandr Petrovich Prudnikov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: prudnikov\_a@tut.by.

**Anastasiya Dmitrievna Bodunova**, master's degree student, Belarusian-Russian University.  
E-mail: bodunok.98@mail.ru.

---

---

УДК 629.3

*В. П. Тарасик, О. В. Пузанова*

## УПРАВЛЕНИЕ ФРИКЦИОНАМИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ

---

UDC 629.3

*V. P. Tarasik, O. V. Puzanova*

## FRICITION CLUTCH CONTROL IN HYDROMECHANICAL TRANSMISSION

---

### **Аннотация**

Изложены результаты исследований влияния характеристик управления включением фрикционов гидромеханической передачи на динамические нагрузки в трансмиссии автомобиля и теплонапряженность фрикционов. Рассмотрены способы улучшения характеристик управления. Приведена функциональная схема управления, реализация которой позволяет повысить качество переходных процессов.

### **Ключевые слова:**

гидромеханическая передача, гидротрансформатор, коробка передач, фрикцион, характеристики управления, удельная мощность и работа буксования фрикциона.

### **Abstract**

The results of studies are considered which show how controlling the engagement of friction clutches in the hydromechanical transmission influences dynamic loads in the vehicle transmission and the thermal stress of the friction clutches. The ways to improve control characteristics are given. A functional control scheme is presented, the implementation of which will allow the quality of transient processes to be improved.

### **Keywords:**

hydromechanical transmission, torque converter, gearbox, friction clutch, control characteristics, specific power and clutch slipping.

---

Гидромеханические передачи (ГМП) применяются на легковых автомобилях, автобусах, карьерных самосвалах, строительных и дорожных машинах. Переключение передач в ГМП автоматическое, осуществляемое посредством фрикционов, позволяющих замкнуть кинематическую цепь и получить передачу с желаемым передаточным числом. Команды на переключение формирует мехатронная система автоматического управления (МСАУ). Включение фрикциона производится подачей рабочей жидкости в его гидроцилиндр, осуществляющий сжатие фрикционных дисков и получение необходимого момента трения.

Характеристики управления фрик-

ционами представляют собой зависимости изменения давления рабочей жидкости во времени в процессе их включения. Формирование этих характеристик осуществляет контроллер МСАУ, а непосредственно реализуют их электрогидравлические пропорциональные клапаны (ЭГПК).

Проведенные на основе математического моделирования исследования процессов трогания с места карьерного самосвала [1] выявили существенное влияние формы и параметров характеристик управления на динамические нагрузки в трансмиссии и теплонапряженность фрикционов. Отрицательно отражается на результатах их оценки также значительная зависимость коэф-

коэффициента трения фрикционных дисков от скорости их скольжения при буксовании фрикциона, характерная для применяемой на тяжелых грузовых машинах пары трения металлокерамика МК5 – сталь 65Г. Коэффициент трения этой пары определяется по формуле

$$\mu = \mu_0 + (\mu_k - \mu_0) \exp(-k_e r_3 |\omega_{ск}|), \quad (1)$$

где  $\mu_0$ ,  $\mu_k$  – начальное и конечное значения коэффициента трения фрикционных дисков в процессе буксования фрикциона;  $k_e$  – коэффициент экспо-

ненты;  $r_3$  – радиус действия эквивалентной суммарной силы трения на поверхности фрикционных дисков, м.

Значения  $\mu_0$ ,  $\mu_k$  находятся в пределах:  $\mu_0 = 0,05 \dots 0,06$ ;  $\mu_k = 0,10 \dots 0,12$  [2]. При моделировании приняли  $\mu_0 = 0,06$ ,  $\mu_k = 0,10$ ,  $k_e = 0,225$ .

Для компенсации отмеченного недостатка в [1] предложена модель корректирования характеристики давления. Функциональная схема ее реализации представлена на рис. 1.

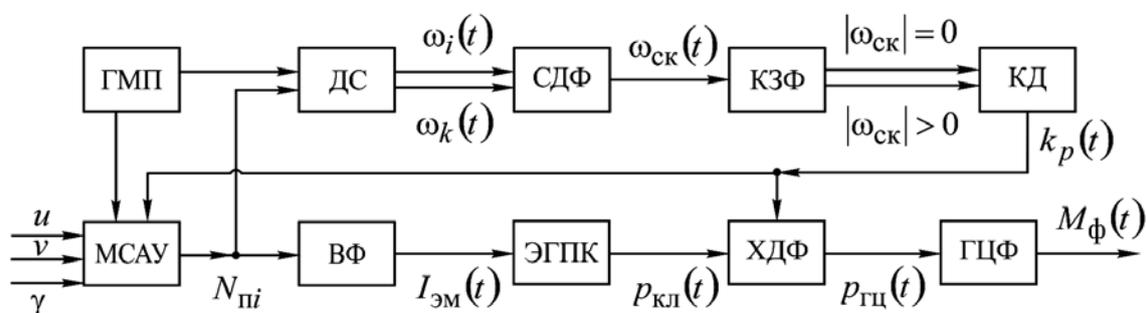


Рис. 1. Функциональная схема управления давлением включения фрикциона

В контроллер МСАУ поступают сигналы задающего воздействия водителя  $u$  (выбор режима управления), положения педали акселератора  $\gamma$  и скорости автомобиля  $v$ . На основе анализа этих сигналов определяется необходимость переключения на  $i$ -ю передачу  $N_{\Pi i}$ . Информация о включаемой передаче  $N_{\Pi i}$  передается в блок выбора фрикционов ВФ для осуществления необходимого переключения, а также в блок ДС датчиков скоростей вращения дисков этих фрикционов. В блоке ВФ формируются управляющие сигналы тока  $I_{эм}(t)$ , подаваемые на электромагниты ЭГПК включаемых фрикционов (на рис. 1 показан канал управления только одним фрикционом). ЭГПК формирует характеристику давления  $p_{кл}(t)$ , предназна-

ченную для управления фрикционом включаемой передачи.

Из блока ДС поступает информация об изменении угловых скоростей ведущих и ведомых дисков включаемого фрикциона  $\omega_i(t)$  и  $\omega_k(t)$ , на основе которой в блоке СДФ определяется текущее значение относительной скорости их скольжения  $\omega_{ск}(t)$ . В блоке КЗФ осуществляется контроль момента замыкания фрикциона: при  $|\omega_{ск}| > 0$  фрикцион буксует; при  $|\omega_{ск}| = 0$  – замкнутое состояние (закончен процесс включения передачи). Информация об изменении  $\omega_{ск}(t)$  обрабатывается в блоке корректора давления КД, на выходе которого получаем сигнал  $k_p(t)$ , характеризующий необходимую вели-

чину снижения давления  $p_{ГЦ}(t)$ , подаваемого в гидроцилиндр буксующего фрикциона (ГЦФ), по сравнению с давлением  $p_{ккл}(t)$ .

Характеристика давления  $p_{ГЦ}(t) = k_p(t)p_{ккл}(t)$  формируется в блоке ХДФ. Таким образом, корректор давления КД позволяет компенсировать отрицательное влияние резкого увеличения коэффициента трения фрикциона  $\mu$  в заключительной фазе его включения, согласно формуле (1). При  $|\omega_{ск}| = 0$  блок КД фиксирует замыкание фрикциона и выдает сигнал  $k_p = 1$ , отменяющий процесс корректирования давления  $p_{ккл}(t)$ . В результате в гидроцилиндре будет давление  $p_{ГЦ} = p_{ккл}$ , поддерживаемое ЭППК. В МСАУ поступит информация о завершении процесса переключения передачи. На основе приведенной функциональной схемы составляется алгоритм управления фрикционами, реализуемый контроллером МСАУ.

Сочетание характеристик  $p_{ккл}(t)$  и  $k_p(t)$ , их взаимодействие в процессе переключения передач оказывают существенное влияние на динамические нагрузки в трансмиссии и теплонапряженность фрикционов ГМП [1].

**Цель исследования** – определение рационального сочетания параметров характеристики регулирования давле-

ния  $p_{ккл}(t)$  пропорциональным клапаном ЭППК и коэффициента снижения давления  $k_p(t)$  корректором КД, обеспечивающего повышение показателей качества переходных процессов при переключении передач ГМП.

### Методика исследования

Исследования проведены на основе математической модели системы «двигатель – гидромеханическая передача – автомобиль – дорога», использованной в [3, 4]. Моделировали процесс трогания с места автомобиля с полной нагрузкой на горизонтальной дороге.

В качестве критериев качества переходных процессов, обусловленных включением передачи, использованы время буксования фрикциона ГМП  $t_б$ , максимальное значение вращающего момента нагрузки на карданном валу трансмиссии  $M_{кmax}$ , удельная мощность  $P_ф$  и удельная работа  $W_ф$  буксования фрикциона.

Обычно используют линейные и кусочно-линейные характеристики давления  $p_{ккл}(t)$ . Примеры таких характеристик изображены на рис. 2, а, б. Они построены за вычетом величины давления, компенсирующего усилие возвратных пружин поршня фрикциона.

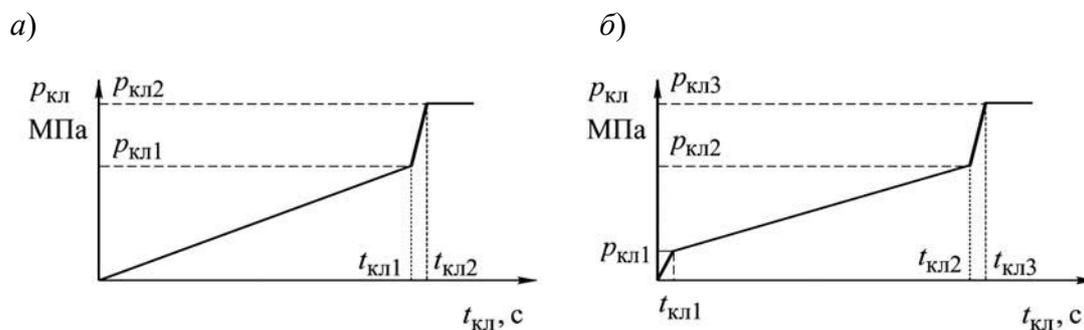


Рис. 2. Характеристики управления фрикционами ГМП: а – линейная; б – кусочно-линейная

Алгоритм вычисления кусочно-линейной характеристики давления

управления фрикционом (см. рис. 2, б) описывается выражением

$$p_{\text{кл}} = \begin{cases} k_{p1}t & \text{при } t \leq t_{\text{кл}1}; \\ p_{\text{кл}1} + k_{p2}(t - t_{\text{кл}1}) & \text{при } t_{\text{кл}1} < t \leq t_{\text{кл}2}; \\ p_{\text{кл}2} + k_{p3}(t - t_{\text{кл}2}) & \text{при } t_{\text{кл}2} < t \leq t_{\text{кл}3}; \\ p_{\text{кл}3} & \text{при } t > t_{\text{кл}3}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $t_{\text{кл}1}$ ,  $t_{\text{кл}2}$ ,  $t_{\text{кл}3}$  – координаты точек характеристики управления по оси времени  $t$ , с;  $p_{\text{кл}1}$ ,  $p_{\text{кл}2}$ ,  $p_{\text{кл}3}$  – координаты точек по оси давления, МПа;  $k_{p1}$ ,  $k_{p2}$ ,  $k_{p3}$  – скорости нарастания давления на соответствующих участках ха-

рактеристики управления, МПа/с;  $k_{pi} = dp_{\text{кли}}/dt$ .

Линейная характеристика управления фрикционом (см. рис. 2, а) вычисляется по формуле

$$p_{\text{кл}} = \begin{cases} k_{p1}t & \text{при } t \leq t_{\text{кл}1}; \\ p_{\text{кл}1} + k_{p2}(t - t_{\text{кл}1}) & \text{при } t_{\text{кл}1} < t \leq t_{\text{кл}2}; \\ p_{\text{кл}2} & \text{при } t > t_{\text{кл}2}. \end{cases} \quad (3)$$

Для определения характеристики корректора давления КД  $k_p(t)$ , снижающего давление  $p_{\text{ГЦ}}(t)$ , подаваемого в гидроцилиндр фрикциона в заключительной фазе его буксования, предложено выражение [1]

$$k_p = 1 - k_{\omega} \exp(-k_{ep}|\omega_{\text{СК}}|), \quad (4)$$

где  $k_p$  – коэффициент коррекции давления;  $\omega_{\text{СК}}$  – относительная скорость скольжения фрикционных дисков, рад/с;  $k_{\omega}$  – максимальная величина снижения коэффициента  $k_p$  при  $\omega_{\text{СК}} = 0$ ;  $k_{ep}$  – коэффициент экспоненты.

Характеристика давления рабочей жидкости  $p_{\text{ГЦ}}(t)$ , подаваемой в гидроцилиндр фрикциона в процессе его включения, соответствует выражению

$$p_{\text{ГЦ}}(t) = k_p(t)p_{\text{кл}}(t). \quad (5)$$

Характеристика корректора давления  $k_p(t)$  и график изменения коэффи-

циента трения  $\mu(t)$  в процессе включения фрикциона представлены на рис. 3, а. При вычислении характеристики  $k_p(t)$  приняты следующие значения параметров:  $k_{\omega} = 0,3$ ;  $k_{ep} = 0,02$ . Графики получаемых характеристик давления  $p_{\text{ГЦ}}(t)$ , реализуемых в гидроцилиндре фрикциона при кусочно-линейной характеристике ЭГПК  $p_{\text{кл}}(t)$ , показаны на рис. 3, б, при линейной характеристике – на рис. 3, в. Согласно этим графикам, давление в гидроцилиндре  $p_{\text{ГЦ}}(t)$  в заключительной фазе буксования снижается, что позволяет компенсировать резкое возрастание коэффициента трения фрикциона и улучшить показатели качества переключения передач.

Для оценки влияния корректора давления на критерии качества переходного процесса рассмотрим графики изменения вращающего момента на карданном валу трансмиссии  $M_K$ , полученные на моделируемом режиме управления ГМП при начальной частоте

вращения двигателя  $n_d = 1200$  об/мин. На рис. 4, а и б представлены графики, соответствующие кусочно-линейной характеристике давления  $p_{кл}(t)$ , а на рис. 4, в и г – линейной характеристике. Графики «б» и «г» получены с использованием корректора давления, а графики «а» и «в» – без него. На этих же рисунках расположены графики мо-

ментов двигателя  $M_d$ , турбины гидротрансформатора  $M_T$  и коробки передач  $M_{к.п}$ . Были приняты параметры кусочно-линейной характеристики давления  $p_{кл1} = 0,1$ ;  $p_{кл2} = 0,8$ ;  $p_{кл3} = 1,236$  МПа, а линейной –  $p_{кл1} = 0,8$ ;  $p_{кл2} = 1,236$  МПа.

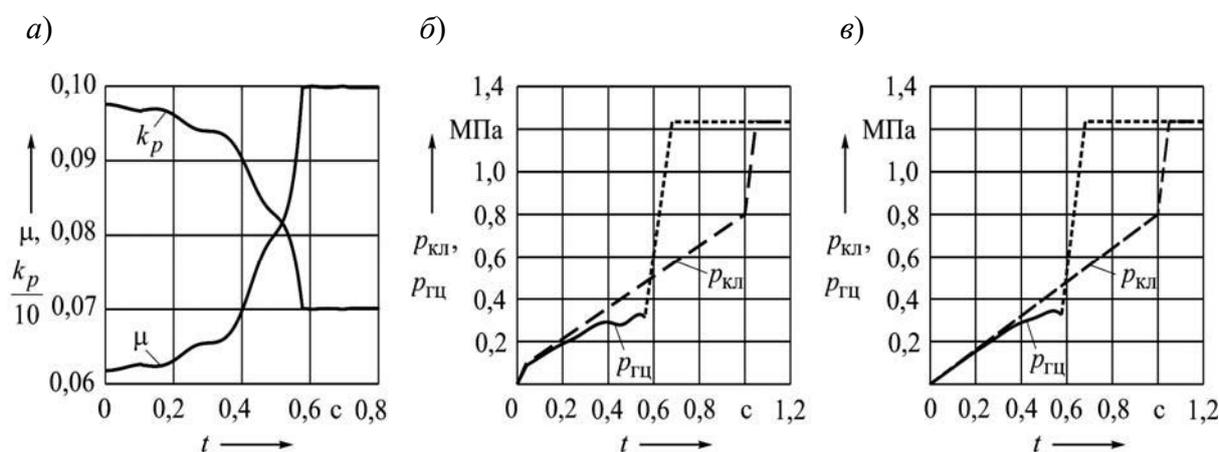


Рис. 3. Графики изменения в процессе буксования фрикциона коэффициента трения  $\mu$  и коэффициента коррекции давления  $k_p$  (а), давления гидропривода фрикциона  $p_{гц}$  при кусочно-линейной (б) и линейной (в) характеристиках управления фрикционом

Сопоставление приведенных графиков показывает, что при линейной характеристике давления  $p_{кл}(t)$  переходный процесс изменения момента  $M_k$  протекает более плавно и максимальное его значение меньше. Кусочно-линейная характеристика приводит к значительному начальному скачку момента  $M_k$ , величина которого практически пропорциональна давлению  $p_{кл1}$ , а дальнейшее протекание графика происходит с большими амплитудами колебаний. В результате возникают большие динамические нагрузки в трансмиссии, резкие толчки автомобиля при трогании с места и переключениях передач. Линейная характеристика  $p_{кл}(t)$  обеспечивает более плавное изменение

момента  $M_k$ .

Применение корректора давления, как следует из графиков на рис. 4, б, г, снижает максимальное значение момента  $M_k$  и способствует плавности его изменения.

В [1] проведен анализ причин формирования больших значений моментов  $M_k$  в трансмиссии автомобиля при включении передачи. Характер изменения графиков  $M_k$  обусловлен различием сочетания условий замыкания фрикциона: если замыкание происходит на возрастающих волнах амплитуд колебаний скоростей инерционных элементов трансмиссии  $n_{тр}$  и амплитуды момента  $M_k$ , тогда значение  $M_k$  существенно возрастает; в иных вариантах

сочетаний амплитуд этих параметров момент будет меньше.

Рассмотрим взаимосвязи моментов и частот вращения валов трансмиссии во время переключения передачи.

На рис. 5, а-г приведены графики изменения частот вращения вала двигателя-

ля  $n_d$ , турбины гидротрансформатора  $n_T$ , выходного вала коробки передач  $n_{к.п}$ , ведущих и ведомых дисков фрикциона  $n'_ф$  и  $n''_ф$ , соответствующие условиям получения графиков на рис. 4, а-г.

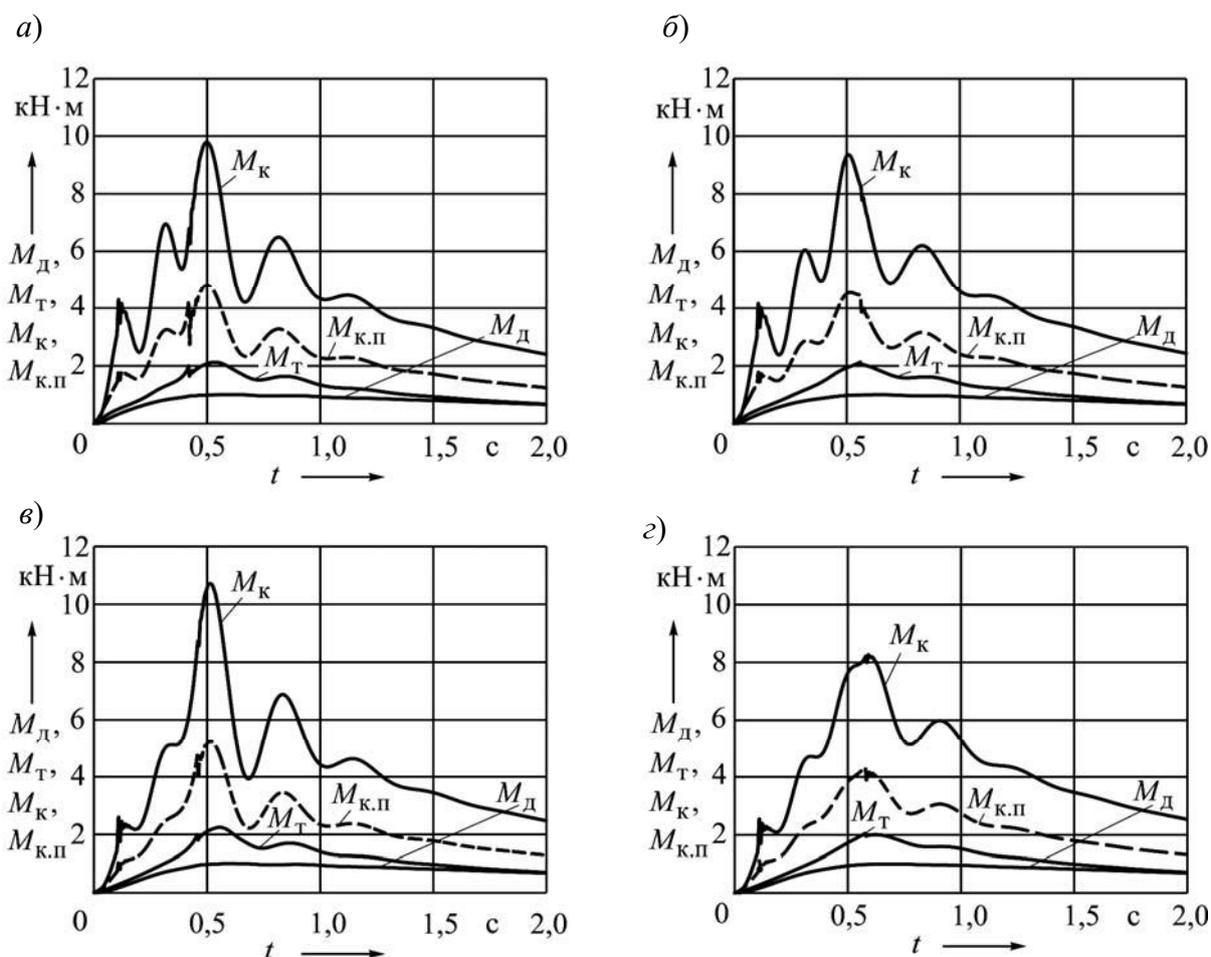


Рис. 4. Графики изменения во времени моментов двигателя  $M_d$  и на валах трансмиссии  $M_T$ ,  $M_{к.п}$  и  $M_к$  при кусочно-линейной характеристике давления без корректора (а) и с корректором (б); при линейной характеристике давления без корректора (в) и с корректором (г)

В примере на рис. 4, а оказалось, что замыкание фрикциона произошло на начальном участке возрастающей амплитуды момента, что обеспечило сравнительно небольшое пиковое значение момента  $M_к$ . На рис. 4, в ситуация оказалась иной: замыкание фрикци-

она произошло на взлете амплитуды момента  $M_к$ , в результате его пиковое значение оказалось больше, чем в предыдущем случае.

Рассмотрим влияние характеристик управления фрикционом на удельную мощность буксования фрикциона.

