

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время практически во всех промышленно развитых странах интенсивно ведутся работы по созданию мобильных роботов. Это связано с необходимостью передвижения и выполнения технологических и инспекционных операций в недоступных или трудно доступных для человека местах, а также на территориях с "агрессивными" средами, где нахождение человека является не безопасным. Широкое распространение получили колесные, гусеничные, шагающие устройства. В тоже время такие мобильные устройства обладают рядом недостатков, в том числе сложностью и как следствие невысокой надежностью. Одним из перспективных методов движения мобильных роботов является метод, основанный на использовании управляемого вибрационного движения внутренних масс установленных в корпусе робота. Изменяя движение внутренних масс мобильного робота, можно управлять силой реакции внешней среды, действующей на корпус робота, обеспечивая его движение в желаемом направлении. Вибрационные роботы просты по конструкции, они не требуют специальных движителей, таких как колеса, гусеницы или ноги. Особый интерес представляют мобильные устройства, перемещающиеся с периодическим отрывом от опорной поверхности, что открывает принципиально новые возможности, в плане повышения проходимости при движении по неровной поверхности. Это позволит применять такие системы для мониторинга окружающей среды после землетрясений, и других чрезвычайных ситуациях, когда перемещение робота возможно лишь с использованием прыжков. В тоже время такие схемы роботов и их динамическое поведение изучено недостаточно, что значительно ограничивает область применения таких устройств. Навесное оборудование, устанавливаемое на корпусе, подвергается импульсным нагрузкам, снижающим точность показаний прибора, а в ряде случаев приводящим и к отказам. Поэтому разработка методов динамического расчета и исследование движения малогабаритных прыгающих мобильных роботов с установленным на корпусе навесным оборудованием при использовании высокоточных систем виброзащиты является важной и актуальной задачей.

**Объектом исследования** данной работы являются динамические процессы, протекающие в сложной мехатронной системе, в которую входят корпус прыгающего робота, привод, обеспечивающий периодический отрыв робота от поверхности и устройство активной виброзащиты навесного оборудования с управляемым электроприводом.

**Цель работы.** Целью настоящей работы является повышение эффективности вибрационного робота за счет создания системы движения, обеспечивающей прыгающий режим робота.

Для достижения поставленной цели в настоящей работе решаются

следующие задачи:

- разработка математической модели, адекватно описывающей движение прыгающего виброробота с вращающейся внутренней массой;
- определение динамических характеристик движения прыгающего робота в зависимости от параметров движения внутренней массы робота;
- разработка схемы и математической модели виброзащитного устройства с управляемыми параметрами электропривода, обеспечивающего генерирование периодического компенсирующего воздействия;
- разработка расчетной схемы системы автоматического управления виброзащитного устройства;
- исследование качественных показателей системы автоматического управления виброзащитным устройством при импульсном, моногармоническом и случайном воздействиях;
- разработка экспериментального стенда для исследования основных характеристик модели прыгающего робота;
- численное исследование динамических характеристик системы виброзащиты для различных стратегий регулирования;
- разработка экспериментальной установки и проведение исследований статических и динамических режимов функционирования системы виброзащиты;

**Методы исследования.** При выполнении работы использованы теоретические и экспериментальные методы теоретической механики, теории колебаний, теории автоматического управления.

**Достоверность научных положений и результатов.** Основные научные результаты диссертации получены на основе фундаментальных положений и методов теоретической механики, теории колебаний, динамики машин, экспериментальных методов исследования. Теоретические результаты подтверждены результатами экспериментальных исследований.

**Научная новизна:**

- разработана математическая модель прыгающего виброробота с внутренней вращающейся массой, адекватно описывающая динамические режимы движения робота как в режимах полета, так и в моменты контакта с опорной поверхностью;
- разработана математическая модель системы виброзащиты, включающей в себя упруго-вязкий подвес объекта и компенсирующий электродинамический привод, датчик для измерения ускорения навесного оборудования, систему автоматического управления;
- исследовано динамическое поведение виброзащитной системы при программном управлении и управлении по отклонению перемещения и ускорения от заданного. Установлено, что уровень ускорения на навесном оборудовании по сравнению с пассивной виброзащитной системой снижается в 5-8 раз.

**Практическая ценность.** Практическая ценность данной работы состоит в том, что в результате исследований выявлено перспективное направление совершенствования мобильных вибрационных роботов,

обеспечивающих управляемое движение по заданному закону с изменением высоты и длины прыжка, разработана новая конструкция прыгающего робота оригинальность которого, защищена авторским свидетельством на изобретение. Разработана методика проектирования прыгающего робота и систем виброзащиты навесного оборудования, позволяющая определять оптимальные параметры робота, на основе математического моделирования динамических процессов.

Результаты работы использованы при выполнении грантов РФФИ № 05-08-33382 «Изучение закономерностей движения вибрационных мобильных роботов в различных средах» (2005-2007 гг.) и № 08-08-004862 -а «Динамика и управление движением автономных вибрационных мобильных микророботов по шероховатой поверхности» (2008-2010 гг.), а также в учебном процессе кафедры теоретической механики и мехатроники КурскГТУ.