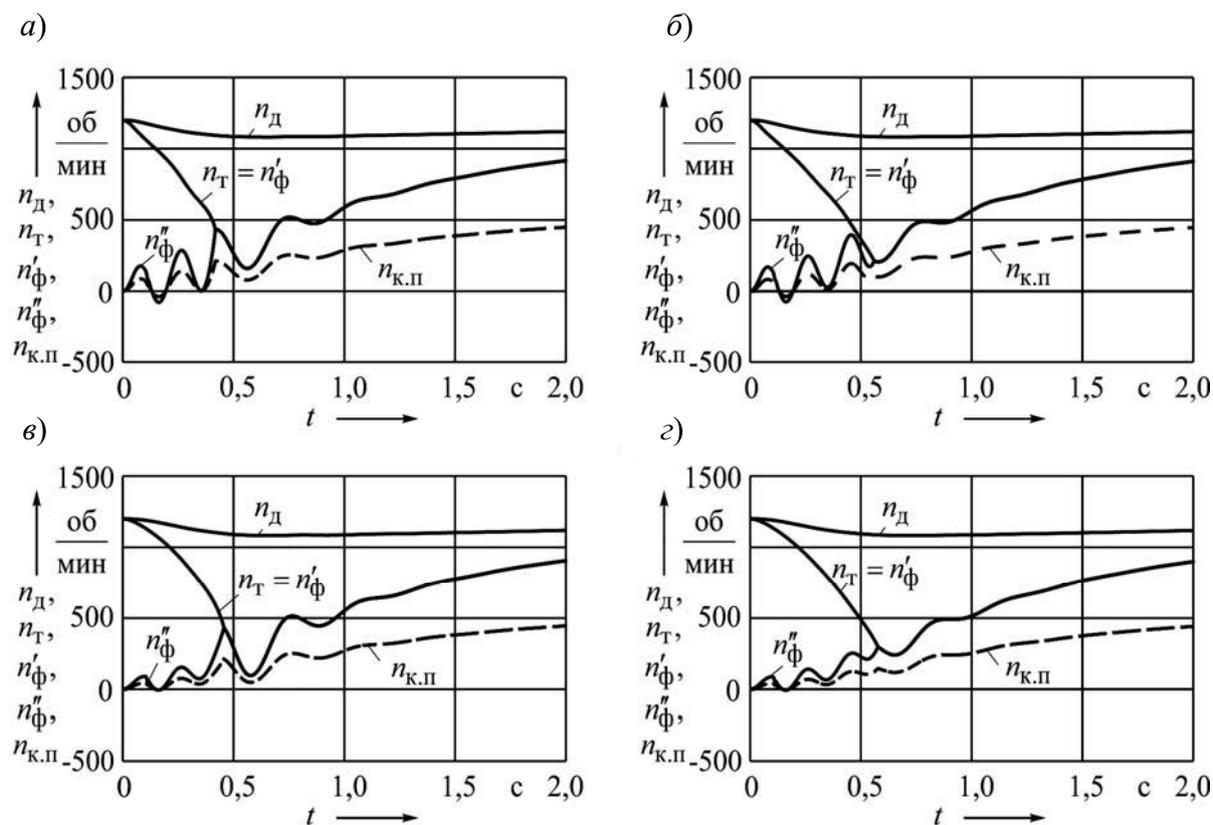


Рис. 5. Изменение во времени частот вращения двигателя  $n_d$  и валов трансмиссии  $n_T$  и  $n_{к.п}$  при различных характеристиках управления фрикционом, соответствующим графикам на рис. 4

На рис. 6, а–г приведены графики удельной мощности буксования фрикциона  $P_{\phi}$ , соответствующие тем же условиям, что и графики на рис. 4, а–г. При кусочно-линейной характеристике  $p_{кл}(t)$  график  $P_{\phi}$  также имеет колебательный характер (см. рис. 6, а, б). Линейная характеристика давления обеспечивает плавное изменение графика  $P_{\phi}$  (см. рис. 6, в, г), что способствует снижению градиента температуры фрикционных дисков и повышает их устойчивость против коробления [5].

Рассмотрим влияние параметров  $p_{кл1}$  и  $p_{кл2}$  на  $M_K$  и  $P_{\phi}$ . На рис. 7, а отображены зависимости  $M_K$  от давления  $p_{кл1}$ , а на рис. 7, б – от  $p_{кл2}$  кусочно-линейной характеристики дав-

ления  $p_{кл}(t)$  при двух значениях частоты вращения двигателя  $n_d = 1200$  и  $n_d = 1500$  об/мин.

Сплошными линиями на рис. 7 и 8 изображены графики, полученные без корректора давления, а штриховыми – с корректором.

Представленные графики имеют сложный неоднозначный характер и отображаются ломаными линиями с подъемами и падениями по мере возрастания давлений  $p_{кл1}$  и  $p_{кл2}$ . Аналогичный вид имеют зависимости  $M_K$  от  $p_{кл1}$  при линейной характеристике давления, приведенные на рис. 7, в. Однако в этом случае значения моментов  $M_K$  получаются гораздо меньшие, чем при кусочно-линейной характеристике управ-

ления давлением  $p_{кл}(t)$ . Причиной является различие сочетания условий за-

мыкания фрикциона (пояснение изложено выше).

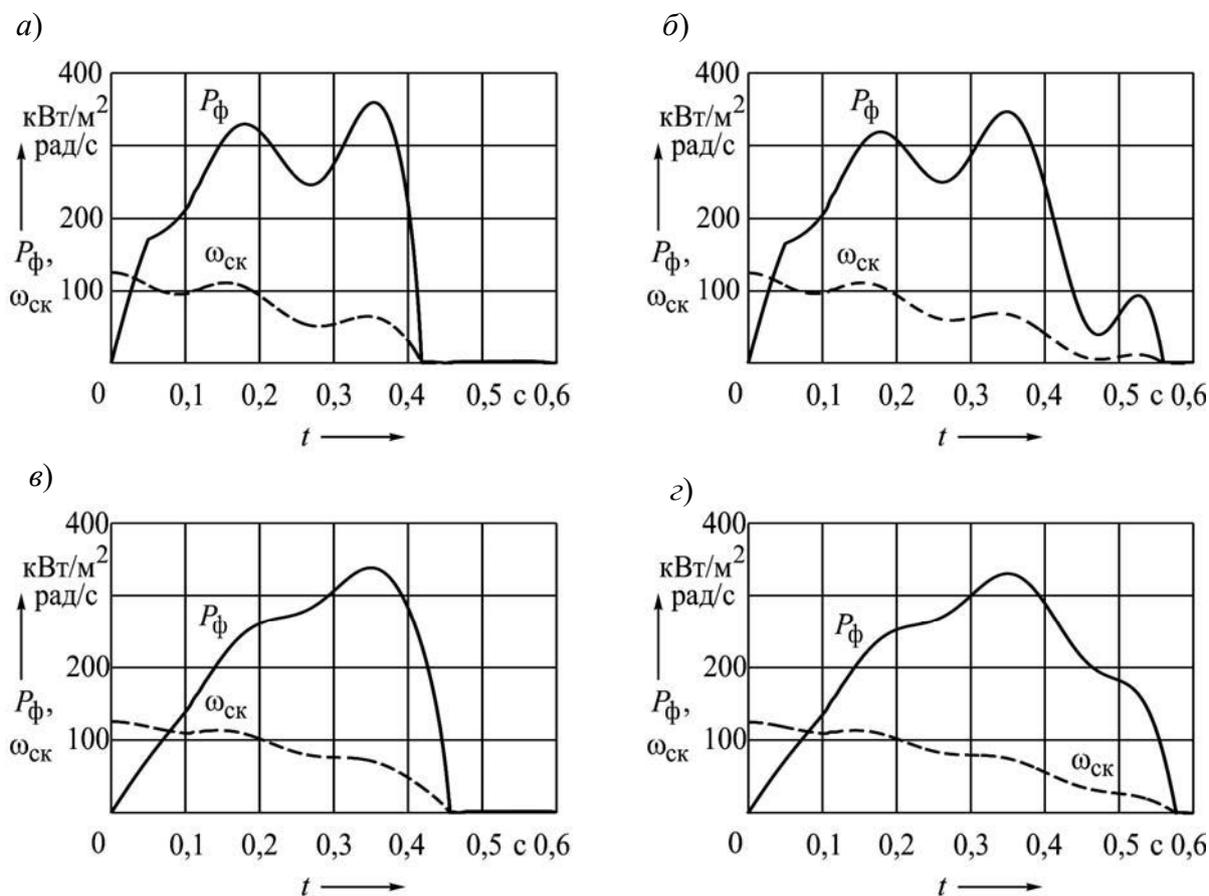


Рис. 6. Графики удельной мощности буксования фрикциона  $P_\phi$ , полученные при тех же условиях, что и графики на рис. 4

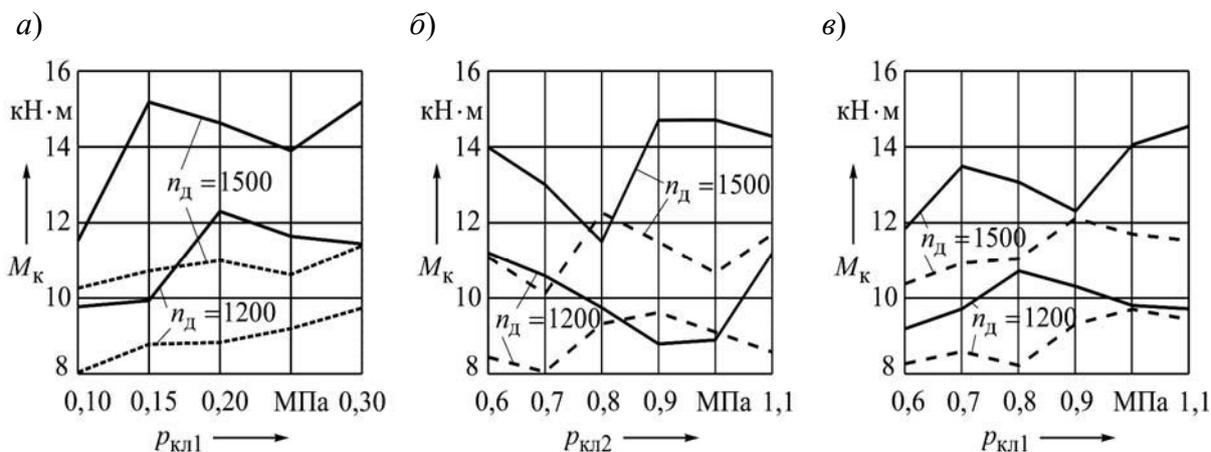


Рис. 7. Графики зависимостей момента нагрузки трансмиссии  $M_k$  при включении передачи от параметров характеристик давления

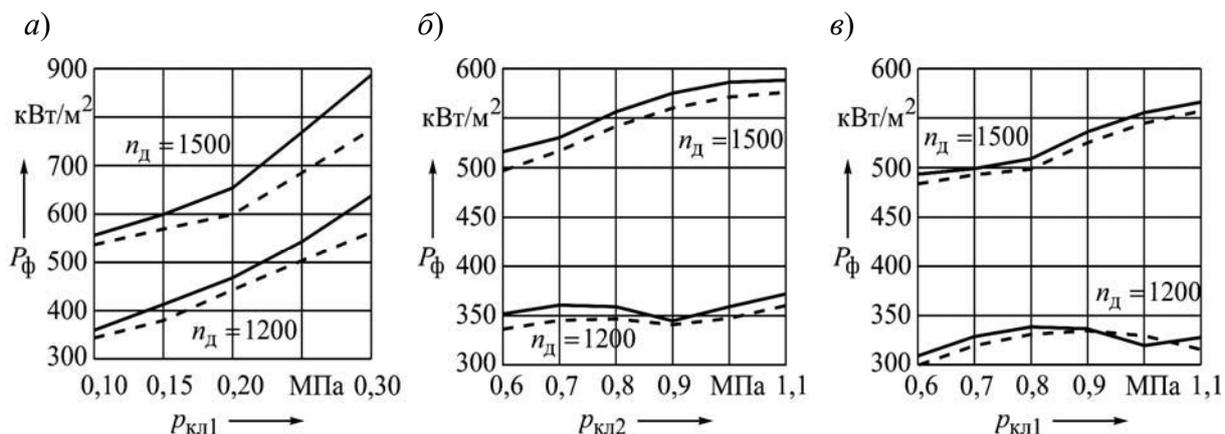


Рис. 8. Зависимости удельной мощности буксования фрикциона  $P_\phi$  при включении передачи от параметров характеристики давления

Графики на рис. 7, а–в также отражают значительное влияние на снижение  $M_K$  применение корректора давления (штриховые линии).

Графики изменения удельной мощности буксования фрикциона  $P_\phi$  в этих же условиях носят плавный характер (см. рис. 8, а–в). Как видно из рис. 8, а, начальный скачок давления  $p_{кл1}$  кусочно-линейной характеристики приводит к значительному увеличению  $P_\phi$ . При линейной характеристике давления

(см. рис. 8, в) значения  $P_\phi$  оказываются ниже, чем при кусочно-линейной.

На рис. 9, а–в приведены графики, отображающие зависимости момента  $M_K$ , удельной мощности  $P_\phi$  и удельной работы буксования фрикциона  $W_\phi$  от коэффициента экспоненты  $k_{ep}$  корректора давления при линейной характеристике  $p_{кл}(t)$  и различных значениях конечного давления  $p_{кл1}$ .

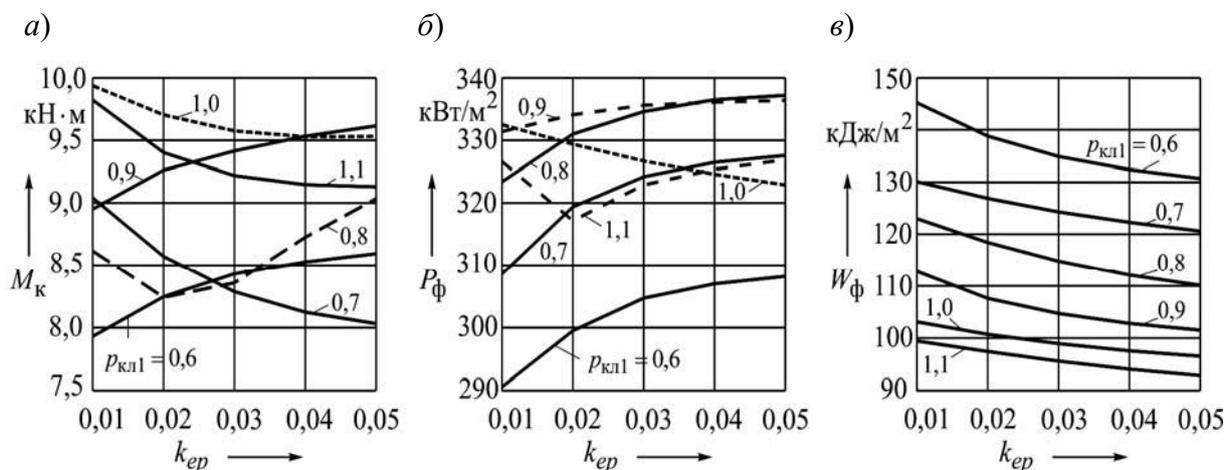


Рис. 9. Зависимости момента нагрузки трансмиссии  $M_K$ , удельной мощности  $P_\phi$  и удельной работы буксования  $W_\phi$  от параметров характеристики управления давлением фрикциона

Из приведенных графиков видна высокая зависимость оценочных критериев нагрузочного режима фрикциона  $M_k$ ,  $P_f$  и  $W_f$  от параметров характеристики управления им. Оценим вначале влияние параметра  $p_{кл1}$ . С увеличением  $p_{кл1}$  значения  $M_k$  и  $P_f$  возрастают, а  $W_f$  снижается. Снижение  $W_f$  обусловлено сокращением времени буксования фрикциона при повышении давления  $p_{кл1}$ . Значение  $p_{кл1}$  выбирают из условия ограничения времени буксования фрикциона в пределах  $t_6 = 0,6 \dots 0,8$  с. В связи с этим величина  $p_{кл1}$  должна быть переменной, зависящей от уровня загрузки автомобиля и дорожных условий.

Значения оценочных критериев  $M_k$ ,  $P_f$  и  $W_f$  также зависят от параметров корректора давления  $k_{ep}$  и  $k_{\omega}$ . С увеличением  $k_{ep}$  момент нагрузки трансмиссии  $M_k$  и удельная работа буксования  $W_f$  снижаются, а удельная мощность буксования  $P_f$  возрастает. Для исследуемого объекта приемлемое значение  $k_{ep}$  находится в пределах  $0,02 \dots 0,03$ .

Значение параметра  $k_{\omega}$  формулы (4) можно принять из условия компенсации разности между значениями коэффициента трения  $\mu_k$  и  $\mu_0$ . В анализируемом примере было принято  $k_{\omega} = 0,3$ .

## Заключение

1. На основе математического моделирования выполнены исследования по оценке влияния параметров характеристик управления фрикционами гидромеханической передачи на критерии качества переходного процесса при трогании автомобиля с места. Рассмотрены кусочно-линейная и линейная характеристики гидропривода управления фрикционами при переменном коэффициенте трения в процессе буксования фрикциона, характерном для металлической пары трения.

2. Показано, что интенсивный подъем давления на начальном участке кусочно-линейной характеристики в совокупности с практически двукратным увеличением коэффициента трения в заключительной фазе буксования фрикциона представляют собой основные причины больших динамических нагрузок в трансмиссии автомобиля.

3. При линейной характеристике управления давлением амплитуды колебаний скоростей и ускорений масс трансмиссии существенно меньше, чем при кусочно-линейной, поэтому и динамические нагрузки меньше. Удельная мощность и работа буксования фрикциона также оказываются ниже.

4. Компенсацию отрицательного влияния переменного коэффициента трения можно обеспечить посредством корректировки давления характеристики управления. Предложена математическая модель корректора давления и функциональная схема ее реализации, на основе которой можно составить алгоритм и программу работы контроллера МСАУ по управлению фрикционами в процессе переключения передач.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасик, В. П. Влияние характеристик управления фрикционами гидромеханической передачи на показатели эффективности их функционирования / В. П. Тарасик, О. В. Пузанова // Автомобильная промышленность. – 2020. – № 11. – С. 4–11.
2. Диагностирование гидромеханических передач мобильных машин: монография / Н. Н. Горбатенко [и др.]; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. П. Тарасика. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 511 с.

3. **Тарасик, В. П.** Переключение передач карьерного самосвала с гидромеханической передачей / В. П. Тарасик, Ю. С. Романович // Автомобильная промышленность. – 2018. – № 8. – С. 12–20.

4. **Тарасик, В. П.** Методика проектирования механизма управления фрикционами гидромеханической передачи на основе математического моделирования процесса его функционирования / В. П. Тарасик, В. С. Савицкий // Грузовик. – 2016. – № 6. – С. 3–12.

5. **Тарасик, В. П.** Математическая модель теплопередачи в дисковых фрикционах переключения передач трансмиссии / В. П. Тарасик // Автомобильная промышленность. – 2016. – № 9. – С. 15–21.

*Статья сдана в редакцию 14 мая 2021 года*

**Владимир Петрович Тарасик**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.  
Тел.: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

**Ольга Владимировна Пузанова**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
Тел.: +375-29-634-57-04.

**Vladimir Petrovich Tarasik**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.  
Phone: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

**Olga Vladimirovna Puzanova**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
Phone: +375-29-634-57-04.

---

УДК 621:787

*В. К. Шелег, А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко*

---

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ СОВМЕЩЕННЫМ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКИМ НАКАТЫВАНИЕМ**

---

UDC 621:787

*V. K. Sheleg, A. M. Dovgalev, I. A. Taradeiko*

---

**INCREASING THE ACCURACY OF NON-RIGID FERROMAGNETIC PARTS PROCESSING BY USING COMBINED MAGNETODYNAMIC ROLLING**

---

**Аннотация**

В работе приведены результаты исследований точности обработки нежестких ферромагнитных деталей при совмещенном магнитно-динамическом накатывании. Определены диапазон изменения диаметрального размера отверстия стальных заготовок, упрочненных совмещенным магнитно-динамическим накатыванием, и качество точности диаметрального размера. Установлено повышение точности формы поперечного сечения тонкостенных ферромагнитных заготовок. Впервые представлен разработанный авторами метод совмещенного магнитно-динамического накатывания, обеспечивающий повышение размерной точности.

**Ключевые слова:**

накатывание, деформирующий шар, комбинированный инструмент, постоянный магнит, размерная точность, нежесткая деталь, форма поперечного сечения, шероховатость, поле рассеивания диаметрального размера.

**Abstract**

The paper presents the results of research into the accuracy of processing non-rigid ferromagnetic parts using combined magnetodynamic rolling. The range of variation in the diametric size of holes in steel blanks hardened by combined magnetodynamic rolling has been determined, as well as the accuracy quality of the diametric size. An increase in the accuracy of cross-sectional shape of thin-walled ferromagnetic workpieces has been established. The method of combined magnetodynamic rolling, which provides an increase in dimensional accuracy, is presented by the authors for the first time.

**Keywords:**

rolling, deforming ball, combination tool, permanent magnet, dimensional accuracy, non-rigid part, cross-sectional shape, roughness, scattering field of diameter size.

---

**Введение**

Повышение точностных и качественных характеристик изготавливаемых нежестких деталей машин является важной технологической задачей, решение которой обеспечивает увеличение долговечности создаваемых современных технических систем [1].

В машиностроении размерную и

геометрическую точность нежестких ферромагнитных деталей (далее – деталей) обеспечивают методами механической обработки, предусматривающими снятие с их поверхности слоя металла (припуска на обработку). К таким методам относятся точение, шлифование, хонингование, суперфиниширование, магнитно-абразивное полирование и др.

Качественные же характеристики

поверхностного слоя деталей обеспечивают на финишных операциях технологического процесса, применяя, как правило, статические и динамические методы поверхностного пластического деформирования [2, 3].

В последние годы в связи с активным развитием высокоточных технологий и размерной нанобработки, требующих изменения размеров заготовок от нескольких микрометров до нанометров, возрос интерес к методам поверхностного пластического деформирования, которые, наряду с высокими качественными и эксплуатационными свойствами поверхности деталей, повышают размерную и геометрическую точность [4].

К числу таких методов относится и совмещенное магнитно-динамическое накатывание (СМДН), при котором на поверхностный слой ферромагнитной детали одновременно воздействуют вращающимся магнитным полем и колеблющимися деформирующими шарами, осуществляющими импульсно-ударное деформирование [5–7].

Метод СМДН позволяет получить на детали антифрикционный наноструктурированный поверхностный слой, характеризующийся высокими качественными и эксплуатационными свойствами [8, 9].

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время отсутствуют сведения о точностных возможностях разработанного метода СМДН, что сдерживает его применение в производстве при изготовлении высокоточных деталей. В связи с этим проведение исследований точности обработки деталей при СМДН является своевременной и актуальной задачей.

### ***Изменение диаметрального размера внутренней поверхности нежестких ферромагнитных втулок***

При проведении исследований точности обработки внутреннюю по-

верхность нежестких ферромагнитных втулок (далее – втулок) упрочняли СМДН на фрезерном станке с ЧПУ мод. FSS-400 с применением специального комбинированного инструмента.

В качестве заготовок использовали втулки с размерами ( $D \times d \times h$ ) –  $125 \times 110 \times 40$  мм, материал втулок – сталь 45 различной твердости.

Отверстия втулок предварительно растачивали в размер  $\varnothing 110H8^{+0,054}$  мм на станке 16К20Ф3. Режимы растачивания:  $V = 108$  м/мин;  $S = 0,15$  мм/об;  $t = 0,25$  мм. Материал режущей части инструмента – Т15К6. Шероховатость внутренней поверхности втулок после растачивания  $Ra = 3,0 \dots 3,2$  мкм.