**Апробация диссертации.** Основные положения диссертации докладывались на Международных научно-технических конференциях, вузовских научных конференциях: «Молодежь и XXI век» (г. Курск, 2006-2008), «Вибрационные машины и технологии» (г. Курск, 2008), Международной мультikonференции «Теория и системы управления» (Москва, 2009), Инжиниринг-2009, (г. Орел, 2009).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ, включая 6 статей, из них по перечню ВАК – 1, 1 свидетельство на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из наименований и приложения. Текст диссертации изложен на 159 страницах текста, содержит 113 рисунков, 6 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, дана общая характеристика диссертации, показана научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** приводится обзор литературных источников по вопросам разработки и проектирования вибрационных мобильных роботов, приведена классификация вибророботов. В основе этой классификации лежит как принцип вибрационного движения роботов, так и размерность пространства, в котором робот и его элементы перемещаются. Самый простой случай - перемещение робота в одномерном пространстве (1-D). Существуют два принципиально различных способа движения робота. В соответствии с первым корпус робота периодически изменяет свою форму в результате этого, действующие на корпус со стороны окружающей среды силы трения создают перемещение робота. Корпус робота может иметь как разомкнутую, так и замкнутую структуру.

Второй подход основан на движении робота за счет подвижных внутренних масс. Применяется как прямолинейное, так и криволинейное движение масс, а в частном случае движение по окружности. В простейшем случае, например при движении робота по прямой, внутренние массы перемещаются вдоль траектории движения, то есть используется одномерное пространство(1-D), в более сложном варианте происходит движение робота в двумерном пространстве (2-D). Наиболее общим является случай, когда робот для движения использует трехмерное пространство(3-D). В главе представлен подробный анализ различных конструкций вибрационных мобильных устройств.

**Во второй главе** рассмотрена математическая модель, описывающая движение робота в вертикальной плоскости с отрывом от опорной поверхности. На рис. 1 приведена обобщенная расчетная схема прыгающего робота с системой активной виброзащиты навесного оборудования и системой пассивной защиты корпуса от ударов.

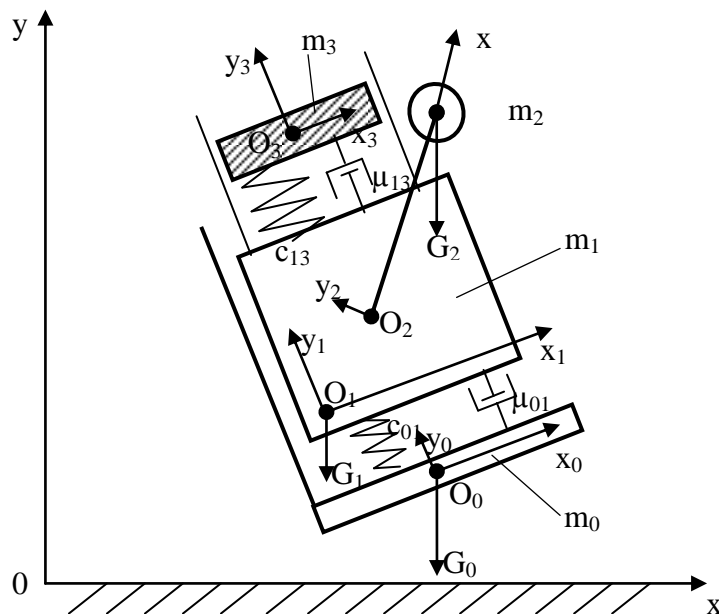


Рис. 1. Обобщенная расчетная схема робота с системой активной виброзащиты навесного оборудования и системой пассивной защиты корпуса от ударов

Будем считать, что корпус робота представляет собой платформу, выполненную в виде прямоугольного параллелепипеда массой  $m_1$ , на котором установлено навесное оборудование, моделируемое материальной точкой с массой  $m_3$ . На корпусе также установлено устройство пассивной защиты корпуса от удара с массой  $m_0$ . При вращении дебаланса, возникает сила инерции, способная оторвать тело робота от поверхности. Ось вращения точечной массы - дебаланса  $m_2$ , обеспечивающей движение робота, проходит через точку  $O_2$ . Движение робота происходит в неподвижной системе координат  $Oxyz$ . Свяжем с корпусом подвижную систему координат  $O_1x_1y_1z_1$ , центр которой  $O_1$  расположен на платформе робота, а ось  $O_1x_1$  совпадает с линией  $O_1O_2$ . Систему координат  $O_2x_2y_2z_2$  свяжем со звеном  $O_2A$ . Система

координат  $O_3x_3y_3z_3$  будет определять движение навесного оборудования относительно корпуса. Система координат  $O_0x_0y_0z_0$  будет определять движение пассивной противоударной системы относительно корпуса.  $c_{01}$ ,  $\mu_{01}$ -параметры пассивной противоударной системы.  $c_{13}$ ,  $\mu_{13}$  - параметры виброизолятора навесного оборудования.

На первом этапе рассматривается упрощенная модель робота в предположении, что  $c_{01}$  и  $c_{13}$  стремятся к бесконечности. Расчетная схема робота принимает вид, показанный на рис. 2.

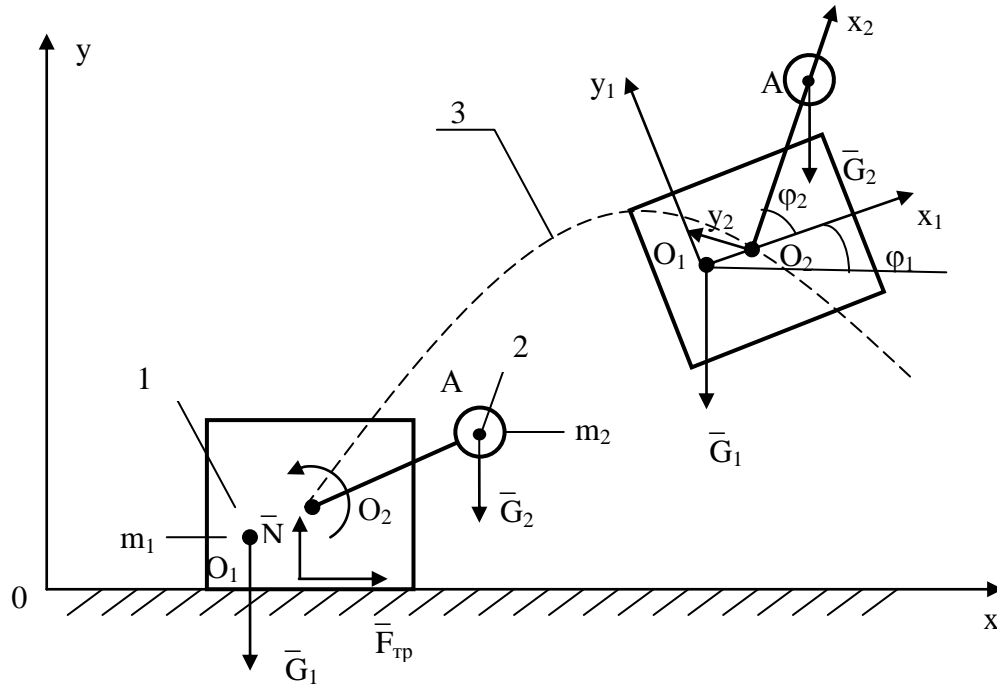


Рис. 2. Расчетная схема прыгающего виброробота без учета систем противоударной и виброзащитной систем

Движение, рассматриваемой механической системы описываются дифференциальными уравнениями, полученными с использованием теорем об изменении количества движения и момента количества движения механической системы:

$$(m_1 + m_2)\ddot{x} + m_2\ddot{\phi}_1(-\sin \phi_1(O_1O_2 + l \sin \phi_2) + \cos \phi_1 \cdot l \cos \phi_2) - \\ - m_2\dot{\phi}_1^2(\cos \phi_1(O_1O_2 + l \sin \phi_2) + \sin \phi_1 \cdot l \cos \phi_2) - \\ - 2m_2\dot{\phi}_1\omega_2l(\sin \phi_1 \cos \phi_2 + \cos \phi_1 \sin \phi_2) - m_2l\omega_2^2(\cos \phi_1 \sin \phi_2 + \sin \phi_1 \cos \phi_2) = 0$$

$$(m_1 + m_2)\ddot{y} - m_2\ddot{\phi}_1(\cos \phi_1(O_1O_2 + l \sin \phi_2) + \sin \phi_1 \cdot l \cos \phi_2) + \\ + m_2\dot{\phi}_1^2(\sin \phi_1(O_1O_2 + l \sin \phi_2) - \cos \phi_1 \cdot l \cos \phi_2) + 2m_2\dot{\phi}_1\omega_2l(-\cos \phi_1 \cos \phi_2 + \\ + \sin \phi_1 \sin \phi_2) + m_2l\omega_2^2(\sin \phi_1 \sin \phi_2 - \cos \phi_1 \cos \phi_2) = -(m_1 + m_2)g$$

$$\begin{aligned}
& I_{z'z'}\ddot{\varphi}_1 - m_2\ddot{\varphi}_1((O_1O_2 + l \sin \varphi_2)^2 + l^2 \cos^2 \varphi_2) + m_2(2\dot{\varphi}_1\omega_2 + \omega_2^2)l \cdot O_1O_2 = \\
& = -\frac{1}{2}m_1g \cdot O_1O_2 \cos \varphi_1 - m_2g(\cos \varphi_1(O_1O_2 + l \sin \varphi_2) + \sin \varphi_1 \cdot l \cos \varphi_2) - \\
& -(\frac{1}{2}m_1O_1O_2 \cos \varphi_1 + m_2(\cos \varphi_1(O_1O_2 + l \sin \varphi_2) + \sin \varphi_1 \cdot l \cos \varphi_2))\ddot{y} + \\
& +(\frac{1}{2}m_1O_1O_2 \sin \varphi_1 + m_2(-\sin \varphi_1(O_1O_2 + l \sin \varphi_2) + \cos \varphi_1 \cdot l \cos \varphi_2))\ddot{x},
\end{aligned}$$