Параметры применяемого комбинированного инструмента: диаметр деформирующих шаров – 12 мм; материал деформирующих шаров – ШХ 15 (62...65 HRC); материал цилиндрических постоянных магнитов – Nd Fe B; размер применяемых цилиндрических магнитов ( $D \times h$ ) –  $15 \times 5$  мм; количество магнитов, осуществляющих воздействие на деформирующие шары, – 22 шт.; количество цилиндрических постоянных магнитов, осуществляющих намагничивание поверхностного слоя упрочняемых втулок, – 32 шт.; материал магнитопроводов – сталь Ст 3.

Режимы процесса СМДН: частота вращения инструмента ( $1600 \dots 4000$  мин<sup>-1</sup>); осевая подача инструмента – 40 мм/мин; величина индукции магнитного поля, действующего на деформирующие шары, – 0,350 Тл; величина индукции вращающегося магнитного поля, действующего на поверхность втулки, – 0,130...0,135 Тл; радиальный зазор между упрочняемой поверхностью нежесткой втулки и кольцевыми магнитопроводами инструмента – 0,3 мм; количество рабочих ходов инструмента – один; смазочно-охлаждающая жидкость – масло индустриальное 45.

Базирование втулок осуществляли в специальном технологическом приспособлении, установленном на столе

станка и обеспечивающем приложении усилия закрепления в их торец.

Изменение диаметрального размера  $\Delta D$  втулок определяли на основе

сравнения профилограмм исходной и упрочненной СМДН поверхности. Результаты исследований представлены на рис. 1.

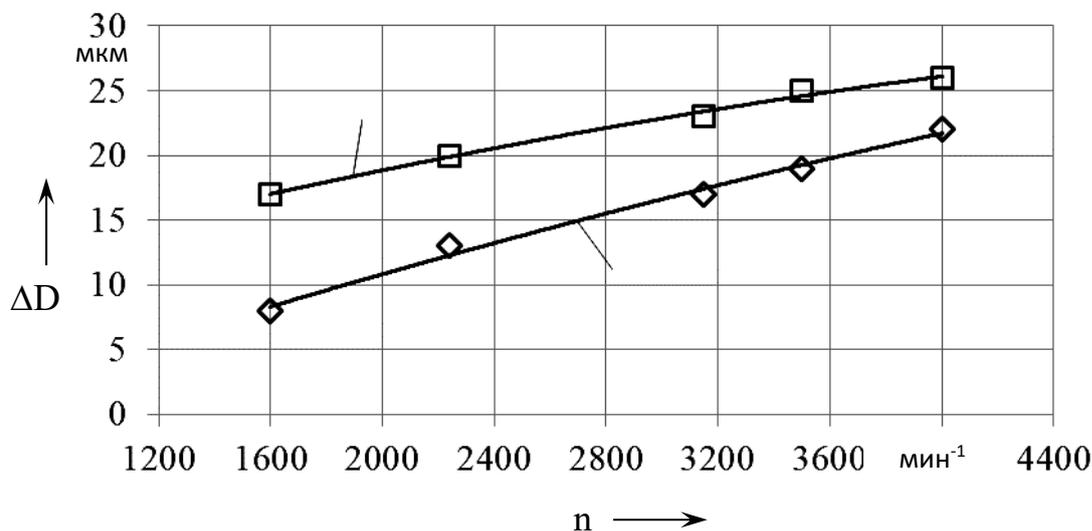


Рис. 1. Изменение диаметрального размера внутренней поверхности втулок от частоты вращения инструмента при СМДН:  $Ra_{\text{неч}} = 3,2...3,0$  мкм;  $d = 12$  мм;  $S = 40$  мм/мин; 1 — сталь 45 (190...200 НВ); 2 — сталь 45 (30...35 HRC)

Анализ результатов исследований показал, что диапазон изменения диаметрального размера внутренней поверхности втулок составляет: для стали 45 (190...200 НВ) — 17...26 мкм, для стали 45 (30...35 HRC) — 8...22 мкм.

#### **Исследование точности диаметрального размера внутренней поверхности нежестких ферромагнитных колец**

Для выявления технологических возможностей метода СМДН были проведены статистические исследования точности получения диаметрального размера внутренней поверхности нежестких ферромагнитных колец (далее — колец) после их растачивания и последующего упрочнения совмещенной обработкой.

Обрабатывали партию колец в количестве 100 шт., размеры колец ( $D \times d \times h$ ) — 125 × 110 × 20 мм, мате-

риал колец — сталь 45 (190...200 НВ).

Отверстия колец перед совмещенной упрочняющей обработкой растачивали в размер  $\varnothing 110$  мм на станке модели 16К20Ф3 на режимах, указанных выше. Шероховатость внутренней поверхности колец после растачивания  $Ra = 3,0...3,2$  мкм.

Диаметральный размер заготовок после растачивания и последующей обработки СМДН измеряли прибором для контроля внутреннего диаметра колец подшипников УД-2В-2М, оснащенный головкой измерительной пружинной (микрокатором) 2ИГПВГ ГОСТ 28798–90 с диапазоном измерений  $\pm 60$  мкм. Цена деления измерительной головки — 0,002 мкм.

С помощью положений математической статистики были построены эмпирические кривые распределения диаметрального размера отверстия колец после соответствующей обработки и определены их статистические характе-

ристики: среднее арифметическое значение диаметального размера  $\bar{X}$ , среднее квадратическое отклонение диаметального размера  $S$ . В соответствии с

этим строили эмпирические кривые распределения диаметального размера отверстия колец после их обработки точением и СМДН (рис. 2).

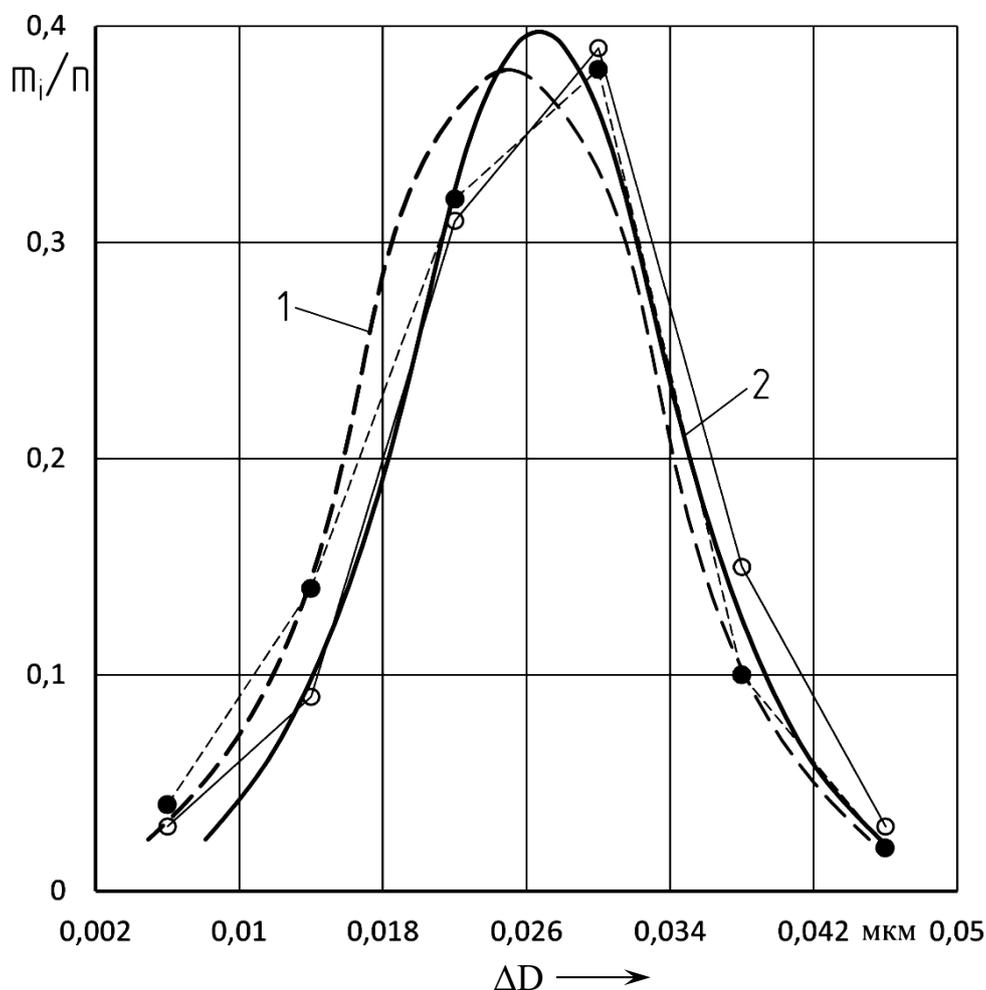


Рис. 2. Исследование точности диаметального размера отверстия обработанных колец: 1 – после растачивания; 2 – после СМДН

Для определения близости распределения диаметального размера отверстий партии расточенных колец к теоретическому закону нормального распределения были использованы критерии согласия  $\lambda$  (критерий А. Н. Колмогорова) и  $\chi^2$  (критерий Пирсона). Критерии согласия  $\lambda$  и  $\chi^2$  определяли расчетным путем по известным методикам [10–13]. Согласно расчетам, критерии согласия имели следующие значения:  $\lambda = 0,306$ ;  $\chi^2 = 1,818$ .

Статистические характеристики распределения диаметального размера отверстия партии колец после растачивания составили  $\bar{X}_1 = 0,025$  мм;  $S_1 = 0,0084$  мм.

Сравнение фактического поля рассеивания диаметального размера отверстия колец ( $6\sigma = 0,050$  мкм) с полями допусков, в которое оно укладывается, показало, что растачивание обеспечивает 8-й квалитет точности получения диаметального размера (в соответствии

с ГОСТ 25346–82).

Затем внутреннюю поверхность отверстия партии расточенных колец упрочняли СМДН на следующих режимах:  $V = 1209$  м/мин ( $n = 3500$  мин<sup>-1</sup>);  $S = 20$  мм/мин; индукция вращающегося магнитного поля, действующего на упрочняемую поверхность колец, – 0,130...0,135 Тл; количество рабочих ходов инструмента – один; смазочно-охлаждающая жидкость – масло индустриальное 45.

Основные параметры применяемого для СМДН комбинированного инструмента представлены выше.

Шероховатость поверхности колец после упрочнения СМДН составила по параметру  $Ra$  0,42...0,40 мкм.

Для определения близости эмпирического закона распределения диаметрального размера отверстий партии колец, упрочненных СМДН, к теоретическому закону нормального распределения также использовали критерии согласия  $\lambda$  и  $\chi^2$ . Расчетные критерии согласия для колец, упрочненных СМДН, составили  $\lambda = 0,309$ ;  $\chi^2 = 1,825$ .

Статистические характеристики распределения диаметрального размера отверстия колец после упрочнения СМДН  $\bar{X}_2 = 0,028$  мм;  $S_2 = 0,0079$  мм.

Поле рассеивания диаметрального размера внутренней поверхности колец после СМДН ( $6\sigma = 0,047$  мм) несколько меньше, чем после обработки растачиванием, но также соответствовало 8-му качеству точности (в соответствии с ГОСТ 25346–82).

Таким образом, результаты статистических исследований позволили установить, что метод СМДН не изменяет исходную точность диаметрального размера отверстия нежестких стальных колец, полученную после растачивания. Это подтверждает гипотезу о том, что при СМДН деформирующие шары комбинированного инструмента взаимодействуют с упрочняемой поверхностью заготовки по «упругой» схеме.

### **Исследование точности формы поперечного сечения тонкостенных ферромагнитных цилиндров**

Характеристика обрабатываемых тонкостенных ферромагнитных цилиндров (далее – цилиндров): материал – сталь 45 (190...200 НВ); размеры ( $D \times d \times h$ ) – 114 × 110 × 80 мм.

Погрешность геометрической формы поперечного сечения обрабатываемых цилиндров определяли как разность между максимальным и минимальным значениями диаметральных размеров обработанного отверстия. Измерение отклонения диаметра отверстия цилиндров осуществляли с помощью прибора УД-2В-М, описанного ранее.

Исследовали точность формы поперечного сечения трех партий цилиндров (по 100 штук в каждой), внутреннюю поверхность которых обрабатывали по сравниваемым технологиям.

*Первая партия.* Внутреннюю поверхность цилиндров растачивали в размер  $\varnothing 110H8^{+0,054}$  мм на станке с ЧПУ 16К20Ф3. Режимы растачивания:  $V = 108$  м/мин;  $S = 0,15$  мм/об;  $t = 0,25$  мм; охлаждение – эмульсия. Материал режущей части – Т15К6; шероховатость обработанной поверхности  $Ra = 3,0...3,2$  мкм.

*Вторая партия.* Внутреннюю поверхность цилиндров первоначально растачивали в размер  $\varnothing 110H8^{+0,054}$  мм на режимах, указанных выше, с обеспечением шероховатости по параметру  $Ra = 3,0...3,2$  мкм. Затем внутреннюю поверхность цилиндров упрочняли СМДН.

*Третья партия.* После растачивания в размер  $\varnothing 110H8^{+0,054}$  мм (с достижением шероховатости поверхности по параметру  $Ra = 3,2...3,0$  мкм) внутреннюю поверхность цилиндров упрочняли алмазным выглаживанием на вертикально-фрезерном станке ВФ-130 с использованием специального инструмента.

Режимы алмазного выглаживания:  $P = 10$  Н;  $S = 80$  мм/мин;  $V = 60$  м/мин; радиус алмазного выглаживателя –

2,5 мм; количество алмазных выглаживателей – 2 шт.; схема установки алмазных выглаживателей к обрабатываемой поверхности – «упругая»; охлаждение – масло индустриальное 20.

При этом базирование и закрепление цилиндров при обработке поверхности отверстия СМДН и алмазным выглаживанием осуществляли в специальном технологическом приспособлении, обеспечивающем приложение силы закрепления в их торец.

С помощью положений математической статистики были построены эмпирические кривые распределения отклонений от круглости поперечного сечения обработанных цилиндров по сравниваемым технологиям и определены их статистические характеристики: среднее арифметическое значение  $\bar{R}$ ; среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ .

В соответствии с этим строили эмпирические кривые распределения погрешности формы поперечного сечения цилиндров для каждой из обрабатываемых партий (рис. 3).

Для определения близости эмпирического закона распределения погрешности формы обработанных цилиндров (отклонения от круглости в поперечном сечении) к теоретическому закону эксцентриситета (Релея) также были использованы критерии согласия  $\lambda$  (критерий А. Н. Колмогорова) и  $\chi^2$  (критерий Пирсона) [12].

Статистические характеристики распределения погрешности формы поперечного сечения цилиндров, обработанных по сравниваемым технологиям, составили:

– после растачивания отверстия  $\bar{R}_1 = 0,0096$  мм,  $S_1 = 0,0072$  мм;

– после растачивания отверстия и последующего упрочнения поверхности СМДН  $\bar{R}_2 = 0,0092$  мм,  $S_2 = 0,0063$  мм;

– после растачивания отверстия и последующего упрочнения поверхности алмазным выглаживанием  $\bar{R}_3 = 0,0104$  мм,  $S_3 = 0,0086$  мм.

Сравнение фактических полей расцеивания погрешности формы (отклонения от круглости) поперечного сечения обработанных по сравниваемым технологиям цилиндров ( $\Delta R = 3,44\delta$ ) с полями допусков, в которые они укладываются, показали, что методы обработки обеспечивают следующие качества точности (в соответствии с ГОСТ 24643–81):

– растачивание:  $\Delta\bar{R}_1 = 0,025$  мм – 8 квалитет ( $\delta = 0,025$  мм);

– растачивание и СМДН:  $\Delta\bar{R}_2 = 0,022$  мм – 8 квалитет ( $\delta = 0,025$  мкм);

– растачивание и алмазное выглаживание:  $\Delta\bar{R}_3 = 0,030$  мм – 9 квалитет ( $\delta = 0,040$  мм).

Анализ результатов экспериментальных статистических исследований позволяет сделать следующий вывод: СМДН внутренней поверхности тонкостенных цилиндров (по отношению к растачиванию) обеспечивает повышение точности формы их поперечного сечения на 10 %...12 %, а по отношению к упрочнению алмазным выглаживанием – на 25 %...27 %.

В соответствии с полученными результатами экспериментальных исследований СМДН рекомендуется применять для отделочно-упрочняющей обработки внутренней поверхности тонкостенных (нежестких) тел вращения из ферромагнитных материалов взамен операции алмазного выглаживания с целью повышения точности формы их поперечного сечения.

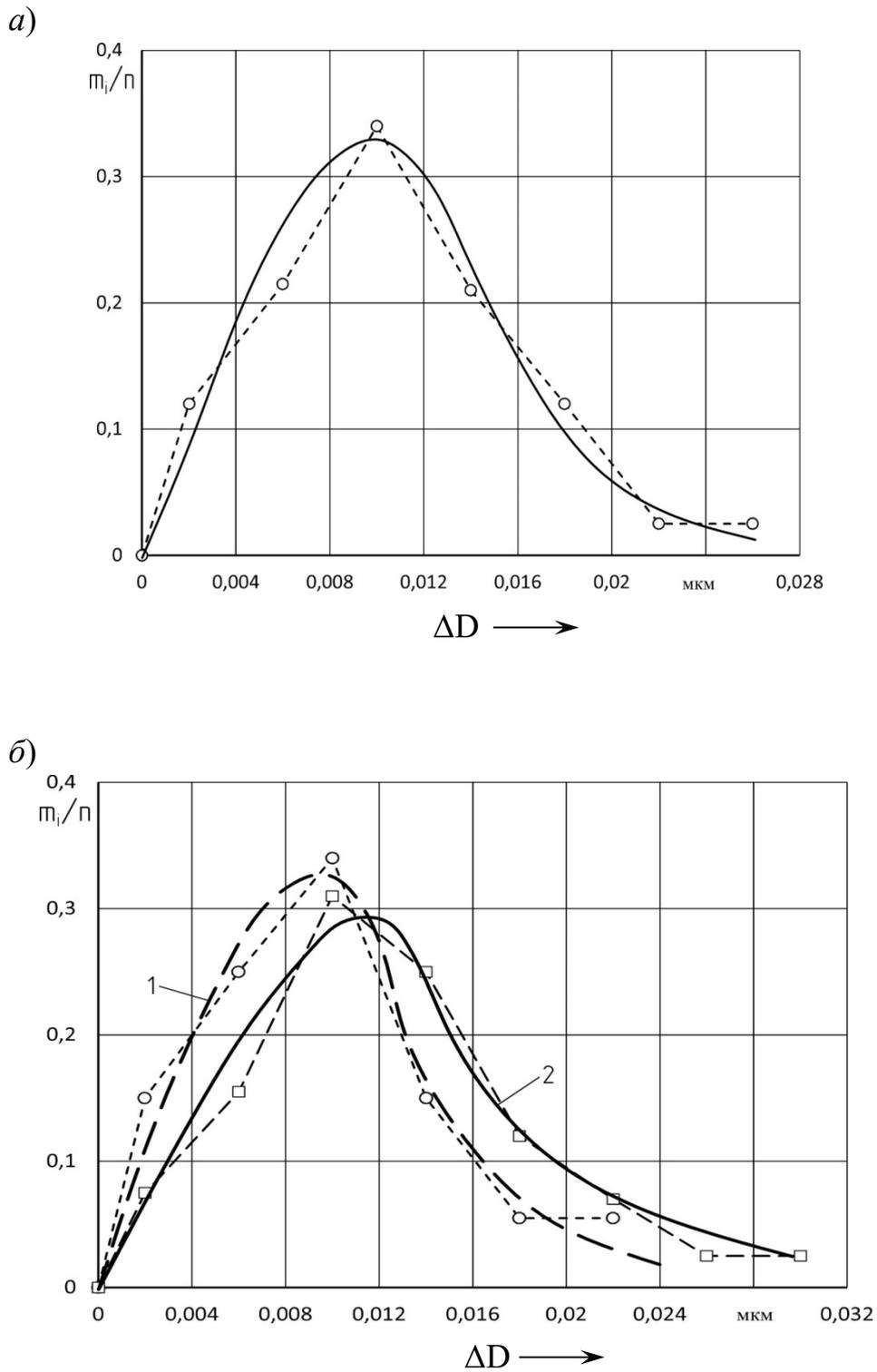


Рис. 3. Исследование точности формы поперечного сечения обработанных цилиндров: а – после растачивания; б – после СМДН и алмазного выглаживания; 1 – упрочнение СМДН; 2 – упрочнение алмазным выглаживанием

**Разработка метода СМДН,  
обеспечивающего повышение  
точности диаметрального размера  
внутренней поверхности  
ферромагнитных тел вращения**

Согласно разработанному методу, заготовки распределяют по группам в порядке возрастания их размеров, а затем каждую группу заготовок обрабатывают СМДН на рациональных режимах, обеспечивая тем самым требуемую величину (степень) деформации исходных микронеровностей их поверхностей, вызывающую соответствующее изменение диаметрального размера. *Первую группу* заготовок, имеющих наибольшие диаметральные размеры внутренней поверхности, обрабатывают с частотой вращения инструмента, обеспечивающей заданную чертежом шероховатость поверхности (как правило, с наиболее низкой частотой вращения комбинированного инструмента). *Вторую группу* заготовок, имеющих промежуточные значения диаметральных размеров внутренней поверхности, обрабатывают СМДН с наибольшей допустимой частотой вращения комбинированного инструмента. *Третью группу* заготовок, имеющих наименьшие диаметральные размеры внутренней поверхности, обрабатывают СМДН с наибольшей допустимой частотой вращения комбинированного инструмента, причем осуществляют два и более рабочих ходов комбинированного инструмента.

В случае, если исходная шероховатость внутренней поверхности заготовок, полученная на предыдущих операциях технологического процесса, соответствует требованиям чертежа, то первую группу заготовок, имеющих наибольшие диаметральные размеры внутренней поверхности, как правило, СМДН не обрабатывают.

Применение разработанного метода повышения точности диаметрального размера поверхности отверстия ферромагнитных нежестких тел вращения

предполагает предварительное получение экспериментальной зависимости шероховатости поверхности от частоты вращения комбинированного инструмента при обработке заготовок СМДН (с учетом твердости материала заготовок и исходной шероховатости поверхности), а также зависимости изменения шероховатости поверхности заготовок при упрочнении СМДН от числа рабочих ходов комбинированного инструмента (рис. 4).

При этом при деформации исходных микронеровностей поверхности заготовок СМДН изменение диаметрального размера определяется выражением

$$\begin{aligned} \Delta D_i &= 2(R_{Z_{исх}} - R_{Z_i}) = 2 \cdot 5 (R_{a_{исх}} - R_{a_i}) = \\ &= 10(R_{a_{исх}} - R_{a_i}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta D_i$  – изменение диаметрального размера отверстия заготовок при упрочнении СМДН;  $R_{Z_{исх}}$  и  $R_{a_{исх}}$  – исходная шероховатость поверхности заготовок по параметрам  $R_z$  и  $R_a$  соответственно;  $R_{Z_i}$  и  $R_{a_i}$  – требуемая шероховатость поверхности заготовок, заданная чертежом, по параметрам  $R_z$  и  $R_a$  соответственно.

Предположим, что при частоте вращения комбинированного инструмента  $n_1$  обеспечивается заданная чертежом шероховатость поверхности заготовки  $R_{a1}$  (см. рис. 4). Тогда изменение диаметрального размера отверстия заготовок

$$\Delta D_1 = 10(R_{a_{исх}} - R_{a1}).$$

Как видно из рис. 4 (зависимость 2), минимальная шероховатость поверхности заготовки (при максимальной деформации исходных микронеровностей), которая обеспечивается при СМДН за несколько рабочих ходов комбинированного инструмента, равна  $R_{a2}$  (достигается при частоте вращения инструмента  $n_5$ ).