где:  $l$  – длина дебаланса;  $I_{z'z'}$  – момент инерции робота относительно оси  $O_1z_1$ ; угловая скорость дебаланса  $\dot{\varphi}_2 = \omega_2 = const$ .

Данная система уравнений совместно с уравнениями движения робота по поверхности и решалась с помощью численного метода с адаптивным шагом интегрирования. Некоторые результаты расчетов в виде траекторий движения центра масс корпуса для различных параметров  $\omega$  и  $(m_1r)/m$ , приведены на рис. 3-6.

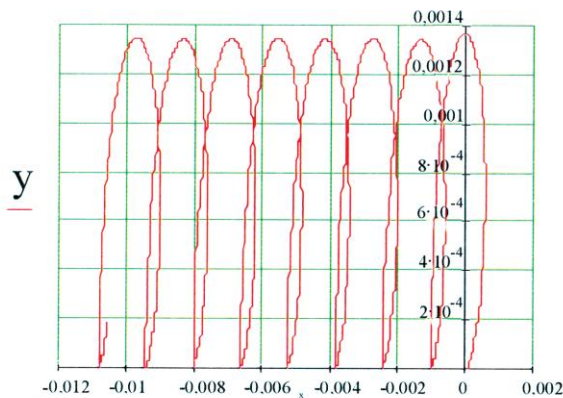


Рис. 3. Траектория движения робота в плоскости  $Oxy$  ( $\omega = 200$  1/с)

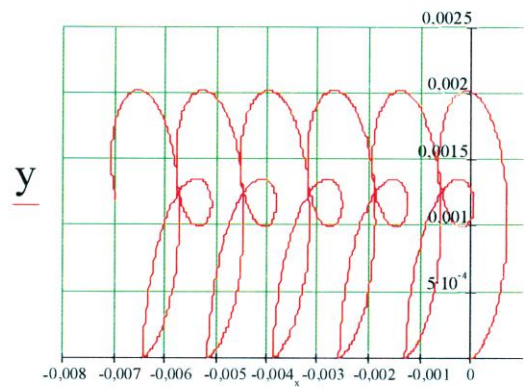


Рис. 4. Траектория движения робота в плоскости  $Oxy$  ( $\omega = 250$  1/с)



Рис. 5. Траектория движения робота в плоскости  $Oxy$  ( $\omega = 300$  1/с)

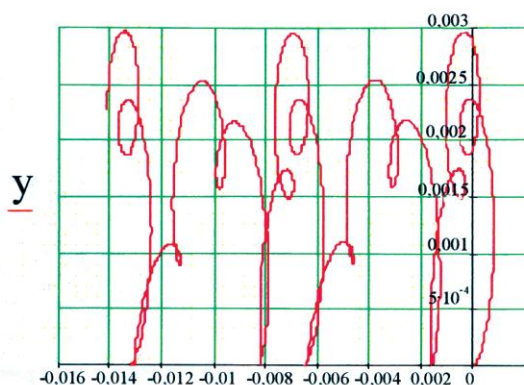


Рис. 6. Траектория движения робота в плоскости  $Oxy$  ( $\omega = 350$  1/с)

Установлено, что вид траектории существенно зависит от частоты вращения дебаланса. Так на рис. 3 показана траектория, когда за время одного прыжка робота совершается не более одного оборота дебаланса. На рис. 4 показан пример, когда за время одного прыжка происходит два оборота дебаланса. На рис. 5, 6 представлен случай, который относится к случаю, когда за время одного прыжка совершается три оборота дебаланса.

На основании полученных результатов была построена карта параметров, определяющих вид траектории движения корпуса (рис.7).