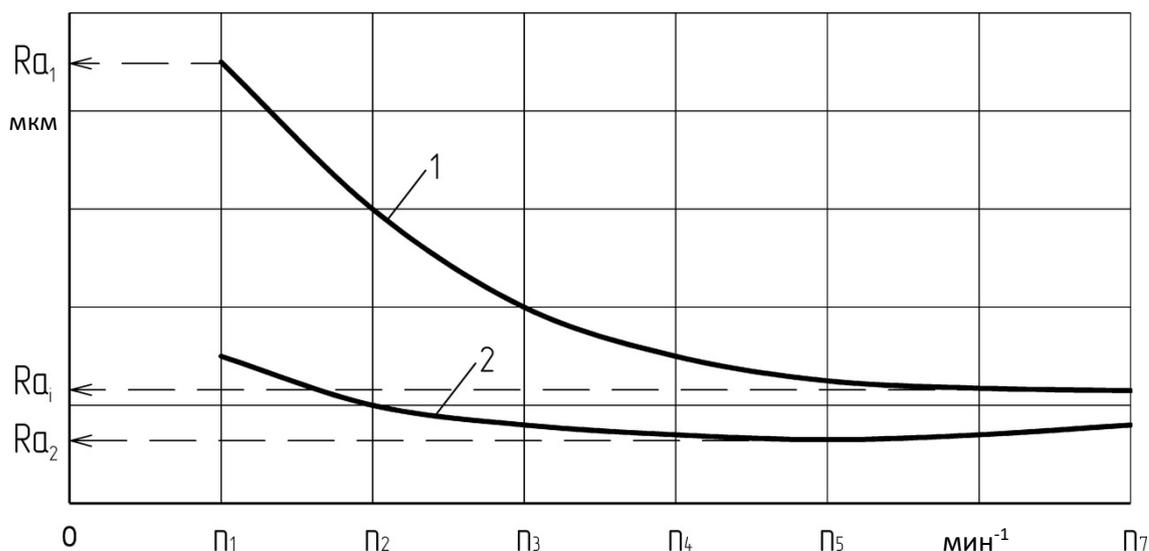


Рис. 4. Экспериментальные зависимости изменения шероховатости поверхности отверстия заготовок при обработке СМДН от частоты вращения инструмента (при исходной шероховатости поверхности заготовок  $Ra_{исх}$ ): 1 – упрочнение СМДН за один рабочий ход комбинированного инструмента; 2 – упрочнение СМДН за несколько рабочих ходов комбинированного инструмента

Тогда находим соответствующее этой шероховатости поверхности изменение диаметрального размера заготовок:

$$\Delta D_2 = 10(Ra_{исх} - Ra_2).$$

Причем  $\Delta D_2 > \Delta D_1$ , т. к. из рис. 4 следует, что  $Ra_1 > Ra_2$ .

Пусть распределение диаметрального размера отверстия заготовок после растачивания и последующего СМДН подчиняется закону нормального распределения и имеет вид, изображенный на рис. 5, где  $\omega_1$  – поле рассеивания диаметрального размера отверстия заготовок после растачивания (исходная точность);  $\omega_2$  – поле рассеивания диаметрального размера отверстия заготовок по разработанному методу СМДН.

В соответствии с рис. 5 поле рассеивания диаметрального размера отверстия заготовок после растачивания и последующей обработки СМДН

$$\omega_2 = \omega_1 \Delta D_2 + \Delta D_1. \quad (2)$$

После подстановки значений  $\Delta D_1$  и  $\Delta D_2$  выражение (2) принимает вид:

$$\omega_2 = \omega_1 + 10(Ra_2 - Ra_1). \quad (3)$$

В выражении (3) второе слагаемое меньше нуля, т. к.  $Ra_2 < Ra_1$ . Следовательно,  $\omega_2 < \omega_1$ . Таким образом, разработанный метод СМДН обеспечивает уменьшение поля рассеивания диаметрального размера обрабатываемых заготовок.

Разработанный метод СМДН (в зависимости от исходной шероховатости поверхности, твердости материала заготовок и величины допуска на размер) позволяет уменьшить поле рассеивания диаметрального размера отверстия обрабатываемых заготовок на 15 % ... 20 %.

Эффективность разработанного метода СМДН повышается с уменьшением поля допуска на диаметральный размер отверстия заготовок.

Разработанный метод СМДН наиболее целесообразно использовать в технологиях высокоточной обработки дета-

лей, требующих изменения диаметрального размера в микронном диапазоне.

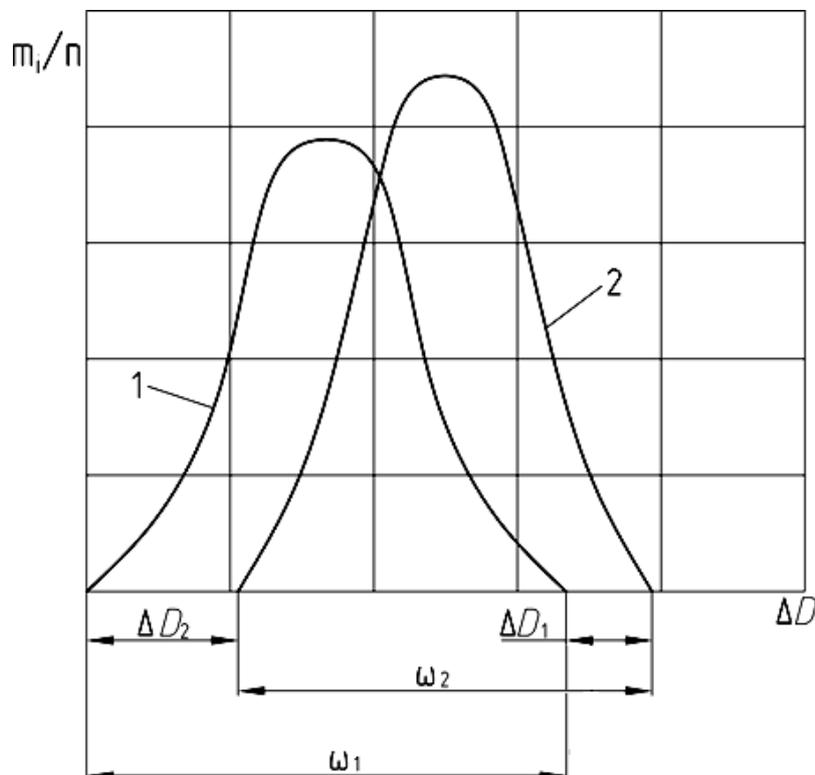


Рис. 5. Распределение диаметрального размера отверстия заготовок по сравниваемым технологиям: 1 – после растачивания отверстия; 2 – после растачивания и последующей обработки разработанным методом СМДН

### Заключение

В ходе исследований установлено, что метод СМДН (в зависимости от частоты вращения инструмента) изменяет диаметральный размер внутренней поверхности в следующих диапазонах: 17...26 мкм для втулок из стали 45 (190...200 НВ) и 8...22 мкм для втулок из стали 45 (30...35 HRC).

Установлено, что метод СМДН не изменяет исходный квалитет точности диаметрального размера отверстия обрабатываемой партии стальных нежестких колец, полученный после растачивания.

Выявлено, что метод СМДН внутренней поверхности тонкостен-

ных стальных цилиндров по отношению к растачиванию обеспечивает повышение точности формы их поперечного сечения на 10 %...12 %, а по отношению к упрочнению алмазным выглаживанием – на 25 %...27 %.

Разработан метод отделочно-упрочняющей обработки, при котором заготовки обрабатываемой партии разбивают на группы, а детали каждой группы обрабатывают СМДН на режимах, вызывающих требуемую степень деформации исходных микронеровностей. Метод позволяет уменьшить поле рассеивания диаметрального размера отверстия обрабатываемых нежестких ферромагнитных заготовок на 15 %...20 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ящерицын, П. И.** Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков. – Минск: Наука и техника, 1986. – 215 с.
2. **Смелянский, В. М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – Москва: Машиностроение, 2002. – 300 с.
3. Научные технологии в машиностроении / Под ред. А. Г. Сулова. – Москва: Машиностроение, 2012. – 528 с.
4. **Григорьев, С. Н.** Технологии нанообработки: учебное пособие / С. Н. Григорьев, А. А. Грибков, С. В. Алешин. – Старый Оскол : ТНТ, 2011. – 320 с.
5. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. RU 2068770 / А. М. Довгалева. – Опубл. 10.11.1996.
6. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. RU 2089373 / А. М. Довгалева. – Опубл. 10.09.1997.
7. **Довгалева, А. М.** Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А. М. Довгалева. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.
8. **Довгалева, А. М.** Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А. М. Довгалева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18–35.
9. **Шелег, В. К.** Исследование триботехнических свойств поверхностей деталей, упрочненных совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В. К. Шелег, А. М. Довгалева // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Т. 7. – С. 330–334.
10. **Кобзарь, А. Н.** Прикладная математическая статистика / А. Н. Кобзарь. – Москва: Физматлит, 2008. – 816 с.
11. **Горлач, Б. А.** Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие / Б. А. Горлач. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 320 с.
12. **Солонин, Н. С.** Математическая статистика в технологии машиностроения / Н. С. Солонин. – Москва: Машиностроение, 1972. – 215 с.
13. **Пашкевич, В. М.** Научные основы технологии машиностроения. Обработка и анализ экспериментальных данных: учебное пособие / В. М. Пашкевич. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – 236 с.

*Статья сдана в редакцию 26 апреля 2021 года*

**Валерий Константинович Шелег**, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Беларуси, Белорусский национальный технический университет. E-mail: sheleh\_v@tut.by.

**Александр Михайлович Довгалева**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-29-345-40-56. E-mail: rct@bru.by.

**Иван Анатольевич Тарадейко**, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-33-659-38-68. E-mail: IvanTaradeiko@yandex.ru.

**Valery Konstantinovich Sheleg**, DSc (Engineering), Prof., corresponding member of NSA Republic of Belarus, Belarusian National Technical University. Phone: +375-29-698-92-64. E-mail: sheleh\_v@tut.by.

**Alexander Mikhailovich Dovgalev**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-29-345-40-56. E-mail: rct@bru.by.

**Ivan Anatolievich Taradeiko**, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: +375-33-659-38-68. E-mail: IvanTaradeiko@yandex.ru.

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-83:621

*А. С. Коваль, А. Г. Кондратенко*

### МОДЕЛЬ БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛИФТА НА БАЗЕ НИЗКОСКОРОСТНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОТОКА

UDC 62-83:621

*A. S. Koval, A. G. Kondratenko*

### MODEL OF GEARLESS ELECTRIC DRIVE FOR ELEVATORS BASED ON A LOW-SPEED INDUCTION MOTOR WITH FLOW REGULATION

#### **Аннотация**

На основе структурной схемы в осях  $x$ - $y$  низкоскоростного высокомоментного асинхронного двигателя с ротором разработана модель двухзонного асинхронного электропривода. Представлены результаты моделирования работы электропривода по разработанной модели.

#### **Ключевые слова:**

низкоскоростной высокомоментный асинхронный двигатель с ротором, ослабление потока, регулирование скорости, составляющие напряжения статора, графики изменения момента, скорости, тока и потока.

#### **Abstract**

Based on the structural schematic in the  $x$ - $y$  axes of the high-torque low-speed induction motor with a rotor, a model of a two-zone asynchronous electric drive has been developed. The paper presents the results of modeling the operation of the electric drive developed.

#### **Keywords:**

high-torque low-speed induction motor with a rotor, flux attenuation, speed regulation, stator voltage components, curves of torque, speed, current and flux change.

Показана [1] возможность повышения энергоэффективности использования генераторных режимов в безредукторном электроприводе лифтов за счет увеличения скорости кабины при загрузке кабины лифта, отличающейся от номинальной. Так, увеличение скорости перемещения кабины в рекуперативном режиме на 20 % при нагрузке, например, характерной для подъема незагруженной кабины лифта в среднестатистической поездке на три этажа, приводит к увеличению энергии, передава-

емой на вал двигателя неуравновешенным грузом в рекуперативном режиме на 40 %. Реализуется эта возможность повышения энергоэффективности использования генераторных режимов в регулируемом электроприводе переменного тока с двухзонным регулированием скорости [2], обеспечивающим увеличение скорости выше номинальной при соответствующей нагрузке при ослаблении потока используемого двигателя. Использование безредукторного привода на базе СДПМ с поверхност-

ным расположением магнитов на роторе, применяемом сегодня в лифтах, при регулировании скорости выше номинальной при ослаблении потока при загрузке кабины, близкой к режиму холостого хода, сопровождается значительным ростом потерь в двигателе и соответствующим нагревом [3, 4], исключая его практическое применение в лифтах. В регулируемых безредукторных электроприводах переменного тока, применимых в лифтах, режим работы при ослаблении потока при допустимых потерях, практически возможен в приводах либо с асинхронными двигателями с короткозамкнутым (к. з.) ротором, либо с синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ) и встроенным расположением магнитов в роторе. Существуют разработки безредукторного регулируемого электропривода лифта на базе высокомоментного низкоскоростного асинхронного электродвигателя с к. з. ротором [5]. Такой двигатель может быть использован для реализации рассматриваемых в [1] генераторных режимов работы лифта с повышенной скоростью. Моделирование процессов работы высокомоментного низкоскоростного асинхронного электродвигателя в таких режимах работы лифта позволяет оценить потери в двигателе, энергоэффективность использования двигателя в этих режимах, а также характер переходных процессов, что важно для лифтов.

Уравнения электрического равновесия асинхронного электродвигателя с к. з. ротором в осях  $x$ - $y$  при ориентировании оси  $x$  вдоль вектора потокосцепления ротора и выражение момента двигателя имеют вид [4]:

$$U_{1x} = R_1 \cdot i_{1x} + L_{1x} \frac{di_{1x}}{dt} - \omega_1 \cdot L_1 \cdot i_{1y};$$

$$U_{1y} = R_1 \cdot i_{1y} + L_1 \cdot \sigma \cdot \frac{di_{1y}}{dt} + \omega_1 \cdot (L_{1x} \cdot i_{1x} + \Psi_{2x});$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot [\Psi_{2x} \cdot i_{1y} \cdot k_r];$$

$$\Psi_{2x} + T_2 \cdot \frac{d\Psi_{2x}}{dt} = L_{12} \cdot i_{1x},$$

где  $L_{1x}$ ,  $L_1$ ,  $L_{12}$  – индуктивность рассеяния, индуктивность фазы статора, взаимная индуктивность соответственно;  $\omega_1$  – электрическая частота вращения;  $p_n$  – число пар полюсов;  $\Psi_{2x}$  – потокосцепление ротора;  $R_1$  – сопротивление статора;  $\sigma$  – коэффициент рассеяния;  $k_r$  – коэффициент магнитной связи ротора,  $k_r = \frac{L_{12}}{L_2}$ ;  $T_2$  – электромагнитная постоянная времени цепи ротора,  $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$ .

Структурная схема, соответствующая этим уравнениям, показана на рис. 1.

На базе этой структурной схемы может быть разработана модель безредукторного асинхронного электропривода лифта с возможностью реализации работы со скоростью выше номинальной при ослаблении потока двигателя и оценен возможный диапазон регулирования увеличения скорости при сохранении допустимого теплового режима работы двигателя.

Существуют различные варианты схемных решений системы автоматического управления (САУ) электроприводом на базе АД с к. з. ротором, обеспечивающих переход привода в режим работы с ослаблением потока при увеличении скорости выше номинальной [6]. Так как номинальное напряжение  $U_{ном.}$ , формируемое на двигателе, определяется напряжением на выходе звена постоянного тока преобразователя частоты  $U_{dc}$  и способом реализации ШИМ инвертором, то, например, САУ приводом лифта может быть реализована с учетом ограничения накладываемого напряжением цепи постоянного тока,

питающего инвертор преобразователя частоты, на максимальное фазное напряжение питания асинхронного двигателя в соответствии с условием

$$U_d^2 + U_q^2 \leq U_s^2,$$

где  $U_s$  – амплитудное номинальное фазное напряжение двигателя,  $U_s = \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$ ;

$U_{dc}$  – напряжение на шине постоянного тока преобразователя частоты).

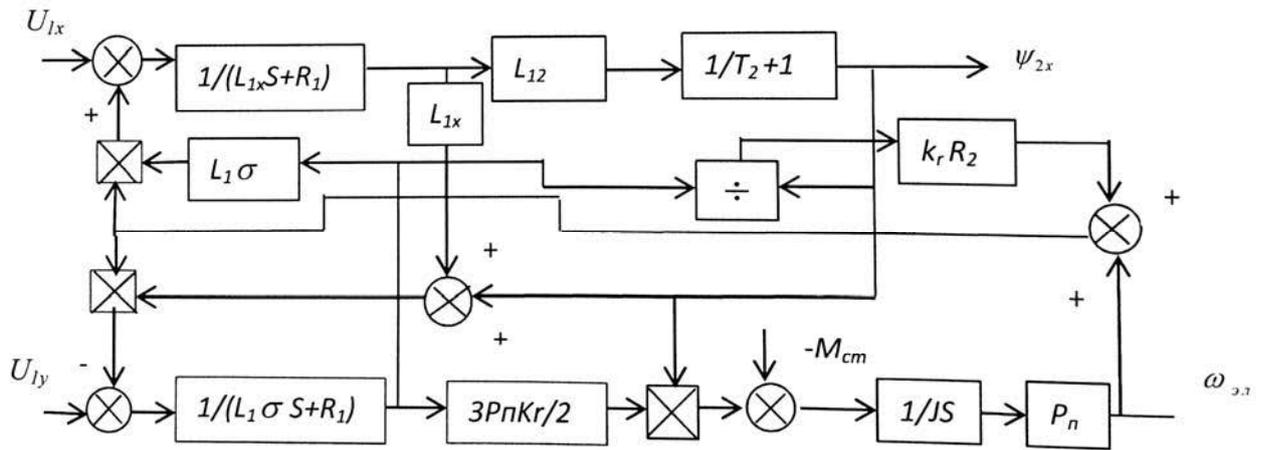


Рис. 1. Структурная схема асинхронного двигателя с к. з. ротором

Структурная схема системы автоматического управления электроприводом в осях  $x-y$ , реализующая этот вари-

ант при увеличении скорости регулирования вверх от номинальной, показана на рис. 2.

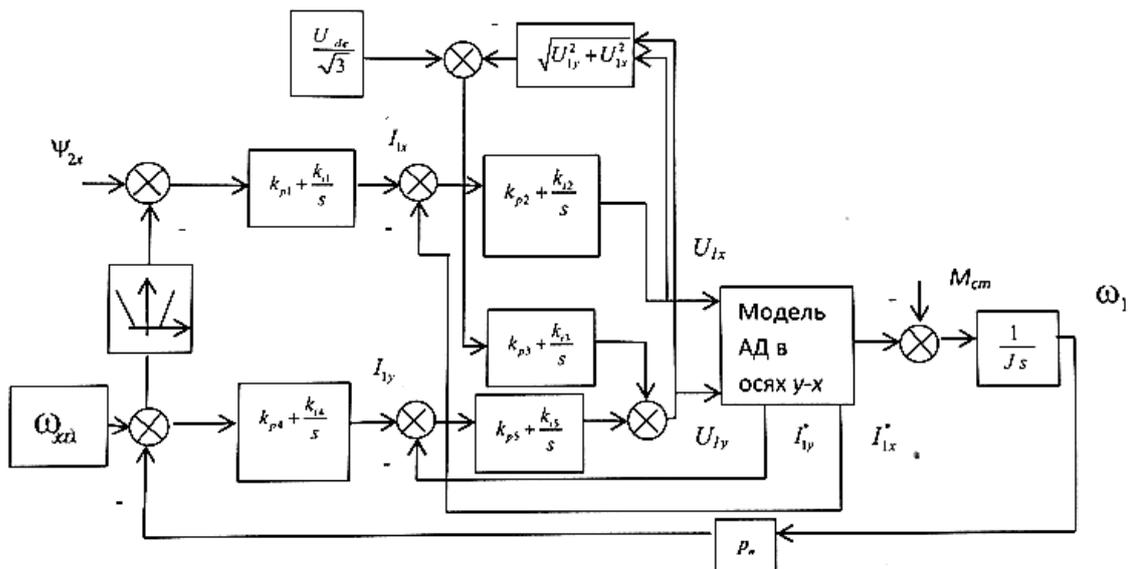


Рис. 2. Структурная схема САУ электроприводом в осях  $d-q$

С увеличением задания скорости двигателя выше  $\omega_{ном}$  ( $\omega_{ном}$  определяет зону нечувствительности элемента, запускающего в работу контур регулирования потока) привод переходит в режим регулирования с ослаблением потока за счет формирования составляющей тока  $i_x$  с сохранением напряжения на двигателе на уровне номинального. При превышении напряжением на двигателе значения  $U_s$  вступает в работу обратная связь по напряжению на двигателе, ограничивая составляющую напряжения  $U_{1y}$ .

Система регулирования построена с использованием принципа подчиненного регулирования с ПИ-регуляторами тока в контурах регулирования потока и

скорости и ПИ-регулятором в контуре ограничения напряжения. Настройки коэффициентов передачи используемых регуляторов рассчитаны по методике [7].

На основе структурной схемы электропривода (см. рис. 2) разработана в среде МАТЛАБ имитационная модель электропривода с параметрами механической подсистемы электропривода (без учета упругих связей), соответствующими безредукторному приводу пассажирского лифта г/п 630 кг, и скоростью движения 1 м/с (рис. 3). При моделировании использован низкоскоростной высокомоментный лифтовый асинхронный двигатель с расчетными параметрами, приведенными в табл. 1.

Табл. 1. Расчетные параметры асинхронного двигателя, использованные при моделировании

$J$ , кг·м <sup>2</sup>	$R_1$ , Ом	$M_{ном}$ , Н·м	$I_{ном}$ , А	$P_{ном}$ , Вт	$L_{12}$ , Гн	$L_{13}$ , Гн	$R_2$ , Ом	$\Psi_{ном}$ , Вб	$\Omega_{ном}$ , с <sup>-1</sup>	$U_{ф}$ , В
4,5	2,47	310	11,87	4071	0,979	0,219	1,82	4,36	12,1	208

Блок задания скорости Signal Bilder5 формирует требуемую тахограмму движения привода, обеспечивающую увеличение скорости привода на 20 % [1]. На схеме блок Step3 формируют команду на начало режима работы с контролем напряжения на двигателе. Увеличение скорости привода с ослаблением потока асинхронного двигателя на промежутке времени с 4,8 до 11,6 с на рис. 5–7. В модели применены ПИ-регуляторы тока и скорости с передаточными функциями, указанными на рис. 3. Нагрузка формируется блоком [8] (выход блока  $M_c$ ). Момент нагрузки 200 Н·м для случая работы привода как с постоянным потоком, так и с ослабленным. Остальные элементы модели обеспечивают функционирование привода в соответствии со схемой на рис. 2.

Результаты моделирования работы электропривода показаны на рис. 4–7.

Осциллограммы изменения регулируемых параметров моделируемого электропривода показывают работоспособность разработанной модели электропривода. Модель позволяет реализовать двухзонный режим работы электропривода с увеличением скорости двигателя выше номинальной при регулировании потока. Смоделирован режим работы при увеличении скорости на 20 % выше номинальной в режиме ослабления потока для нагрузки 200 Н·м. В отличие от СДПМ с поверхностным расположением магнитов [3] в этом режиме для низкоскоростного высокомоментного асинхронного электродвигателя ток двигателя не превышает номинальное значение.

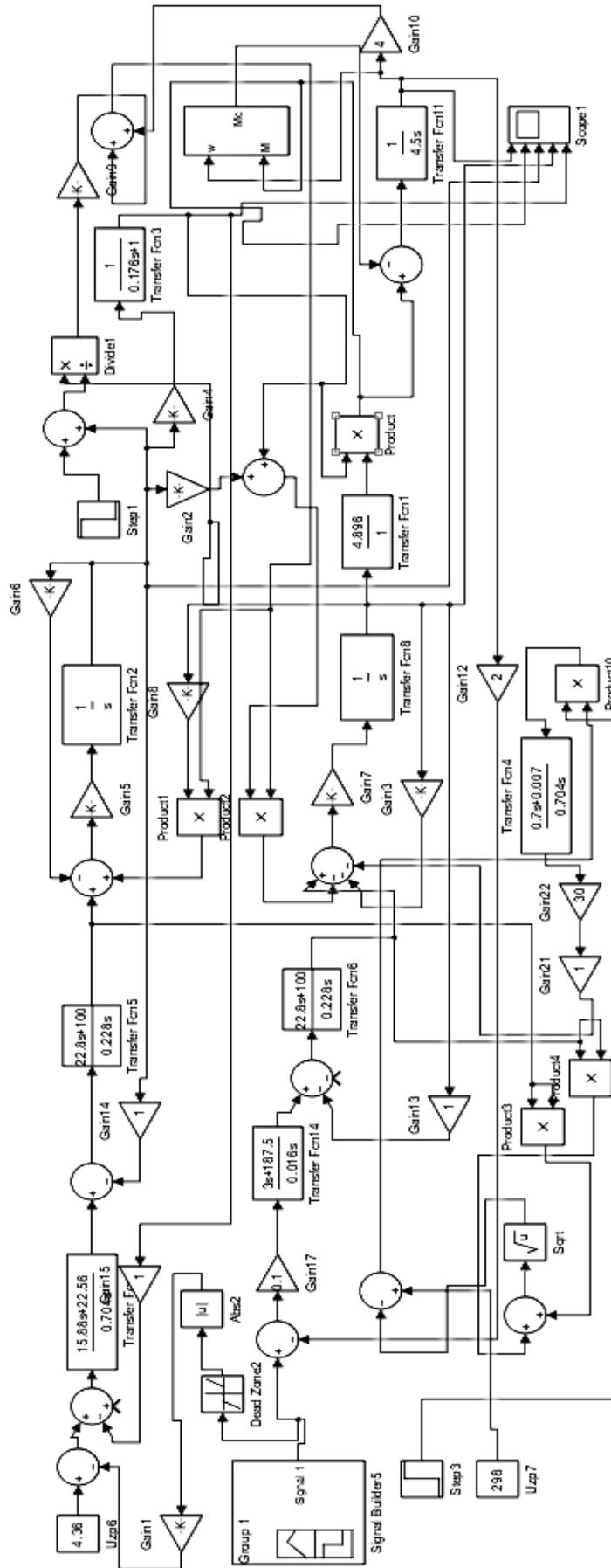


Рис. 3. Имитационная модель электропривода

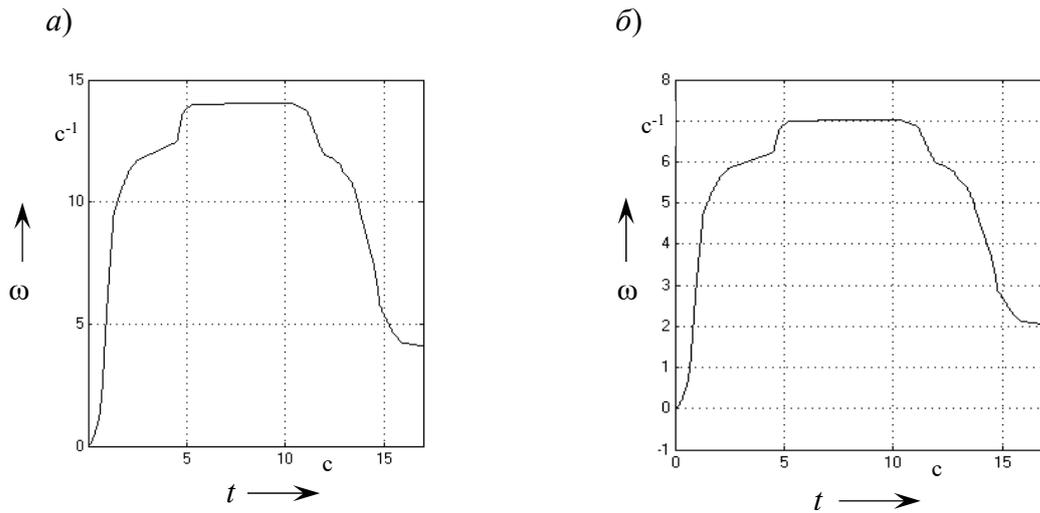


Рис. 4. Графики: *a* – тахограмма задания скорости; *б* – тахограмма скорости на модели

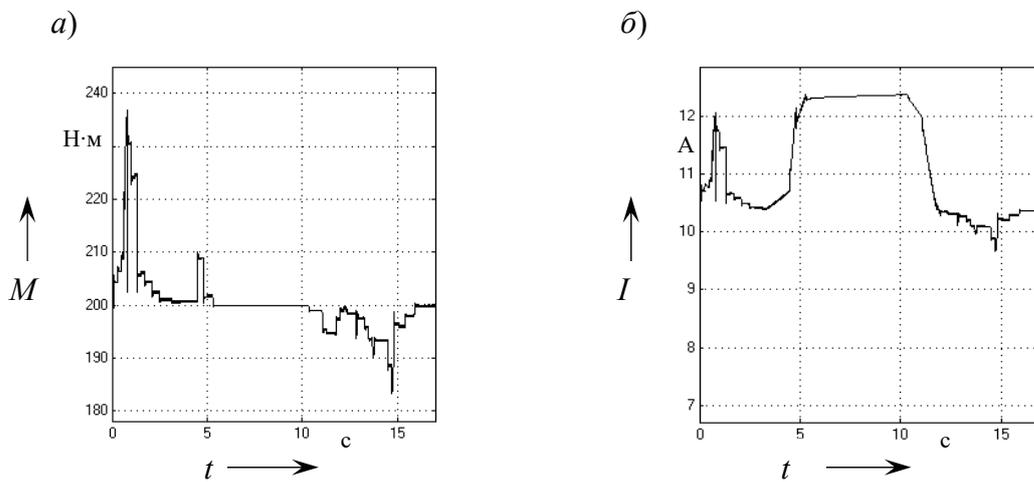


Рис. 5. Графики: *a* – изменения момента двигателя ( $M_{cm} = 200$  Н·м); *б* – изменения тока двигателя

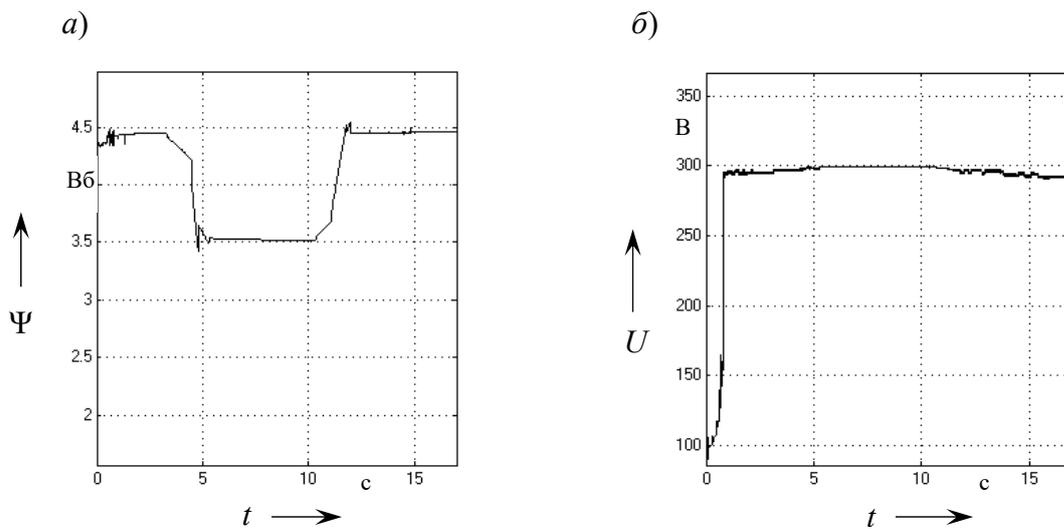


Рис. 6. Графики: *a* – изменения потока двигателя при  $M_c = 200$  Н·м; *б* – изменения максимального фазного напряжения на двигателе

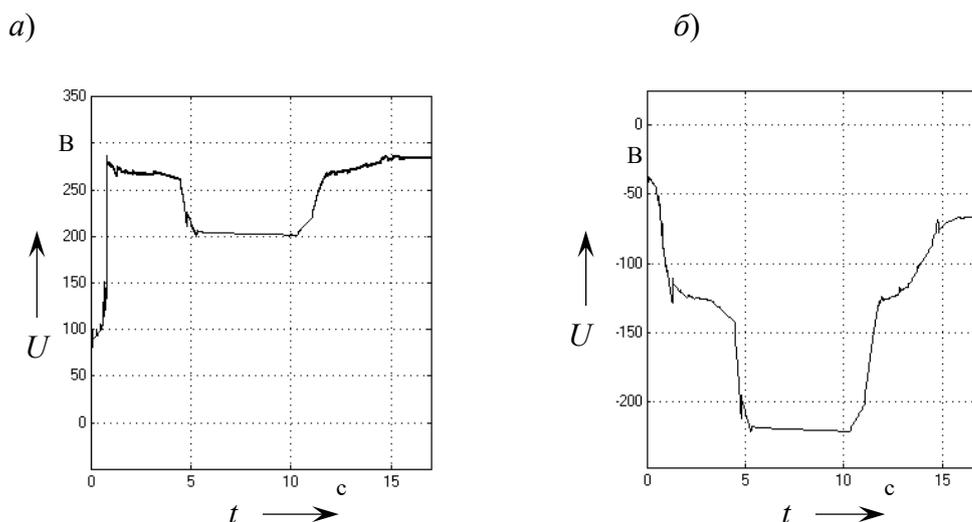


Рис. 7. Графики изменения составляющих напряжения по осям  $x$ – $y$  на двигателе при ослаблении потока при  $M_c = 200$  Н·м:  $a$  – составляющая напряжения  $U_y$ ;  $b$  – составляющая напряжения  $U_x$

Соответственно, этот тип двигателя может быть использован для реализации режима работы безредукторного привода лифта [1] с использованием повышенной скорости движения кабины лифта в рекуперативных режимах.

Таким образом, разработана модель регулируемого двухзонного электропривода переменного тока на базе низкоскоростного высокомоментного асинхронного электродвигателя с системой автоматического управления регулированием потока двигателя при контроле напряжения на двигателе.

Моделирование режимов работы электропривода на базе лифтового низкоскоростного высокомоментного асинхронного электродвигателя показывает возможность реализации режимов работы электропривода с повышенной скоростью перемещения кабины лифта при ослаблении потока двигателя и допустимых потерях в двигателе (неполная загрузка кабины лифта). Эта модель как базовая позволяет для безредукторного асинхронного привода лифта моделировать основные режимы работы лифта [9] при отработке заданной тахограммы движения кабины

лифта с возможностью оценки повышения энергоэффективности использования генераторных режимов в безредукторном электроприводе лифтов при увеличенной скорости перемещения кабины лифта.

### Выводы

Предложена модель двухзонного регулируемого электропривода переменного тока на базе низкоскоростного высокомоментного асинхронного электродвигателя с системой автоматического управления регулированием потока двигателя при контроле напряжения на двигателе. Эта модель позволяет для безредукторного асинхронного привода лифта моделировать основные режимы работы лифта при отработке заданной тахограммы движения кабины лифта. Моделирование режимов работы электропривода на базе лифтового низкоскоростного высокомоментного асинхронного электродвигателя показывает возможность реализации генераторных режимов работы электропривода лифта с повышенной относительно номинального значения скоростью перемещения кабины лифта,

например на 20 %, при допустимых потерях в двигателе. Реализация этой возможности в рекуперативных режимах работы привода лифта, как показано в [1], способствует повышению энер-

гоэффективности использования генераторных режимов в безредукторном электроприводе лифтов и, соответственно, увеличению энергоэффективности лифта в целом.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль, А. С. К вопросу энергосбережения в электроприводе пассажирских лифтов с регулируемой номинальной скоростью движения кабины лифта / А. С. Коваль, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 49–55.
2. Фираго, Б. И. Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
3. Коваль, А. С. Модель электропривода на базе СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе и регулированием потока / А. С. Коваль, В. С. Яшин, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3. – С. 121–129.
4. Фираго, Б. И. Векторные системы управления электроприводами / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Минск: Вышэйшая школа, 2016. – 159 с.
5. Кругликов, О. В. К вопросу повышения технического уровня привода безредукторных лебедок с высокомоментными асинхронными электродвигателями / О. В. Кругликов // Электротехника. – 2013. – № 3. – С. 28–32.
6. Ping-Yi Lin. Control Technique for the Extension of DC-Link Voltage Utilization of Finite-Speed SPMSM Drives / Ping-Yi Lin, Yen-Shin Lai // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2012. – Vol. 59, № 9.
7. Синергетические методы управления сложными системами. Механические и электромеханические системы / А. А. Колесников [и др.]. – Москва: ЛИБРОКОМ, 2013. – 304 с.
8. Моделирование моментов нагрузки электродвигателей в MATLAB / Р. Т. Шрейнер [и др.] // Молодой ученый. – 2010. – Т. 1, № 8 (19).
9. Коваль, А. С. Моделирование двигательных и генераторных режимов работы безредукторного электропривода пассажирского лифта на базе СДПМ / А. С. Коваль, В. А. Яшин, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 1. – С. 86–93.

*Статья сдана в редакцию 5 апреля 2021 года*

**Александр Сергеевич Коваль**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
**Алексей Григорьевич Кондратенко**, аспирант, Белорусско-Российский университет.

**Aleksandr Sergeyevich Koval**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
**Aleksey Grigoryevich Kondratenko**, PhD student, Belarusian-Russian University.

---

УДК 004.02:621:628.9

*В. М. Ковальчук*

## ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПО ДОЗЕ ФЛИКЕРА

---

UDC 004.02:621:628.9

*V. M. Kovalchuk*

## ESTIMATION OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY BY THE DOSE OF FLICKER

---

### **Аннотация**

Существующие методы оценки электромагнитной совместимости по дозе фликера базируются на мере ощущения неустойчивого зрительного восприятия, вызванного лампой накаливания, яркость которой изменяется во времени и измеряется специальным прибором – фликерметром. Показано, что фликерметр, структура которого основана на чисто эмпирическом подходе к моделированию системы «колебания напряжения на зажимах лампы накаливания – мера зрительного ощущения», завышает требования к электромагнитной совместимости. Предлагается отказаться от квадратора на выходе взвешивающего фильтра фликерметра и за дозу фликера принимать меру, выраженную в долях порога заметности колебаний напряжения на зажимах ламп, динамические и статические характеристики которых зависят от их типа.

### **Ключевые слова:**

электромагнитная совместимость, фликерметр, доза фликера, светлота, модель «источник света – зрительный анализатор».

### **Abstract**

The existing methods for assessing electromagnetic compatibility by the dose of flicker are based on a measure of sensation of unstable visual perception caused by an incandescent lamp, the brightness of which changes over time and is measured by a special device called a flickermeter. It is shown that the flickermeter, whose structure is based on a purely empirical approach to modeling 'voltage fluctuations at the terminals of an incandescent lamp being a measure of visual sensation' system, significantly overestimates the requirements for electromagnetic compatibility. It is proposed that the quadrator be not used at the output of the flickermeter's weighting filter and, as the dose of flicker, the measure be taken which is expressed in fractions of the threshold of noticeability of voltage fluctuations at the terminals of lamps, the dynamic and static characteristics of which depend on their type.

### **Keywords:**

electromagnetic compatibility, flickermeter, flicker dose, brightness, light source – visual analyzer model.

---

### **Введение**

Под электромагнитной совместимостью понимается [14] возможность нормальной работы электроприемников в электрических сетях без нарушения показателей качества электрической энергии. Известно, что электроприемники с резко переменной нагрузкой (дуговые сталеплавильные печи, электро-

сварочное оборудование, прокатные станы и т. п.) вызывают в электрических сетях колебания напряжения или фликер (мерцание) светового потока электрических источников света, что приводит к нежелательным физиологическим и психическим реакциям работающих в условиях электрического освещения. Именно поэтому в отечественных и зарубежных стандартах на качество элек-

трической энергии всегда применяют показатели допустимых колебаний напряжения на зажимах осветительных приборов. Например, в отечественных стандартах до 1989 г. на качество электроэнергии использовался показатель в виде графика кривой допустимых размахов колебаний напряжения типа меандр от частоты их появления.

В современных стандартах [3, 4] используется более универсальный показатель – доза фликера, который применим для оценки как периодических, так и случайных колебаний напряжения.

### Основная часть

Под дозой фликера согласно [3] понимается мера ощущения неустойчивого зрительного восприятия, вызванного световым источником, яркость которого изменяется во времени и измеряется специальным прибором – фликерметром. Основу фликерметра [3] составляет взвешивающий фильтр (рис. 1) с передаточной функцией,  $F(s)$  моделирующий отклик зрительной системы человека на колебания напряжения в диапазоне частот  $f = 0,5 \dots 25$  Гц, подаваемых на газонаполненную электрическую лампу с биспиральной нитью накаливания (60 Вт, 230 В и/или 60 Вт,

120 В), как наиболее распространённую и восприимчивую к колебаниям напряжения источником света:

$$F(s) = \frac{K \omega_1 s}{s^2 + 2Ls + \omega_1^2} \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_3}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_4}\right)},$$

где  $s$  – комплексный оператор Лапласа;  $K = 1,74802$ ;  $L = 2\pi 4,05981 \text{ с}^{-1}$ ;  $\omega_1 = 2\pi 9,16494 \text{ с}^{-1}$ ;  $\omega_2 = 2\pi 2,27979 \text{ с}^{-1}$ ;  $\omega_3 = 2\pi 1,22535 \text{ с}^{-1}$ ;  $\omega_4 = 2\pi 21,9 \text{ с}^{-1}$ .

На выходе взвешивающего фильтра стоит блок квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты первого порядка с постоянной времени 0,3 с. Взвешивающий фильтр и блок квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты [3] являются моделью восприятия фликера системой «лампа – глаз – мозг человека» при подаче колебаний напряжения на эталонную лампу и выполняют две функции:

- 1) возводят в квадрат значения взвешенного сигнала фликера, моделируя нелинейность характеристик восприятия цепи «глаз – мозг»;
- 2) сглаживают сигнал, моделируя эффект накопления в памяти мозга.

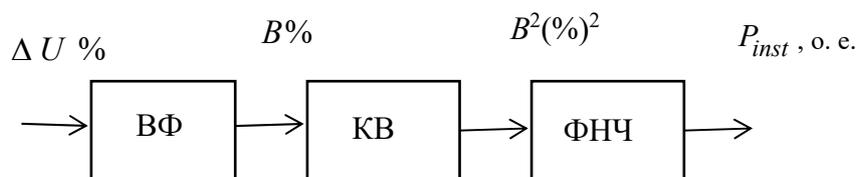


Рис. 1. Структурная схема фликерметра [3]: ВФ – взвешивающий фильтр; КВ – квадратор; ФНЧ – фильтр низкой частоты первого порядка с постоянной времени 0,3 с

Сигнал на выходе блока квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты обозначается как мгновенное значение фликера  $P_{inst}$ , единичное значение которого принимается за порог восприимчивости фликера человеком. Затем в режиме реального вре-

мени производится процедура статистической обработки  $P_{inst}$ , которая позволяет на интервале наблюдения 10 мин определить кратковременную дозу фликера  $P_{st}$ .

Статистический анализ основан на разбиении амплитуды сигнала, характе-

ризирующего мгновенное значение фликера, на определенное число классов. Каждый раз, когда уровень фликера достигает определенного значения, счетчик соответствующего класса добавляет единицу к имеющемуся числу. Таким образом, определяется функция частотного распределения значений  $P_{inst}$ . При выборе достаточно высокой частоты опроса получают в конце интервала измерения окончательный результат анализа, который представляет собой распределение длительностей уровней фликера в каждом классе.

Суммируя показания счетчиков всех классов и выражая показание счетчика каждого класса по отношению к общей сумме, получают функцию плотности вероятности уровня фликера. Из этой функции получают интегральную функцию вероятности, применяемую при осуществлении статистического анализа «время – уровень фликера».

С использованием интегральной

функции вероятности могут быть получены основные статистические характеристики фликера, такие как среднее значение, стандартное отклонение, уровень фликера, превышаемый в заданной части интервала наблюдения (в процентах), и относительное время, в течение которого уровень фликера превышает заданное значение.

При проведении статистического анализа в реальном времени сразу после получения результатов на кратковременном интервале (значение кратковременной дозы фликера) начинается анализ следующего временного интервала наблюдения, и результаты предыдущего интервала поступают на выход фликерметра.

Измерение на интервале наблюдения 10 мин позволяет определить кратковременную дозу фликера  $P_{st}$ , значение которой вычисляется по следующей эмпирической формуле:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_{1S} + 0,0657P_{3S} + 0,28P_{10S} + 0,08P_{50S}}, \quad (1)$$

где перцентили  $P_{0,1}$ ,  $P_{1S}$ ,  $P_{3S}$ ,  $P_{10S}$ ,  $P_{50S}$  – уровни фликера, значения которых были превышены, в течение 0,1 %, 1 %, 3 %, 10 % и 50 % времени за интервал наблюдения  $T_{short} = 10$  мин.

Индексы  $s$  в формуле указывают на сглаженные значения  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{50}$ , которые рассчитывают по следующим формулам:

$$P_{50S} = (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3;$$

$$P_{10S} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5;$$

$$P_{3S} = (P_{2,2} + P_3 + P_4)/3;$$

$$P_{1S} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})/3.$$

Интервал наблюдения 10 мин, применяемый при оценке кратковре-

менной дозы фликера  $P_{st}$ , удобен для оценки колебаний напряжения, создаваемых техническими средствами с коротким рабочим циклом.

В случаях, когда необходимо учитывать суммарный эффект нескольких нагрузок, создающих помехи случайным образом (например, сварочных аппаратов, электродвигателей), или принимать во внимание источники фликера с длительным и меняющимся рабочим циклом (например, дуговые электрические печи), следует оценивать длительную дозу фликера  $P_{lt}$ . Для этого длительную дозу фликера  $P_{lt}$  определяют на основе измерений кратковременных доз фликера  $P_{st}$  применительно к периоду наблюдения, связанному с длительным рабочим циклом нагрузки или периодом, в течение которого наблюдатель может воспринимать фликер,

например, двух часов, используя выражение

$$P_{it} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3},$$

где  $P_{sti}$  ( $i=1,2,\dots,12$ ) – последовательные значения кратковременной дозы фликера.