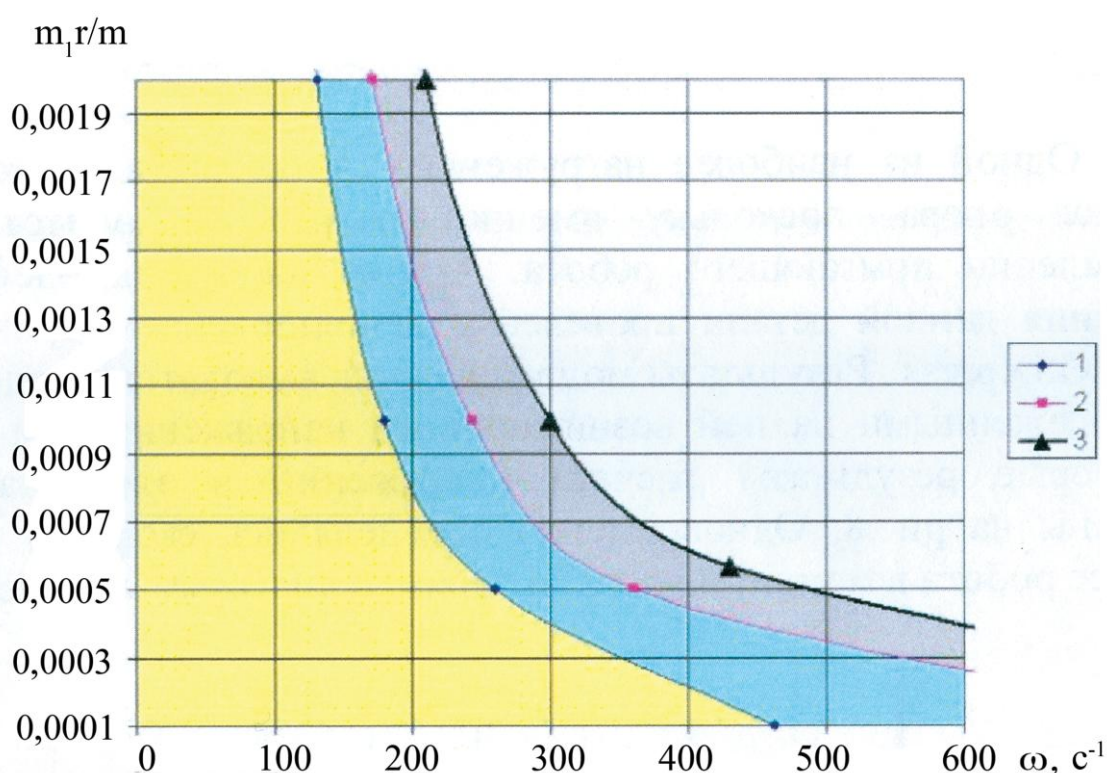


Рис. 7. Карта параметров, определяющая различные режимы движения робота: 1 – граница области с одним оборотом дебаланса за один прыжок; 2 – граница области с двумя оборотами дебаланса за один прыжок; 3 – граница области с тремя оборотами дебаланса за один прыжок

Кроме этого, получены зависимости высоты, длины прыжка и средней скорости от частоты вращения вала и относительного статического момента дебаланса.



В третьей главе исследуется поведение противоударной системы робота.

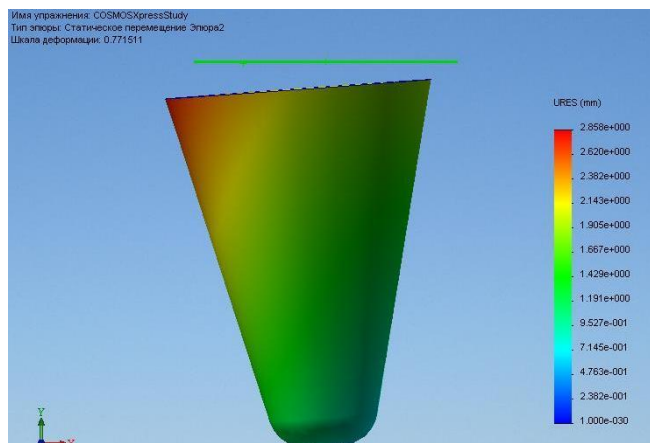


Рис. 8. Напряжения, возникающие в детали противоударной системы робота

Одной из наиболее нагруженных деталей в данной конструкции является опора, поскольку именно на неё приходится нагрузка при приземлении прыгающего робота. Анализ напряженно-деформированного состояния данной детали проведен с использованием прикладного пакета COSMOSXpress. Результаты моделирования выводятся в виде модели детали с изображенными на ней возникающими напряжениями и деформациями. Некоторые результаты расчета напряжений в элементах конструкции показаны на рис. 8. Одновременно определялись скорость и ускорение на корпусе робота в моменты посадки. Пример диаграммы показан на рис. 9.