Как следует из [3, табл. 4], для получения ординат кратковременной дозы фликера  $P_{st}$ , о. е., вводится пропорциональное звено с коэффициентом передачи  $k_Y^2 = 1/256(\%)^2$  (на рис. 1 это звено не показано). Поэтому передаточные функции взвешивающего фильтра и блока квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты при испытаниях фликерметра обеспечивают на выходе прибора одинаковые значения:

– мгновенной дозы фликера  $P_{inst} = 1$  при подаче на вход колебаний напряжения типа меандр или синусоиды с размахом и частотой согласно [3, табл. 1 и 2];

– кратковременной дозы фликера  $P_{st} = 1$  при подаче на вход колебаний напряжения типа меандр с размахом и частотой [3, табл. 5].

Для решения практических задач электромагнитной совместимости по дозе фликера используются методы непосредственного измерения, аналитические и моделирования [5–9, 14]. Наибольшие трудности встречаются при использовании аналитических методов. Точное вычисление реакции взвешивающего фильтра и блока квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты фликерметра (т. е. дозы фликера) на колебания напряжения, отличающиеся от синусоидальной формы, приводит к громоздким выражениям.

При использовании метода частичных реакций [7] процесс на выходе взвешивающего фильтра представляется суммой 11-ти слагаемых, а после

возведения в квадрат число слагаемых возрастает в 6 раз. Более громоздкие выражения получаются при использовании рядов Фурье для разложения процесса на входе фликерметра. Метод [5], основанный на эмпирических формулах и графиках, не подтвержден точными методами.

Существенное усложнение аналитических расчетов вызывают и процедуры статистического взвешивания по формуле (1), и среднее кубическое усреднение кратковременных доз фликера  $P_{sti}$ , которые не имеют достаточного физического обоснования.

Широкое применение новых энергоэффективных источников света, таких как светодиодных и малогабаритных люминесцентных, вызвали справедливое сомнение [9] в использовании фликерметра [3] для оценки электромагнитной совместимости сети и таких ламп. Однако по данным [9] все обычные люминесцентные лампы оказались более восприимчивы к фликеру, чем лампы накаливания, что явно противоречит известным данным [2, 11].

Аналитические расчеты доз фликера показали [7], что испытательные и калибровочные сигналы, используемые для проверки функционирования фликерметра [3], выдают результат, существенно отличающийся от кривых допустимых размахов колебаний напряжения.

Эти недостатки фликерметра, по мнению автора, обусловлены:

– объединением во взвешивающем фильтре моделей двух объектов (лампа и зрительная система), структура и параметры которых определяются кибернетическим методом «черного ящика», по выходному логическому сигналу (заметно или незаметно), не имеющему количественной метрики;

– использованием в блоке квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты способа моделирования нелинейных преобразований и эффекта накопления в системе «зрение – мозг», который не подтвержден физиологиче-

скими исследованиями и по существу уже учтен во взвешивающем фильтре как модели всей системы зрения.

Для решения указанных проблем в первую очередь необходимо воспользоваться имеющимися подходами в моделировании зрительной системы [1, 12, 13]. В [1, 13] на основе кибернетического подхода была создана функциональная математическая модель зрения, описывающая статические и динамические процессы преобразования яркости зрительной картины в светлоту (степень ощущения) человека. Зрение, как любая система (биологическая или техническая), обладает инерционностью и адаптацией на входное воздействие, что делает связь между яркостью и ощущением нелинейной и динамичной.

В [12] был использован структурно-функциональный подход к созданию модели зрительного анализатора, структура которой повторяет анатомическое строение зрительного анализатора, начиная с моделей фоторецепторов сетчатки и заканчивая моделью нейронов коры головного мозга. При имитационном моделировании определялся временной интервал зрительного слияния двух отдельных световых импульсов надпороговой величины длительностью 0,2 с. Результаты моделирования хорошо совпали с натурными испытаниями. Однако непосредственное применение этой модели для оценки электромагнитной совместимости нецелесообразно из-за ее сложности и отсутствия объективной метрики показателя воздействия фликера.

В середине 1980-х гг. в Донецком политехническом институте, с участием автора и под руководством проф. Э. Г. Куренного, был разработан первый отечественный фликерметр [6, 14], структура которого практически повторена в [3].

Основные принципиальные отличия между этими фликерметрами следующие.

1. Взвешивающий фильтр фли-

керметра [6, 14] представляет собой функциональную модель системы «источник света – зрительная система», состоящую из модели лампы, представленной отдельным инерционным звеном первого порядка, с коэффициентом передачи  $\lambda$  и постоянной времени  $T_i$ , числовые значения которых зависят от типа источника света. Модель восприятия фликера воспроизводит инерционные и адаптационные процессы в зрительной системе аналогично [13] с передаточной функцией  $F(s)$ :

$$F(s) = \frac{\lambda \cdot \lg(e) \cdot s}{(T_i \cdot s + 1)(T_i \cdot s + 1)} \times \left( \frac{T_{a1}}{T_{a1} \cdot s + 1} + \frac{k \cdot T_{a2}}{T_{a2} \cdot s + 1} \right),$$

где  $s$  – комплексный оператор Лапласа;  $T_i$  – постоянная инерции восприятия фликера, принятая равной 0,016 с;  $T_{a1}$  и  $T_{a2}$  – постоянные адаптационных процессов, равные 0,016 и 70 с соответственно;  $k = 0,09$ .

Такой взвешивающий фильтр фликерметра [6, 14] оценивает воздействие фликера в более широком диапазоне от 0,001 до 25 Гц, что делает оценку электромагнитной совместимости более достоверной, поскольку фликер с частотой ниже 0,5 Гц также имеет отрицательное воздействие.

2. В значении постоянной времени низкочастотного фильтра блока квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты (4,4 мин против 0,3 с). Такой фильтр воспроизводит, установленный автором [6] экспериментально, эффект кумуляции отрицательного воздействия фликера на зрительную систему и человека в целом, объективно проявляющейся через  $\theta = 3 \cdot 4,4 \approx 10$  мин. Как показано в [8], сигнал на выходе этого фильтра эквивалентен кратковременной дозе фликера  $P_{st}$ .

Однако наличие в фликерметре [6, 14] блока квадратичной обработки на выходе взвешивающего фильтра недостаточно обосновано, поскольку до настоящего времени не существует однозначной и объективной метрики степени отрицательного воздействия (не восприятия) фликера на человека.

На основе опыта этих работ предлагаются следующие направления совершенствования фликерметра [3].

Разделить взвешивающий фильтр на два блока: модель источника света и модель восприятия фликера. Статические и динамические параметры модели ламп определить на основе эксперимента. Для упрощения структуры фликерметра и аналитических методов оценки электромагнитной совместимости при современных источниках света достаточно, как показано в [6, 7], учитывать только различие в статических параметрах ламп через поправочные коэффициенты  $\lambda$ .

Исключить из блока квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты квадратор, поскольку квадратичное соотношение между яркостью  $L$  и степенью ее восприятия зрением экспериментально не подтверждается и отсутствует в известных моделях [1, 12, 13]. Нелинейное преобразование яркости в светлоту  $B$  принято выражать через закон Вебера – Фехнера [1, 10]:

$$B - B_0 = \frac{1}{\varepsilon} \ln \frac{L}{L_{II}},$$

где  $B$  – светлота, измеренная в порогах  $\varepsilon = \Delta L/L$ ;  $L_{II}$  – пороговая яркость, где светлота  $B_0$  принимает значение 1.

Показано [10], что закон Вебера – Фехнера применим в диапазоне дневного освещения, когда порог  $\varepsilon$  постоянен и равен 0,007...0,008 о. е.

Включение процедуры логарифмирования во фликерметр необязательно. При небольшом диапазоне колебаний яркости  $\Delta L$  от базовой  $L_0$  логарифмирование можно заменить коэф-

фициентом  $1/(\varepsilon \cdot L_0)$ .

Для выполнения условия линеаризации логарифмического преобразования, примем за базовую номинальную яркость  $L_N = L_0$  при номинальном напряжении на зажимах лампы. Тогда преобразования изменения яркости  $\Delta L$  относительно номинального значения  $L_N$  в светлоту  $\Delta B$  примет вид:

$$\Delta B = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\Delta L}{L_N}.$$

Из этого уравнения видно, что заметное изменение ощущения ( $\Delta B > 1$ ) произойдет, если относительные изменения яркости  $\Delta L$  лампы и, соответственно, напряжения  $\Delta U$  на ее зажимах от номинальных значений превысят порог  $\varepsilon$ :

$$\frac{\Delta L}{L_N} > \varepsilon; \quad \frac{\Delta U}{U_N} > \frac{\varepsilon}{\lambda}.$$

Для ламп накаливания при  $\lambda \approx 3,6$  [14] пороговое изменение напряжения от номинального на ее зажимах будет не менее  $\Delta U \approx 0,195$  %. Это значение практически совпадает с минимумами всех известных кривых допустимых размахов колебаний напряжения типа меандр [3, 5, 9].

Таким образом, при подаче на вход фликерметра колебаний напряжения типа меандр с размахами  $\Delta U_M \approx 0,195$  % от номинального напряжения и частотой  $f = 8,8$  Гц размах сигнала на выходе взвешивающего фильтра фликерметра должен быть равен единице, т. е. порогу заметности фликера.

При подаче на вход фликерметра колебаний напряжения синусоидальной формы с такой же частотой размах сигнала на выходе взвешивающего фильтра должен достигать единичного значения,

если размах колебаний напряжения на входе, согласно [1], будет на  $\pi/2$  раз больше, чем при колебаниях напряжения типа меандр (т. е.  $\Delta U_S = 0,306 \%$ ).

Согласно [3, табл. 1], при частоте  $f = 8,8$  Гц порог заметности колебаний напряжения синусоидальной формы  $\Delta U_S = 0,25 \%$ , или на 22 % меньше. Такое завышение требований к электромагнитной совместимости фликерметром [3] вызвано тем, что мгновенная доза фликера  $P_{inst}$  пропорциональна не мгновенной, а среднеквадратичной доле порога заметности фликера  $\epsilon$ .

Поэтому сигнал на выходе взвешивающего фильтра можно принять за мгновенную дозу фликера, как меру изменений ощущения зрительного восприятия (светлоты), вызванного световым источником, яркость которого изменяется во времени, выраженную в долях порога заметности фликера.

Этот показатель можно использовать и для оценки допустимости фликера с помощью фликерметра с другими источниками света. Например, согласно данным [11], для люминесцентных ламп (ЛЛ) PHILIPS TL-D 18 Вт порог заметности КН будет не ниже  $\Delta U \approx 0,43 \%$ , для компактных ЛЛ «Промінь» 15 Вт –  $\Delta U \approx 0,7 \%$ , а для ЛЛ энергосберегающих MAX US 1 ELS-020 32 Вт –  $\Delta U \approx 1,03 \%$ , что в 3–5 раз больше, чем для ламп накаливания.

Исключение из взвешивающего фильтра фликерметра квадратора, кроме повышения достоверности оценки электромагнитной совместимости, существенно упрощает аналитические методы анализа и статистическую обработку данных фликерметром, поскольку при случайных колебаниях вид закона распределения сигнала на выходе фликерметра не меняется.

Предлагаемую метрику восприятия фликера можно использовать и для оценки допустимости фликера по степени его отрицательного воздействия на человека с помощью фликерметра, например, принятием допустимого уровня превышения порога заметности фликера, но это в настоящее время возможно только методами экспертной оценки на основе известных исследований.

### Заключение

1. Существующие методы оценки электромагнитной совместимости по дозе фликера базируются на фликерметре, моделирующем систему «колебания напряжения на зажимах лампы накаливания – мера зрительного ощущения», при применении современных источников света завышают требования к допустимым колебаниям напряжения в 3–5 раз.

2. Наличие квадратора на выходе взвешивающего фильтра фликерметра не подтвержден физиологическими исследованиями и приводит к результатам, противоречащим известным экспериментальным данным.

3. Замена квадратора на выходе взвешивающего фильтра фликерметра операцией умножения на коэффициент, обратно пропорциональный порогу заметности, позволяет принять дозу фликера как меру изменений ощущения зрительного восприятия, вызванного световым источником, яркость которого изменяется во времени, выраженную в долях порога заметности фликера.

4. Исключение из взвешивающего фильтра фликерметра квадратора, кроме повышения достоверности оценки электромагнитной совместимости, существенно упрощает аналитические методы анализа и статистическую обработку данных фликерметром.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бондаренко, М. Ф.** Модель инерции зрения / М. Ф. Бондаренко, С. Ю. Шабанов-Кушнарченко, Ю. П. Шабанов-Кушнарченко // Бионика интеллекта. – 2008. – № 1 (68). – С. 3–12.
2. Влияние качества питающего напряжения на параметры искусственного освещения рабочего места / Г. Я. Вагин [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3–2. – С. 247–252.
3. **ГОСТ 51317.4.15–2012 (МЭК 61000.4.15:2010).** Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 71 с.
4. **ГОСТ 32144–2013 (EN 50160:2010, NEQ).** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
5. **ГОСТ 30804.3.3–2013.** Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера в низковольтных системах электроснабжения общего назначения. Технические средства с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемые к электрической сети при несоблюдении определенных условий подключения. Нормы и методы испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 39 с.
6. **Kurenyy, E. G.** Assessment of flicker's action on the basis of synthesis of flickermeter block – scheme / E. G. Kurenyy, E. N. Dmitrieva, V. M. Kovalchuk // IEC TK77 WG4(NIKIFOROVA)99. – Paris, 1982. – P. 19.
7. **Дмитриева, Е. Н.** Погрешности расчета доз фликера напряжения и проверка функционирования фликерметра / Е. Н. Дмитриева, Э. Г. Куренный, В. А. Топчий // Электричество. – 2013. – № 2. – С. 28–33.
8. Совершенствование модели фликерметра / Э. Г. Куренный [и др.] // Электричество. – 2003. – № 2. – С. 17–23.
9. **Лисицкий, К. Е.** Совершенствование метода и средств оценки фликера при использовании источников света с разной чувствительностью к колебаниям напряжения в электрической сети / К. Е. Лисицкий // Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 5–6. – С. 55–66.
10. **Мешков, В. В.** Светлота и яркость / В. В. Мешков // Светотехника. – 1958. – № 12. – С. 1–5.
11. **Овчинников, С. С.** Влияние характеристик зрительного анализатора и параметров источников света на амплитудно-частотную характеристику восприятия колебаний освещенности / С. С. Овчинников, М. М. Татарник // Светотехника и электроэнергетика. – 2008. – № 3. – С. 30–34.
12. **Песошин, В. А.** Модель зрительного анализатора восприятия парных световых импульсов / В. А. Песошин, В. В. Роженов // Вестн. КГТУ им. А. Н. Туполева. – 2006. – № 1. – С. 12–16.
13. **Шабанов-Кушнарченко, Ю. П.** Математическое моделирование некоторых функций человеческого зрения / Ю. П. Шабанов-Кушнарченко // Проблемы бионики. – 1973. – № 1. – С. 39–45.
14. Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий / А. К. Шидловский [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1992. – 236 с.

*Статья сдана в редакцию 12 мая 2021 года*

**Владимир Михайлович Ковальчук**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-29-665-84-37. E-mail: vladmix@tut.by.

**Vladimir Mikhailovich Kovalchuk**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-29-665-84-37. E-mail: vladmix@tut.by.

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 534.86

*В. И. Борисов, А. С. Никитин, Е. Н. Прокопенко, С. С. Сергеев*

### АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ВИДЕ ДВУХМЕРНОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКИ

UDC 534.86

*V. I. Borisov, A. S. Nikitin, E.N. Prokopenko, S. S. Sergeev*

### ACOUSTIC RADIATION FIELD OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER IN THE FORM OF A TWO-DIMENSIONAL RECTANGULAR PHASED ARRAY

#### Аннотация

Методом численного анализа рассчитано акустическое поле излучения акустических преобразователей в виде квадратных двухмерных фазированных акустических решеток. Показано, что при изменении сдвига фаз на отдельных пьезоэлементах решетка может работать не только в режиме фокусировки акустических волн на акустической оси решетки, но и во внеосевых точках. В результате фокусировки в акустическом поле излучения решетки кроме основного акустического пучка в заданной точке пространства наблюдаются дополнительные пучки, по величине соизмеримые с основным.

#### Ключевые слова:

акустическое поле, акустическая фазированная решетка, пьезоэлектрический преобразователь, акустическая ось, дальняя зона, ближняя зона, акустическая волна, акустическое давление, фокальная плоскость, фокус.

#### Abstract

The acoustic radiation field of acoustic transducers in the form of square two-dimensional phased acoustic arrays is calculated by the method of numerical analysis. It is shown that when the phase shift on individual piezoelectric elements changes, the grating can operate not only in the mode of focusing acoustic waves on the acoustic axis of the grating, but also at off-axis points. As a result of focusing, in the acoustic field of grating radiation the additional beams are observed at a given point in space, in addition to the main acoustic beam, which are comparable in magnitude to the main beam.

#### Keywords:

acoustic field, acoustic phased array, piezoelectric transducer, acoustic axis, far zone, acoustic wave, acoustic pressure, focal plane, focus.

В настоящее время пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) в виде фазированных акустических решеток (ФАР) все больше применяются для решения задач неразрушающего акустического контроля материалов и технических изделий, т. к. они позволяют расширить функциональные и метрологиче-

ские характеристики физических измерений [1, 2]. Это достигается благодаря возможности динамической перестройки акустического поля излучения-приема. Конструктивные исполнения современных ФАР весьма разнообразны.

Приведены результаты расчета акустического поля излучения пьезо-

электрического преобразователя в виде плоской прямоугольной фазированной решетки, представляющей собой набор из 81 квадратной пьезопластинки. Схема пьезопреобразователя изображена на рис. 1. Пьезопреобразователь содержит девять рядов, каждый из которых содержит девять квадратных элементарных пьезопластин размерами  $1 \times 1$  мм, расположенных параллельно друг другу с зазором между рядами 0,5 мм.

Предполагается, что двухмерная ФАР позволит осуществить не только динамическую фокусировку ПЭП, но и

динамическое пространственное сканирование узкого акустического пучка в контролируемом объекте.

Расчеты акустического поля излучения проводились для непрерывного режима работы элементарных пьезопреобразователей, работающих на частоте 4,545 МГц, нагруженных на воду, что соответствует длине акустической волны 0,33 мм.

Результирующая величина давления в точке  $A$  с координатами  $X, Y, z$  будет пропорциональна следующему интегралу [3, 4]:

$$P(X, Y, z) = \int_S \frac{P_0}{R} \cos \varphi (\cos(\omega t - kR + \psi_i)) dS, \quad (1)$$

где  $R$  – расстояние от точечного излучателя площадью  $dS$ , расположенного в точке с координатами  $x, y, 0$ , до точки  $A$ ;  $k$  – модуль волнового вектора (волновое число),  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\lambda$  – длина волны в

материале среды, где распространяется акустическая волна;  $\varphi$  – угол, учитыва-

ющий наклон элементарной площадки  $dS$  к направлению на рассматриваемую точку;  $\psi_i$  – начальная фаза акустической волны, дополнительно вводимая при работе ПЭП в режиме фазированной решетки.

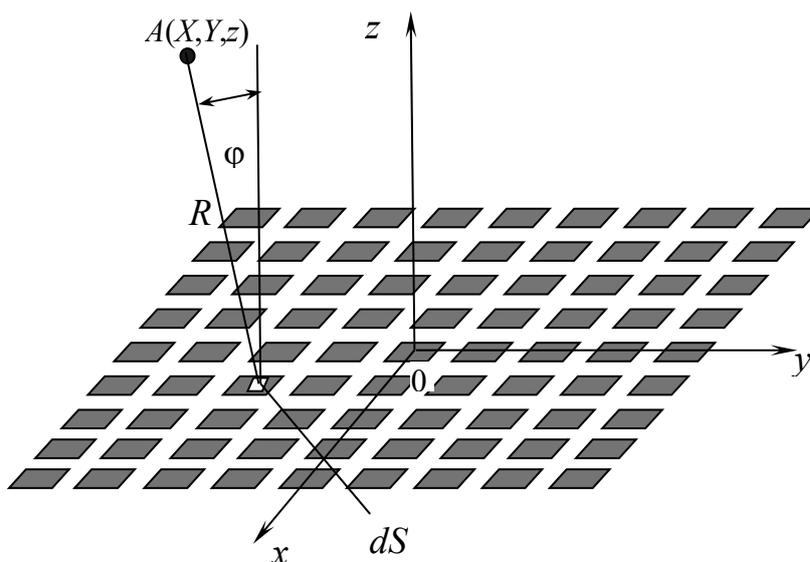


Рис. 1. Схема двухмерной фазированной решетки

Расчет интеграла (1) проводился по методике, приведенной в [5].

Для решения задачи фокусировки всех генерируемых акустических волн ПЭП в выбранной точке пространства на основании конструктивной схемы фазированной акустической решетки производится расчет расстояний от каждого элементарного излучателя ФАР до этой точки и с учетом скорости акустических волн определяются величины фазовых сдвигов при распространении акустических волн от конкретного излучателя до выбранной точки. После этого проводится коррекция начальных фаз на каждом элементарном излучателе таким образом, чтобы акустические волны, излучаемые отдельными квад-

ратными пьезоизлучателями, приходили в выбранную точку в одной и той же фазе. Считается, что выбранная точка и будет фокальной точкой ФАР.

К примеру, на рис. 2 приведено рассчитанное распределение акустического давления  $P$  вдоль акустической оси ПЭП  $z$  для различных случаев значений начальных фаз элементарных квадратных пьезоэлектрических излучателей. Считается, что акустическая ось ФАР совпадает с перпендикуляром, восстановленным от центра фазированной решетки, который в рассматриваемом случае совпадает с центром элементарного пьезоизлучателя, расположенного в пятом горизонтальном и вертикальном рядах фазированной решетки.

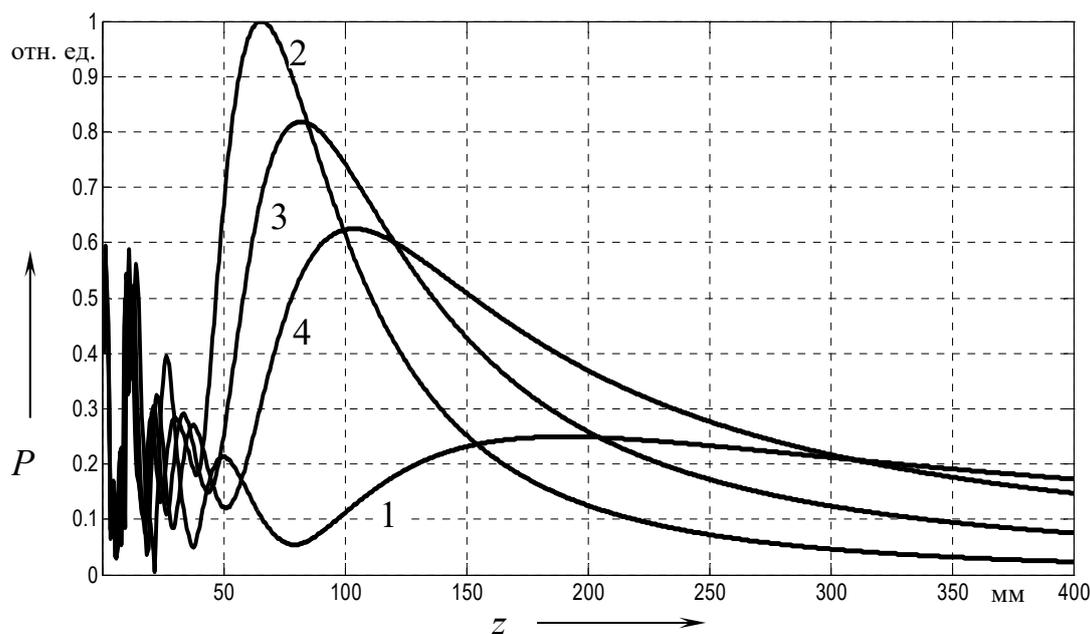


Рис. 2. Распределение давления акустических волн вдоль оси двумерной фазированной решетки для различных случаев значений начальных фаз элементарных излучателей: 1 – начальные фазы на всех элементарных квадратных пьезоэлементах имеют нулевое значение; 2 – начальные фазы пьезоэлементов выбраны для фокусировки волн на расстоянии 75 мм от плоскости ПЭП; 3 – начальные фазы пьезоэлементов выбраны для фокусировки волн на расстоянии 100 мм от плоскости ПЭП; 4 – начальные фазы выбраны для фокусировки волн на расстоянии 150 мм от плоскости ПЭП

Кривая 1 соответствует условию, когда начальные фазы на всех элементарных квадратных пьезоэлементах имеют нулевое значение.

Кривая 2 соответствует условию,

когда начальные фазы на элементарных пьезоэлементах выбраны таким образом, что излучаемые ими акустические волны приходят с одинаковой фазой в точку на акустической оси фазирован-

ной решетки, расположенную на расстоянии 75 мм от плоскости, где расположены элементарные пьезоизлучатели.

Кривая 3 соответствует условию прихода в одной и той же фазе акустических волн в точку на акустической оси фазированной решетки, расположенную на расстоянии 100 мм от плоскости, где расположены элементарные пьезоизлучатели.

Кривая 4 соответствует условию фокусировки акустических волн в точке на акустической оси фазированной решетки, расположенной на расстоянии 150 мм от плоскости, где расположены элементарные пьезоизлучатели.

Из рис. 2 видно, что для всех вышерассмотренных случаев наблюдается ближняя зона с немонотонным изменением давления акустических волн, а также максимумы давления и монотонное уменьшение давления в дальней зоне. При этом максимальное значение давления акустических волн для случая одинаковых начальных фаз на всех элементарных пьезоплощадках (кривая 1) наблюдается на расстоянии 185 мм от пьезопластин. Характерной особенностью акустического поля для рассматриваемой ФАР, работающей в режиме фокусировки акустических волн на акустической оси ПЭП, является то, что фокальная точка, где наблюдается максимум давления акустических волн, находится ближе к решетке пьезоэлементов, чем точка, для которой рассчитывалось фокусное расстояние. Так, из кривой 2 видно, что максимум давления акустических волн, соответствующий реальному фокусу, наблюдается на расстоянии 65 мм от пьезоэлементов, хотя рассчитываемое фокусное расстояние составляет 75 мм. Для фокусирующего режима работы ФАР, рассчитанной на фокусировку в точке, отстоящей на 100 мм от плоскости пьезопреобразователей, реальное фокусное расстояние составило 84 мм (кривая 3). Выбор же начальных фаз излучения на отдельных пьезопластинах ФАР для фокуси-

ровки на расстоянии 150 мм от пьезоэлементов показал, что максимум давления акустических волн в этом случае составляет 103 мм (кривая 4). Такой характер изменения акустического давления обусловлен тем, что акустические волны, излучаемые элементарными площадками  $dS$ , представляют собой волны со сферическим волновым фронтом, амплитуда которых убывает обратно пропорционально проходимому расстоянию. Сферический характер генерируемых акустических волн приводит также к тому, что эффективная перестройка фокусного расстояния наблюдается в диапазоне от 50 до 100 мм при изменении начальных фаз на элементарных пьезоизлучателях, рассчитанных на фокусировку акустических волн рассматриваемой ФАР с фокусным расстоянием от 75 до 150 мм.

Из рис. 2 также видно, что при увеличении фокусного расстояния амплитуда давления акустических волн уменьшается, что связано с убыванием амплитуды сферических волн с расстоянием и уширением пучка акустических волн. Так, диаметр акустического пучка в соответствующей фокальной плоскости по уровню половинной амплитуды для кривой 2 на рис. 2 составляет 2 мм, для кривой 3 – 2,54 мм, а для кривой 4 – 3,2 мм.

Характерной особенностью распределения акустического поля в плоскости, перпендикулярной акустической оси ФАР, является то, что кроме основного максимума на акустической оси наблюдается ряд дополнительных максимумов. К примеру, на рис. 3 приведено распределение давления акустических волн  $P$  в направлении оси  $x$  в плоскости, перпендикулярной акустической оси ФАР, отстоящей на расстоянии 185 мм от плоскости, где расположены элементарные пьезоизлучатели для случая, когда начальные фазы акустических волн, генерируемых элементарными пьезоизлучателями, имеют одинаковую фазу.

Из рис. 3 видно, что в плоскости, перпендикулярной акустической оси,

акустическое поле носит неоднородный характер. Вокруг основного максимума давления акустических волн, расположенного на акустической оси ПЭП, в радиусе 92 мм наблюдается ряд локальных максимумов, расположенных близко друг к другу. Наиболее интенсивные явно выраженные максимумы расположены на расстоянии 42 и 92 мм

от акустической оси ПЭП, величины которых составляют 39 % и 19 % от величины основного максимума. При дальнейшем увеличении расстояния от акустической оси ПЭП давление акустических волн спадает практически до нуля. Такая же картина распределения давления акустических волн наблюдается в этой же плоскости в направлении оси  $u$ .

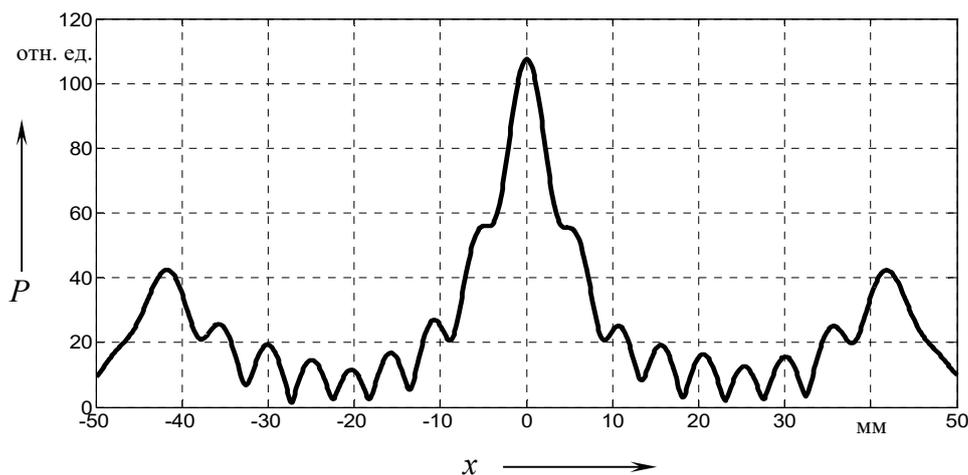


Рис. 3. Распределение давления акустических волн вдоль оси  $x$  в плоскости, перпендикулярной акустической оси ФАР, расположенной на расстоянии 185 мм от пьезопластин, при одинаковых значениях начальных фаз элементарных пьезоизлучателей

Несколько иной характер акустического поля наблюдается при работе ФАР в режиме осевой фокусировки. К примеру, на рис. 4 приведено распределение давления акустических волн  $P$  в направлении оси  $x$  в плоскости, где наблюдается максимальное давление волн, перпендикулярной акустической оси ФАР, отстоящей на расстоянии 84 мм от плоскости, где расположены элементарные пьезоизлучатели для случая, когда начальные фазы акустических волн, генерируемых элементарными пьезоизлучателями, выбраны такими, чтобы они имели одинаковое значение для акустических волн, генерируемых элементарными пьезоизлучателями в точке на оси ПЭП на расстоянии 100 мм от плоскости, в которой расположены пьезопластины.

Как видно из рис. 4, в распределе-

нии давления акустических волн наблюдается только пять явно выраженных максимумов, которые соответствуют узким акустическим пучкам. Наиболее интенсивный пучок располагается на акустической оси ФАР. При удалении от акустической оси на расстояние более 50 мм давление акустических волн практически спадает до нуля. Аналогичное распределение давления акустических волн наблюдается и для других режимов фокусировки в плоскостях, где наблюдается максимальное давление акустических волн, с той лишь разницей, что для этих случаев реализуются разные расстояния между максимумами и их величинами.

Так как акустическая ось ФАР является линией пересечения плоскостей  $hoz$  и  $uoz$ , являющимися плоскостями симметрии ФАР, то распределение дав-

ления акустических волн в направлении оси  $y$  в рассматриваемых плоскостях такое же, как и в направлении оси  $x$ .

На рис. 5 приведена объемная картина акустического поля излучения ФАР, работающей в режиме осевой фокусировки излучаемых акустических волн, в плоскости, перпендикулярной акустической оси ФАР, где наблюдается максимальное значение давления аку-

стических волн, на расстоянии 65 мм от плоскости, где располагаются элементарные пьезоизлучатели, для случая, когда начальные фазы элементарных пьезоизлучателей имеют такие значения, что излучаемые ими волны приходят в точку, расположенную на акустической оси ФАР на расстоянии 75 мм от пьезоизлучателей.

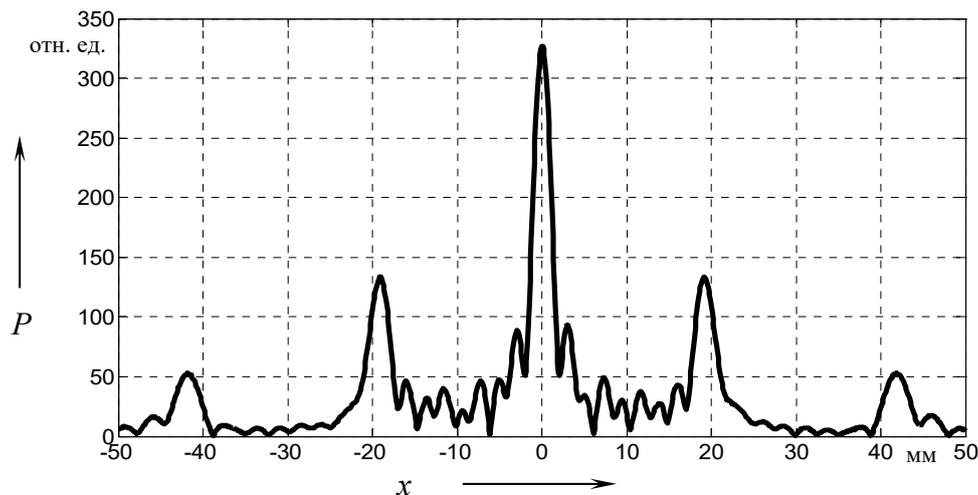


Рис. 4. Распределение давления акустических волн вдоль оси  $x$  в плоскости, перпендикулярной акустической оси ФАР, расположенной на расстоянии 84 мм от пьезопластин, при начальных фазах элементарных пьезоизлучателей, выбранных для осевой фокусировки акустических волн на расстоянии 100 мм от пьезоизлучателей

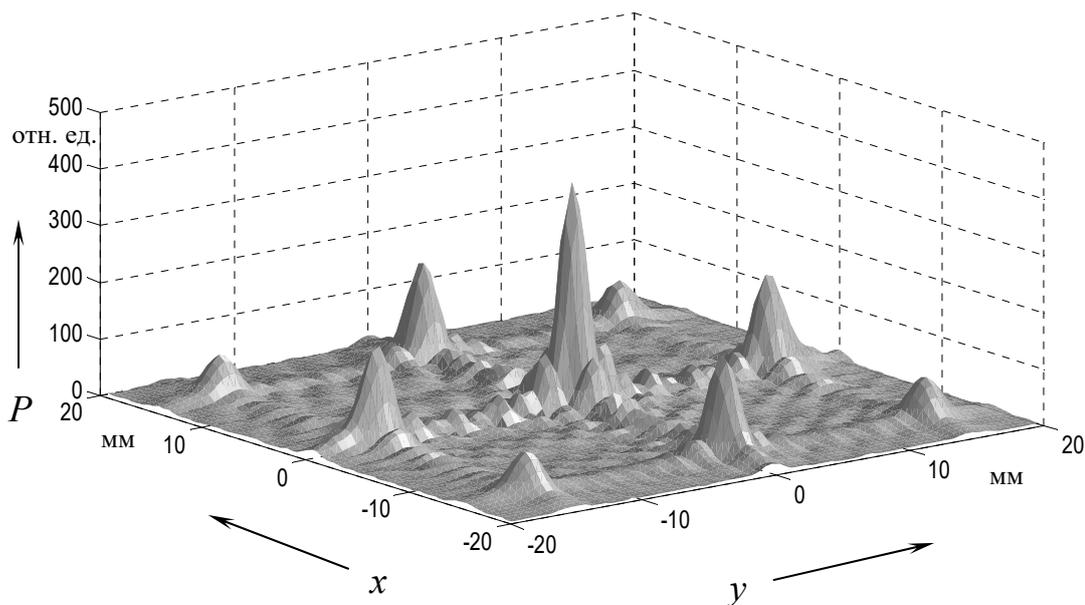


Рис. 5. Вид акустического поля пьезопреобразователя в виде двумерной фазированной решетки с фазами на элементарных пьезоэлементах, рассчитанных на фокусировку акустических волн на расстоянии 75 мм от пьезопластин в фокальной плоскости с фокусным расстоянием 65 мм

Видно, что характерной особенностью акустического поля ФАР, работающей в режиме осевой фокусировки, является наличие кроме основного акустического пучка с максимальной амплитудой, распространяющегося вдоль акустической оси ФАР, ряда дополнительных акустических пучков с меньшей амплитудой, расположенных симметрично относительно основного пучка. При увеличении фокусного расстояния ФАР расстояние между дополнительными акустическими пучками и основным увеличивается.

Из рис. 5 видно, что акустическое поле излучения носит симметричный характер относительно координатных плоскостей  $xoz$  и  $yoz$ .

Возможность пространственной перестройки акустического пучка ФАР проверялась следующим образом. Выбирались координаты точки, совпадающей с центром акустического пучка, и определялись акустические пути от всех элементарных пьезоизлучателей решетки до выбранной точки. С учетом этих акустических путей определялись начальные фазы для каждого элементарного пьезоизлучателя такие, чтобы акустические волны, излучаемые всеми элементарными пьезоизлучателями, приходили в выбранную точку в одной фазе. На рис. 6 продемонстрирован один из вариантов такой пространственной перестройки.

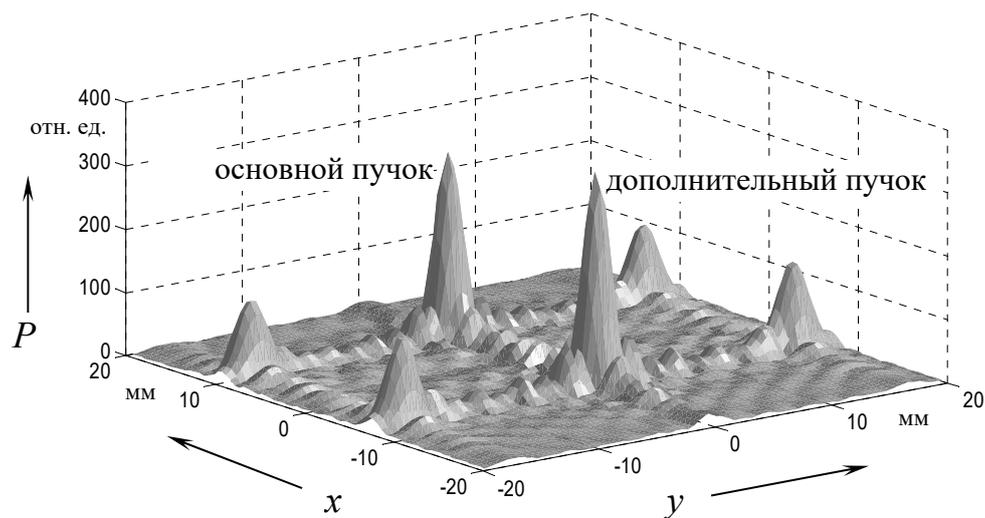


Рис. 6. Вид акустического поля ФАР на расстоянии 75 мм от пьезопластин при одинаковых фазах акустических волн, приходящих в точку с координатами  $x = 10$  мм,  $y = 0$  мм,  $z = 75$  мм

На рис. 6 приведено пространственное распределение давления акустических волн при условии их фокусировки на расстоянии 75 мм от пьезопластин в точке с координатами  $x = 10$  мм и  $y = 0$  мм. Из рис. 6 видно, что в акустическом поле наблюдаются два ярко выраженных акустических пучка: основной пучок, ось которого совпадает с координатами

выбранной точки ( $x = 10$  мм,  $y = 0$  мм), и дополнительный акустический пучок, ось которого имеет координаты  $x = -6,6$  мм,  $y = 0$  мм. При этом максимальная величина давления акустических волн в дополнительном пучке в 1,16 раза больше, чем в основном. Оба акустических пучка по уровню поло-

винной амплитуды давления акустических волн имеют диаметр 2,4 мм.

На рис. 7 приведена объемная картина акустического поля излучения ФАР в плоскости, перпендикулярной акустической оси решетки, на расстоянии 100 мм от пьезопластин при одинаковых фазах акустических волн, приходящих в точку с координатами  $x = 10$  мм,  $y = 10$  мм,  $z = 100$  мм.

Из рис. 7 видно, что кроме основного акустического пучка с максимальной величиной давления акустических волн, ось которого расположена в точке

с координатами  $x = 10$  мм,  $y = 10$  мм,  $z = 100$  мм, наблюдаются дополнительные акустические пучки, сравнимые по величине с основным пучком. Ось дополнительного акустического пучка 2 расположена в точке с координатами  $x = 10$  мм,  $y = -12,2$  мм,  $z = 100$  мм, пучка 3 – с координатами  $x = -12,2$  мм,  $y = -12,2$  мм,  $z = 100$  мм, пучка 4 – с координатами  $x = -12,2$  мм,  $y = 10$  мм,  $z = 100$  мм. Диаметр всех четырех акустических пучков по уровню половинной амплитуды давления акустических волн составляет 3,3 мм.

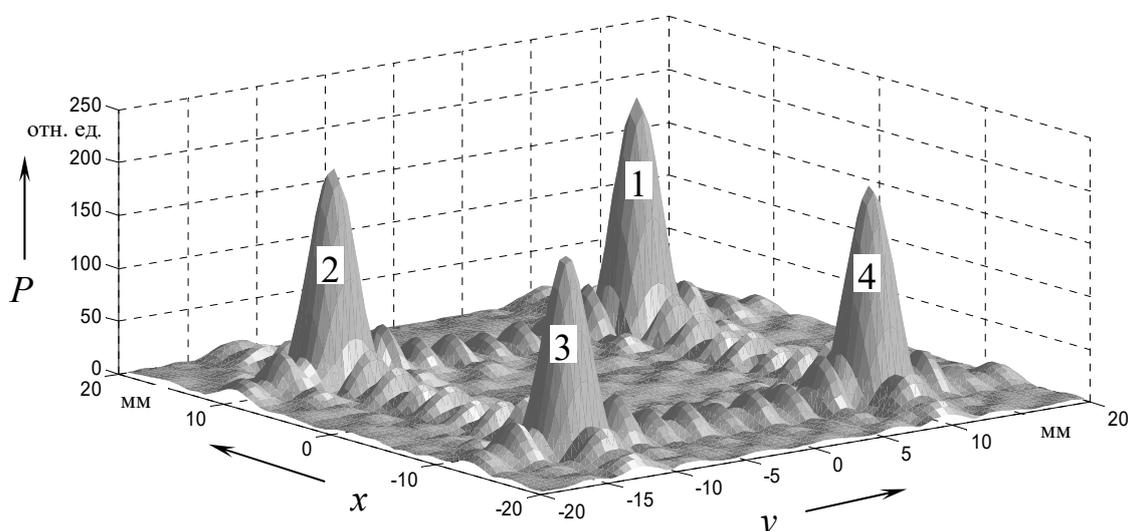


Рис. 7. Акустическое поле ФАР при одинаковых фазах акустических волн, приходящих в точку с координатами  $x = 10$  мм,  $y = 10$  мм,  $z = 100$  мм, на расстоянии 100 мм от пьезопластин: 1 – основной акустический пучок; 2–4 – дополнительные акустические пучки

Рис. 7 соответствует отклонению основного акустического пучка от акустической оси ФАР на 5,7 град. Проведенные расчеты показали, что аналогичная картина акустического поля наблюдается и при большем отклонении основного акустического пучка от акустической оси ФАР.

К примеру, проведенные расчеты показали, что в плоскости, перпендикулярной акустической оси решетки, на расстоянии 100 мм от пьезопластин при

одинаковых фазах акустических волн, приходящих в точку с координатами  $x = 15$  мм,  $y = 15$  мм,  $z = 100$  мм, что соответствует отклонению основного акустического пучка от акустической оси ФАР на 8,5 град, также наблюдаются четыре акустических пучка, как на рис. 7. Кроме основного акустического пучка 1, ось которого расположена в точке с координатами  $x = 15$  мм,  $y = 15$  мм,  $z = 100$  мм, наблюдаются дополнительные акустические пучки.

дополнительного акустического пучка 2 расположена в точке с координатами  $x = 15$  мм,  $y = -7$  мм,  $z = 100$  мм, пучка 3 – с координатами  $x = -7$  мм,  $y = -7$  мм,  $z = 100$  мм, пучка 4 – с координатами  $x = -7$  мм,  $y = 15$  мм,  $z = 100$  мм. Диаметр всех четырех акустических пучков по уровню половинной амплитуды давления акустических волн составляет порядка 3 мм. Но отличительной особенностью акустического поля в этом случае является то, что максимальная величина давления акустических волн наблюдается для дополнительного пучка 3, а минимальная – для основного пучка 1, которая составляет 0,64 от величины дополнительного пучка 3. Величина давления акустических волн для дополнительных пучков 2 и 4 составляет 0,75 величины дополнительного пучка 3.

При дальнейшей угловой отстройке основного акустического пучка от акустической оси ФАР наблюдается уменьшение интенсивности основного акустического пучка и увеличение интенсивности дополнительных пучков.

Таким образом, проведенные исследования акустического поля излучения ПЭП в виде квадратной двумерной фазированной решетки показали, что такая решетка может работать в режиме фокусировки акустических волн на оси ФАР. При этом фокусное расстояние, на котором наблюдается наибольшая ин-

тенсивность акустических волн, меньше расстояния от плоскости, содержащей элементарные пьезоизлучатели, до точки на акустической оси ФАР, в которую акустические волны от всех элементарных пьезоизлучателей приходят в одной фазе. Изменением начальных фаз акустических волн, излучаемых элементарными пьезоизлучателями, можно сфокусировать акустические волны в виде узких акустических пучков во внеосевых точках пространства.

При работе ФАР в режиме как осевой, так и внеосевой фокусировки кроме основных акустических пучков наблюдаются дополнительные акустические пучки, пространственное расположение и интенсивности которых зависят от координат точек, в которые акустические волны от всех пьезоизлучателей приходят в одной фазе. Наличие дополнительных акустических пучков может затруднять проведение акустического неразрушающего контроля с помощью рассмотренных ФАР.