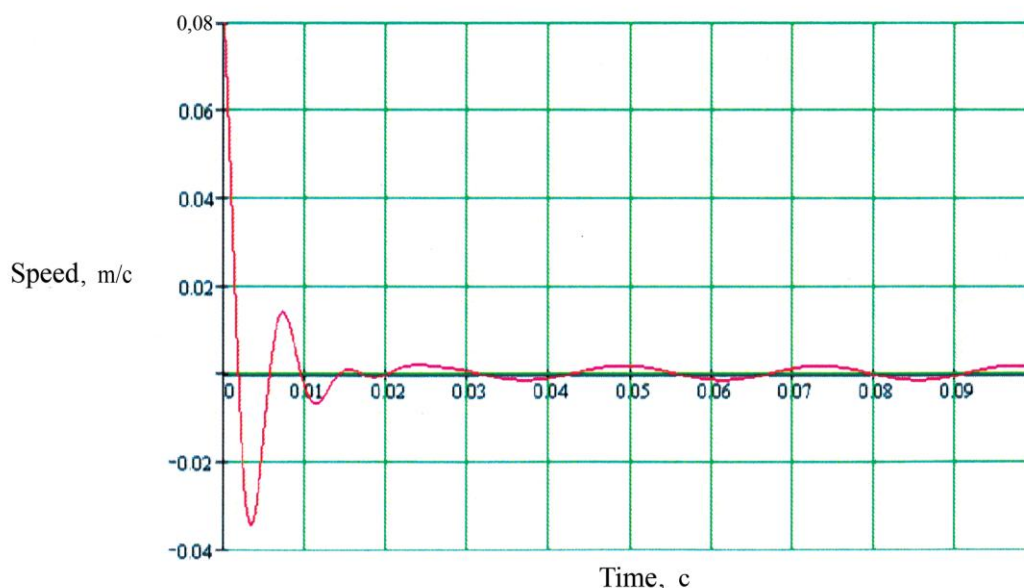


Рис. 9. График зависимости скорости от времени в момент посадки



**В четвертой главе** приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований виброзащитной системы навесного оборудования робота. Расчетная схема показана на рис.10.

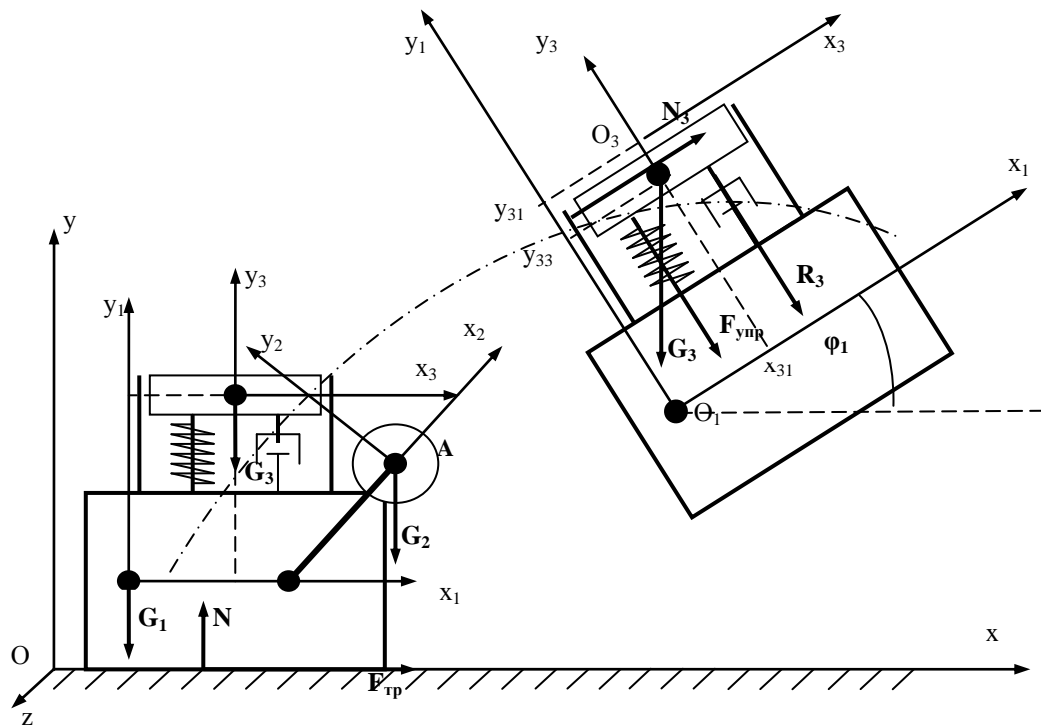


Рис. 10. Расчетная схема робота с системой виброзащиты навесного оборудования

Для составления уравнений движения оборудования запишем в абсолютной системе координат теорему об изменении количества движения для навесного оборудования. На массу действуют силы упругости пружины  $\vec{F}_{упр3}$ , вязкого сопротивления демпфера  $\vec{R}_3$ , нормальной реакции  $\vec{N}_3$  и компенсирующей силы активной системы виброзащиты  $\vec{P}_3$ :

$$\frac{d\vec{Q}_3}{dt} = \vec{G}_3 + \vec{F}_{упр3} + \vec{R}_3 + \vec{P}_3 + \vec{N}_3, \quad (1)$$

где  $\vec{Q}_3 = m_3 \dot{\vec{r}}_3$  - количество движения оборудования.

Чтобы определить количество движения оборудования, представим абсолютный радиус-вектор его центра тяжести в виде:

$$\vec{r}_3 = \vec{r}_1 + T_{10}(\vec{r}_{31} + \vec{r}_{33}), \quad (2)$$

где  $\vec{r}_1 = (x_1; y_1; 0)^T$  - радиус-вектор начала системы координат  $O_1x_1y_1z_1$  в абсолютной системе,  $\vec{r}_{31} = (x_{31}; y_{31}; 0)^T$  - радиус-вектор начала системы координат  $O_3x_3y_3z_3$  в относительной системе  $O_1x_1y_1z_1$ ,  $\vec{r}_{33} = (0; y_{33}; 0)^T$  - радиус-вектор центра тяжести оборудования в относительной системе  $O_3x_3y_3z_3$ ,

$$T_{10} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - \text{матрица поворота осей системы } O_1x_1y_1z_1$$

относительно абсолютной системы  $Oxyz$ .

Дифференцируя (2) дважды по времени, получим производную от количества движения:

$$\frac{d\vec{Q}_3}{dt} = m_3 \ddot{\vec{r}}_3 = m_3 (\ddot{\vec{r}}_1 + \ddot{T}_{10}(\vec{r}_{31} + \vec{r}_{33}) + 2\dot{T}_{10}\dot{\vec{r}}_{33} + T_{10}\ddot{\vec{r}}_{33}),$$

где производные радиус-векторов и матрицы поворота равны:

$$\dot{\vec{r}}_{33} = (\dot{x}_{33}; \dot{y}_{33}; 0)^T,$$

$$\dot{T}_{10} = \dot{\varphi} \begin{pmatrix} -\sin \varphi & -\cos \varphi & 0 \\ \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\ddot{\vec{r}}_1 = (\ddot{x}_1; \ddot{y}_1; 0)^T,$$

$$\ddot{\vec{r}}_{33} = (\ddot{x}_{33}; \ddot{y}_{33}; 0)^T,$$

В качестве устройства генерирующего компенсирующую силу  $\mathbf{P}_3$  принят электродинамический привод. Моделирование работы электродинамического привода выполнено с применением программы COSMOS-WORKS. В результате расчетов получены зависимости, связывающие основные параметры электропривода и перемещения катушки. Пример эпюры перемещения сердечника при работе электропривода показан на рис. 11.

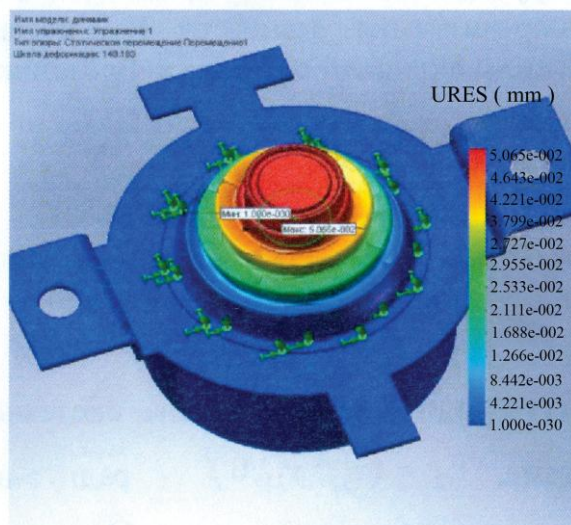


Рис. 11. Эпюра перемещения сердечника электродинамического привода

Ниже приведены дифференциальные уравнения движения навесного оборудования с учетом характеристик привода:

$$\begin{cases} m\ddot{y}_3 + \mu\dot{y}_3 + cy_3 = \mu\dot{y}_1 + cy_1 + P_3 \\ P_3 = B \cdot l \cdot i \\ L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = U \end{cases}$$

где:  $B$  – магнитная индукция;  $l$  – длина проводника;  $y_1$  – заданное перемещение корпуса робота;  $i$  – сила тока,  $R$  – электрическое сопротивление обмотки электромагнита,  $U$  – напряжение, зависящее от ошибки,  $L$  – индуктивность.

Далее исследовалось поведение активной виброзащитной системы для различных стратегий управления в том числе, когда управляющее напряжение зависит от ошибки по перемещению, скорости и ускорению.

Для численного решения данной системы линейных дифференциальных уравнений использован пакет визуального моделирования Simulink 6.0. В качестве входного сигнала применялось гармоническое, случайное и импульсное воздействия.

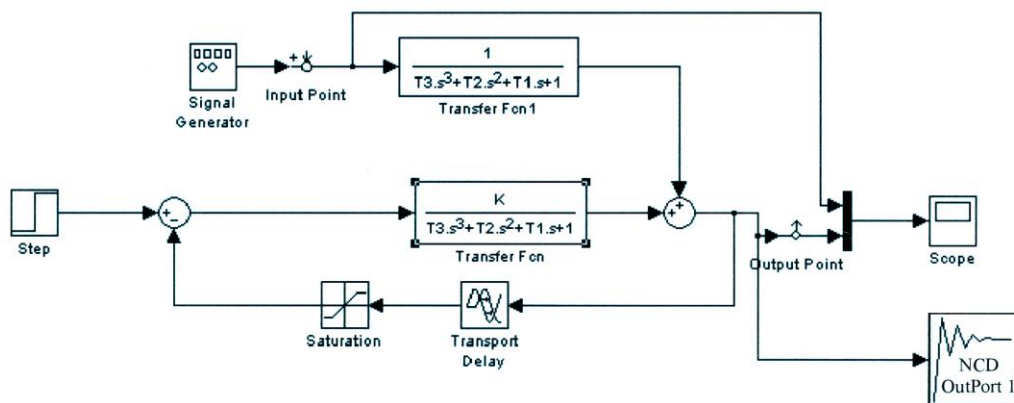


Рис. 12. Схема моделирования САУ с учетом нелинейностей в ОС

Некоторые результаты расчетов для гармонических колебаний корпуса робота приведены на рис. 13.

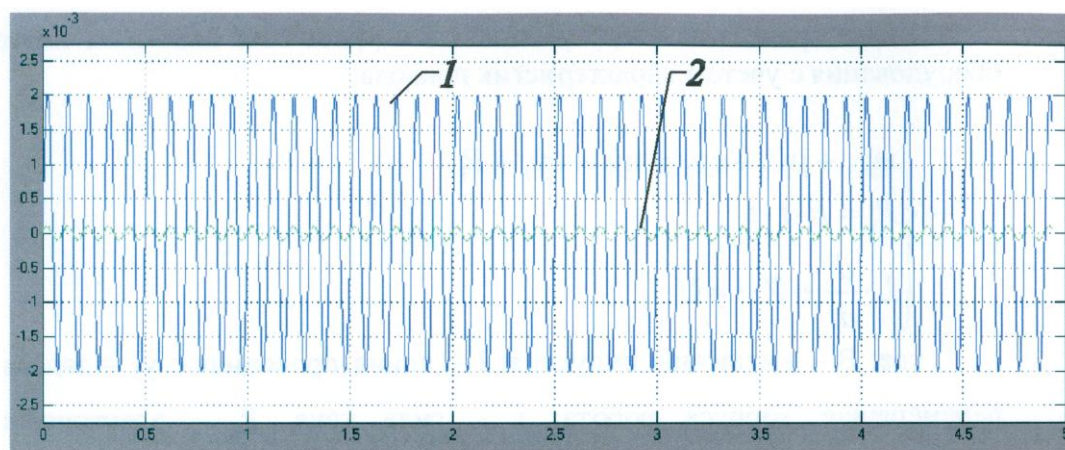


Рис.13. Зависимость входного и выходного сигналов виброзащитной системы: 1 - входной сигнал (корпус робота); 2 - выходной сигнал (навесное оборудование)

На рис.14 приведена схема экспериментального стенда для изучения работы активной виброзащитной системы. Стенд состоит из платформы возбуждения вибрации - 1, электродинамических приводов - 2, виброизолированной платформы - 3, направляющей и системы пассивной виброзащиты - 4, датчиков контроля движения, установленных на защищаемом объекте - 5, датчиков контроля возмущающей вибрации - 6.

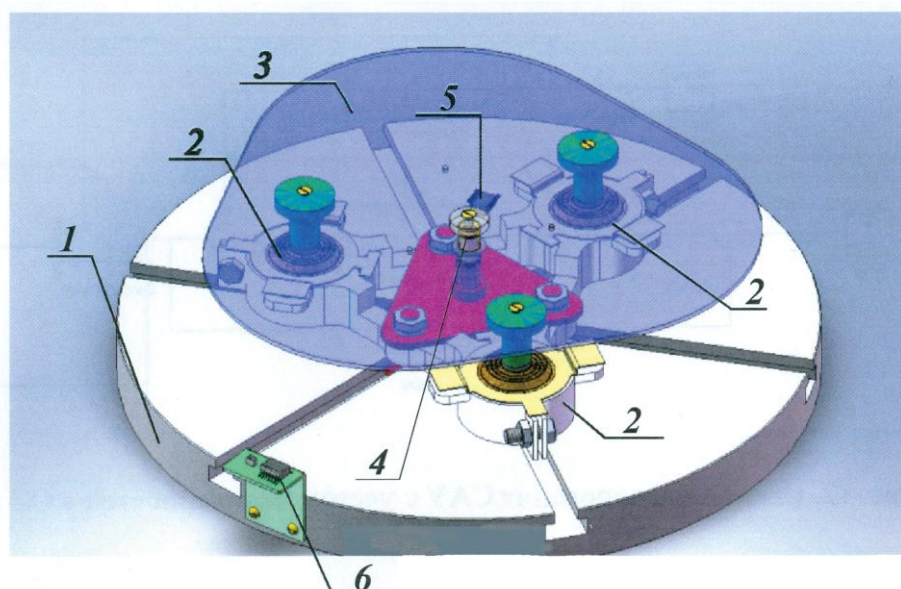


Рис. 14. Общий вид стенда активной виброзащитной системы

Результаты экспериментов подтвердили теоретические расчеты с точностью до 15% по перемещению и до 25% по скорости и ускорению.