Проведенные расчеты показали, что наибольшая интенсивность основных акустических пучков, по сравнению с интенсивностью дополнительных пучков, реализуется при условии, когда разность акустических путей от каждого элементарного пьезоизлучателя до выбранной точки составляет порядка двух длин акустических волн в среде, в которой они распространяются.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фалькевич, С. А.** Фазированные решетки в ультразвуковой дефектоскопии (обзор) / С. А. Фалькевич // Дефектоскопия. – 1984. – № 3. – С. 3–16.
2. **Борисов, В. И.** Акустическое поле излучения пьезопреобразователя в виде одномерной фазированной решетки / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2018. – № 1. – С. 27–37.
3. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И. Н. Ермолова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 280 с.
4. **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 2: Акустические методы контроля: практическое пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – Москва: Высшая школа, 1991. – 283 с.

5. **Борисов, В. И.** Тонкая структура акустического поля излучения прямоугольных пьезопластин / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 2 (43). – С. 105–113.

*Статья сдана в редакцию 12 апреля 2021 года*

**Василий Иванович Борисов**, д-р физ.-мат. наук, проф., магистр техн. наук, Белорусско-Российский университет.

**Сергей Сергеевич Сергеев**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

**Елена Николаевна Прокопенко**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.

**Александр Сергеевич Никитин**, аспирант, Белорусско-Российский университет.

**Vasily Ivanovich Borisov**, DSc (Physics and Mathematics), Prof., MSc (Engineering), Belarusian-Russian University.

**Sergey Sergeevich Sergeev**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

**Elena Nikolayevna Prokopenko**, senior lecturer, Belarusian-Russian University.

**Aleksandr Sergeevich Nikitin**, PhD student, Belarusian-Russian University.

---

УДК 621.708

*О. В. Тарасенко, Ю. В. Креселюк, А. А. Ивженко*

---

**ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ МИКРОТВЕРДОСТИ И ТОЛЩИНЫ  
ВИБРОУПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ИЗДЕЛИЯ**

---

UDC 621.708

*O. V. Tarasenko, Yu. V. Kreselyuk, A. A. Ivzhenko*

---

**DEVICE FOR CONTROLLING MICROHARDNESS AND THICKNESS  
OF A VIBRATION-HARDENED LAYER OF A FERROMAGNETIC PRODUCT**

---

**Аннотация**

Рассмотрен и предложен лабораторный прибор для контроля микротвердости и толщины виброупрочненного слоя ферромагнитного изделия. Приведены блок-схема прибора и конструкция датчика параметров виброупрочненного слоя. Представлены результаты исследований для стали 20 и 40Х, определена погрешность прибора в сравнении с разрушающим контролем путем стравливания скоса металла.

**Ключевые слова:**

виброупрочненный слой, магнитное поле, феррозонд, катушка, микротвердость.

**Abstract**

The article discusses and proposes a laboratory device for controlling the microhardness and thickness of a vibration-hardened layer of a ferromagnetic product. The block diagram of the device and the design of a vibration-hardened layer parameter sensor are presented. The research results for 20 and 40X steels are presented, and the error of the device has been determined compared to the destructive control by means of etching a metal bevel.

**Keywords:**

vibration-hardened layer, magnetic field, ferroprobe, coil, microhardness.

---

***Введение***

На сегодняшний день виброударное упрочнение является одним из самых распространенных видов виброобработки деталей. Виброупрочнение верхнего слоя металла повышает износостойкость деталей.

При использовании такого метода детали непрерывно подвергаются многочисленным, накладываемым друг на друга ударам, действующим в различных направлениях и с различной силой. Процесс виброупрочнения длится обычно 90...120 мин [1]. Со временем виброупрочненный слой разрушается не только с внешней стороны, но и во внутреннем поверхностном слое

детали. Таким образом, появляется необходимость контроля микротвердости и толщины виброупрочненного слоя металла.

Целью работы является разработка лабораторного прибора для контроля микротвердости и толщины поверхностного виброупрочненного слоя ферромагнитного изделия и проведение экспериментальных исследований на образцах из стали 20 и 40Х.

***Изложение основного материала***

Блок-схема прибора контроля микротвердости и толщины виброупрочненного поверхностного слоя металла представлена на рис. 1.

На рис. 2 показана конструкция измерительного преобразователя с обмоткой электромагнитного преобразова-

теля на сердечниках феррозонда в качестве датчика высокочастотного магнитного поля [2].

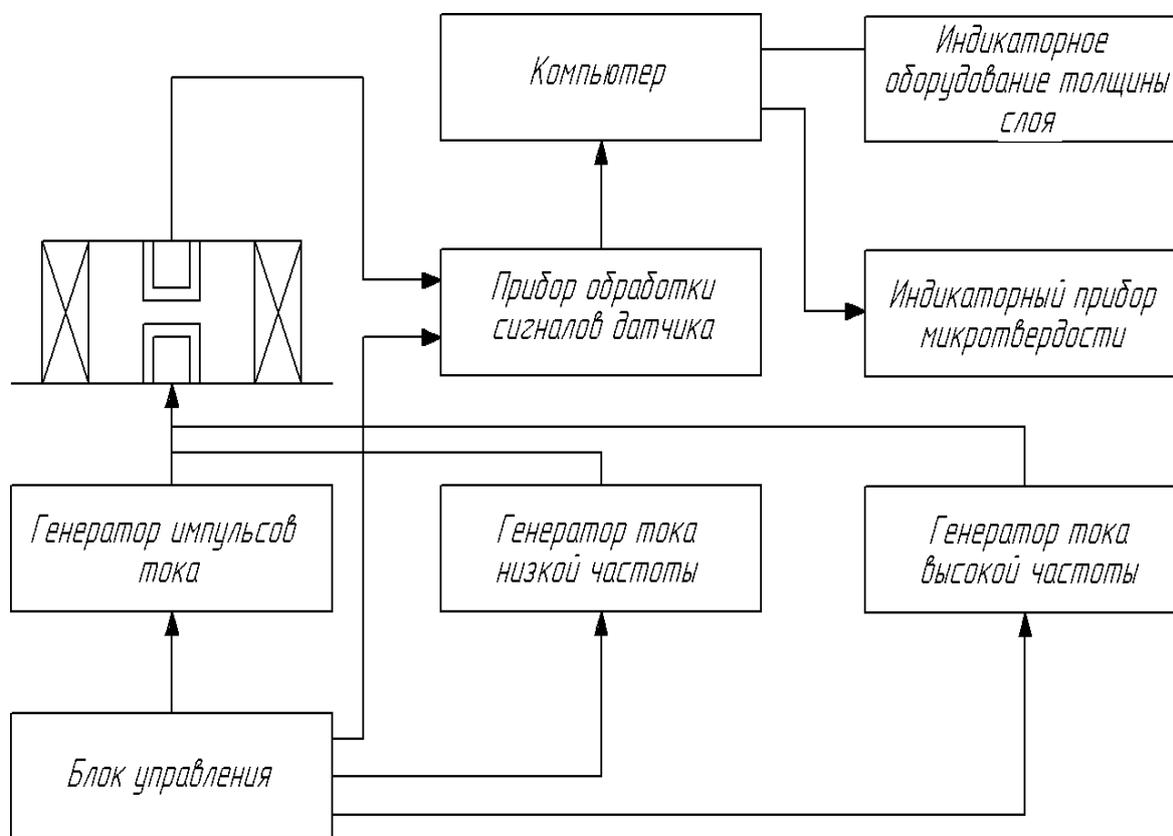


Рис. 1. Блок-схема прибора контроля микротвердости и толщины виброупрочненного слоя ферромагнитного изделия

Катушка намагничивания  $I$  имеет 420 витков провода диаметром 0,4 мм. Два полуэлемента феррозонда, включенные по схеме градиентометра, имеют сердечники  $2$  длиной 16 мм, на которых намотано 200 витков обмотки возбуждения и 300 витков выходной обмотки. Кроме того, имеются обмотки (350 витков) и на обоих полуэлементах феррозонда, которые являются электромагнитным измерительным преобразователем. Все соединяющие провода выведены на разъем 5.

Катушка с феррозондом помещается на поверхности изделия и в ее обмотку подается серия импульсов тока [3]. Магнитное поле катушки на-

магничивает локальную область под ее торцом. Включается измерительное устройство, с помощью которого измеряется градиент поля рассеяния намагниченной локальной области и определяется микротвердость поверхности и толщина упрочненного слоя изделия. Обработка выходного сигнала феррозонда ведется традиционным методом, т. е. сигнал феррозонда усиливается избирательным усилителем, настроенным на вторую гармонику частоты генератора возбуждения, и подается на синхронный детектор. На второй вход поступает синусоидальное напряжение, частота которого в 2 раза больше частоты возбуждения феррозонда. После

первичной обработки сигнал подается на вход индикаторных устройств, которые формируют сигнал в цифровой форме. Таким образом, определяется

напряжение, пропорциональное коэрцитивной силе ферромагнитного материала изделия.

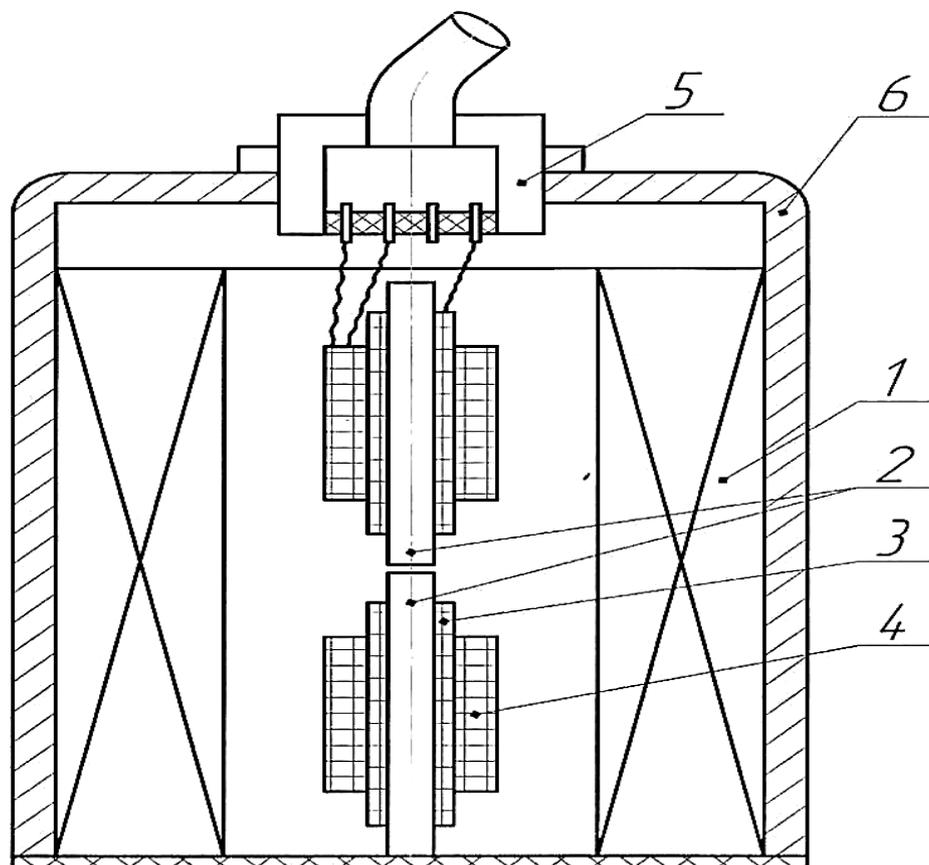


Рис. 2. Конструкция датчика высокочастотного магнитного поля: 1 – катушка намагничивания; 2 – сердечники феррозонда; 3 – обмотка электромагнитного измерительного преобразователя; 4 – обмотка намагничивания; 5 – разъем; 6 – экран

На втором этапе измерения в обмотку катушки подается ток низкой частоты (10...20 Гц) большой амплитуды (2...5 А) и ток высокой частоты (2...4 кГц) малой амплитуды (0,02...0,05 А). Величина напряженности магнитного поля измеряется электромагнитным преобразователем. После обработки сигнал измерительного преобразователя подается на индикаторное устройство толщины упрочненного слоя. В этом блоке выделяется вторая гармоника высокочастотного напряжения, детектируется и переводится в цифровую

форму и находится в цифровом виде среднее значение напряжения второй гармоники за период низкочастотного тока, что является информационным параметром.

После оценки сигнала градиентометра и многочастотного сигнала делается заключение о продолжении виброупрочнения деталей либо о прекращении обработки после получения информации на компьютере.

Блок-схема устройства питания зондирующей катушки показана на рис. 3.

Устройство питания зондирующей

катушки генерирует два вида тока. Один вид представляет собой импульс амплитудой 50...80 А и длительностью, которая регулируется в пределах 0,1...0,5 с. Этот импульс тока создает напряженность поля катушки  $4 \cdot 10^5 \dots 6 \cdot 10^5$  А/м. При замыкании ключа 1, который управляется блоком управления, импульс тока подается в катушку зондирующего поля и намагничивает участок контро-

лируемого материала под ним. Длительность импульса тока и его амплитуду можно менять. Можно установить серию из трех-восьми импульсов с периодом 1 с. При включенном ключе 1 ключ 2 разомкнут. Таким образом, осуществляется первый этап измерения, т. е. измеряется твердость материала по градиенту поля намагничивания участка.



Рис. 3. Блок-схема устройства питания зондирующей катушки

После завершения измерения градиента поля осуществляется измерение толщины упрочняемого слоя металла. Ключ 1 размыкается, ключ 2 замыкается и в обмотку катушки подается синусоидальный ток частотой  $\Omega$  и частотой  $\omega$  ( $\Omega = 10$  Гц;  $\omega = 600$  Гц).

Блок-схема устройства обработки выходных сигналов феррозонда, электроизмерительного преобразователя показана на рис. 4.

Феррозонд имеет три обмотки:

*Приборостроение*

$W_1$  – обмотка возбуждения;  $W_2$  – выходная обмотка;  $W_{oc}$  – обмотка для тока компенсации и тока обратной связи постоянного поля помехи. Феррозонд возбуждается синусоидальным током амплитудой 80 мА и частотой 12 кГц. Этот ток генерирует генератор возбуждения, одновременно ток возбуждения подается на удвоитель частоты, на выходе которого создаются синусоидальные напряжения удвоенной частоты, т. е. 24 кГц.

Выходные напряжения с обмотки феррозонда  $W_2$  поступают на резонансный усилитель, настроенный на удвоенную частоту 24 кГц. Коэффициент усиления резонансного усилителя  $K_{ус} = 100$ . Погрешность измерения напряженности магнитного поля не превышает 3,5 %.

Второй канал устройства обработки входных сигналов служит для обработки сигналов электромагнитного

канала системы. При подаче сигнала электромагнитного преобразователя производится его фильтрация, т. е. выделение высокочастотной составляющей с частотой  $2\omega$ , а затем сигнал усиливается резонансным усилителем с коэффициентом усиления  $K_{ус} = 420$ , настроенным на частоту  $2\omega$ . После усиления сигнал детектируется амплитудным детектором и поступает на УПТ.

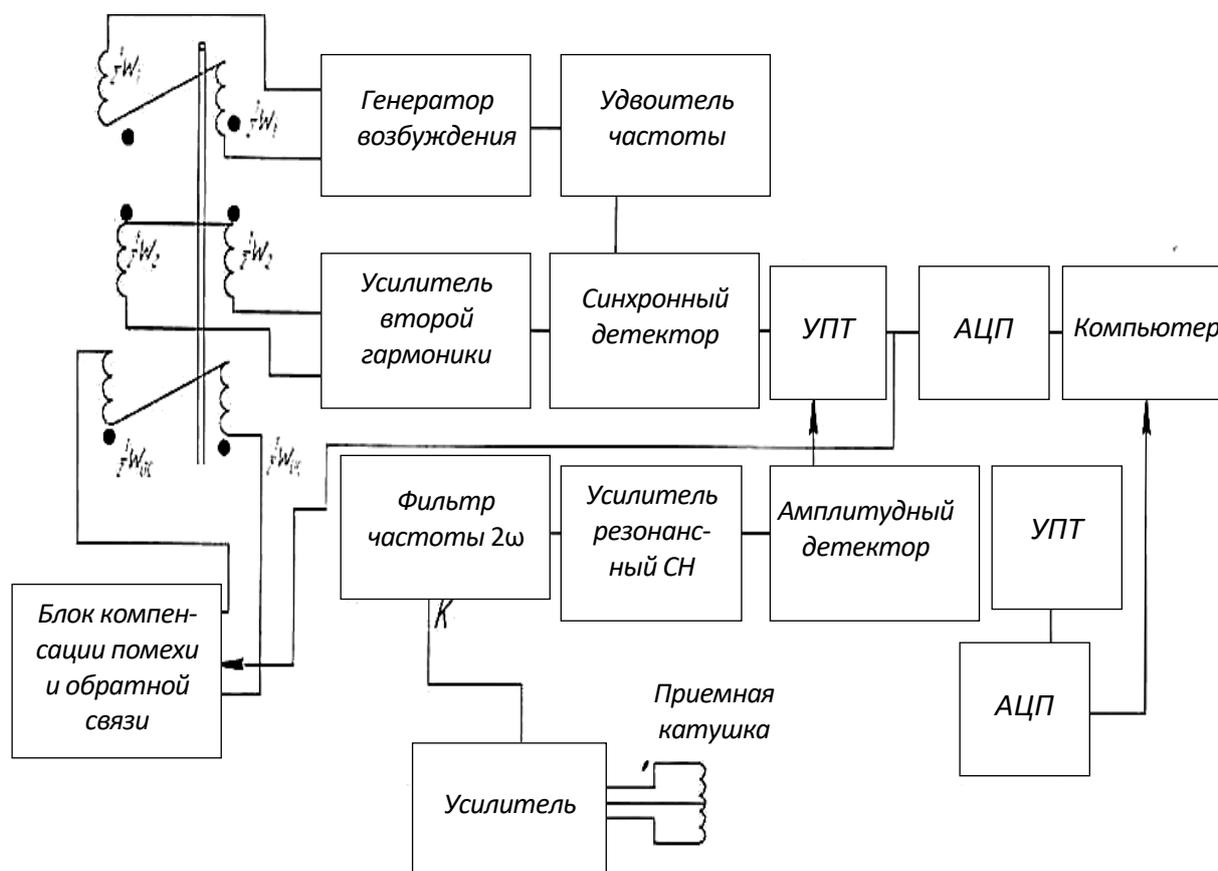


Рис. 4. Блок-схема устройства обработки сигналов феррозонда и приемной катушки

Поскольку выходной сигнал градиентометра и двухчастотного прибора несет информацию о толщине упрочненного слоя и микротвердости, то значение микротвердости определяется как линейная комбинация двух сигналов:

$$U_r = a_1 H_\mu + a_2 \Delta Z,$$

где  $U_r$  – сигнал градиентометра;  $a_1, a_2$  – коэффициенты, определяющиеся эмпирически (как коэффициенты уравнения регрессии для сигналов, измеренных на образцовых изделиях).

Система позволяет одновременно производить вторую линейную обработку того же сигнала с целью получе-

ния информации о толщине упрочняемого слоя.

$$U_c = b_1 H_\mu + b_2 \Delta Z.$$

Для разных ферромагнитных металлов и разных размеров деталей коэффициенты  $a$  и  $b$  разные. Совместное решение уравнений относительно неизвестных  $H_\mu$  и  $\Delta Z$  дает информацию о микротвердости и толщине виброупрочненного слоя.

После предварительной обработки сигналы канала градиентометра и канала электромагнитного преобразователя поступают на АЦП и преобразуются в цифровую форму. В компьютере произ-

водится решение системы линейных уравнений, вследствие чего находится значение величин  $H_\mu$  и  $\Delta Z$ , что является результатом контроля поверхностного виброупрочняемого слоя металла разработанным прибором.

Для этой цели из стали 20 и 40Х были изготовлены образцы в виде пластины размером  $200 \times 40 \times 1$  мм, которые подвергались виброупрочнению 12, 26 и 45 мин, после чего проходили контроль прибором и разрушающий контроль путем стравливания скола металла. Результаты контроля микротвердости и толщины виброупрочненного слоя металла приведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты контроля микротвердости и толщины виброупрочненного слоя металла

Материал	Неразрушающий контроль			Разрушающий контроль		
	12 мин	26 мин	45 мин	12 мин	26 мин	45 мин
Сталь 20 $H_\mu$ , кгс/мм <sup>2</sup>	158	162	230	149	158	212
	6 %	2,5 %	8 %			
Сталь 40Х $H_\mu$ , кгс/мм <sup>2</sup>	589	667	830	567	649	785
	4 %	3 %	6 %			
Сталь 20 $\Delta Z$ , мкм	68	125	240	61	12	213
	11 %	12 %	13 %			
Сталь 40Х $\Delta Z$ , мкм	34	84	168	30	79	152
	13 %	6 %	10 %			

### Заключение

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

– погрешность измерений разработанным прибором образца из стали 20 не превышает при измерении

микротвердости 8 %, при измерении толщины виброупрочненного слоя 13 %;

– погрешность измерений образца из стали 40Х не превышает при измерении микротвердости 6 %, при измерении толщины виброупрочненного слоя 13 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабичев, А. В.** Основы вибрационной обработки / А. В. Бабичев, И. А. Бабичев. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1999. – 120 с.
2. **Зацепин, Н. Н.** Магнитная дефектоскопия / Н. Н. Зацепин, Л. В. Коржова. – Минск: Наука и техника, 1981. – 208 с.
3. **Яковенко, В. В.** Феррозонд с однополярным импульсным возбуждением / В. В. Яковенко // Дефектоскопия. – 1984. – № 4. – С. 36–40.

*Статья сдана в редакцию 12 мая 2021 года*

**Олег Владимирович Тарасенко**, канд. техн. наук., доц., Луганский государственный университет имени Владимира Даля. Тел.: +380-721-27-45-07.

**Юрий Владимирович Креселюк**, ст. преподаватель, Луганский государственный университет имени Владимира Даля. Тел.: +380-721-29-05-22.

**Анастасия Александровна Ивженко**, ассистент, Луганский государственный университет имени Владимира Даля. Тел.: +380-721-47-66-71.

**Oleg Vladimirovich Tarasenko**, PhD (Engineering), Associate Prof., Lugansk State University named after Volodymyr Dahl. Phone: +380-721-27-45-07.

**Yuri Vladimirovich Kreselyuk**, senior lecturer, Lugansk State University named after Volodymyr Dahl. Phone: +380-721-29-05-22.

**Anastasia Aleksandrovna Ivzhenko**, assistant lecturer, Lugansk State University named after Volodymyr Dahl. Phone: +380-721-47-66-71.

# ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 2(71) 2021

Ответственный за выпуск

И. В. Брискина

Оформление обложки

В. П. Бабичева

Дизайн и компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Адрес редакции: пр-т Мира, 43, Белорусско-Российский университет, корп. 1, комн. 331, 212022, г. Могилев. Телефон: 23-00-07, e-mail: [bru@bru.mogilev.by](mailto:bru@bru.mogilev.by).

Журнал «Вестник Белорусско-Российского университета» зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь. Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1240 от 08.02.2010.

Подписано в печать 31.05.2020. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 8,83. Уч.-изд. л. 4,69. Тираж 100 экз. Заказ 2552.

Отпечатано в унитарном полиграфическом коммунальном предприятии «Могилевская областная укрупненная типография имени Спиридона Соболя». ЛП 02330/23 от 30.12.2013. Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев.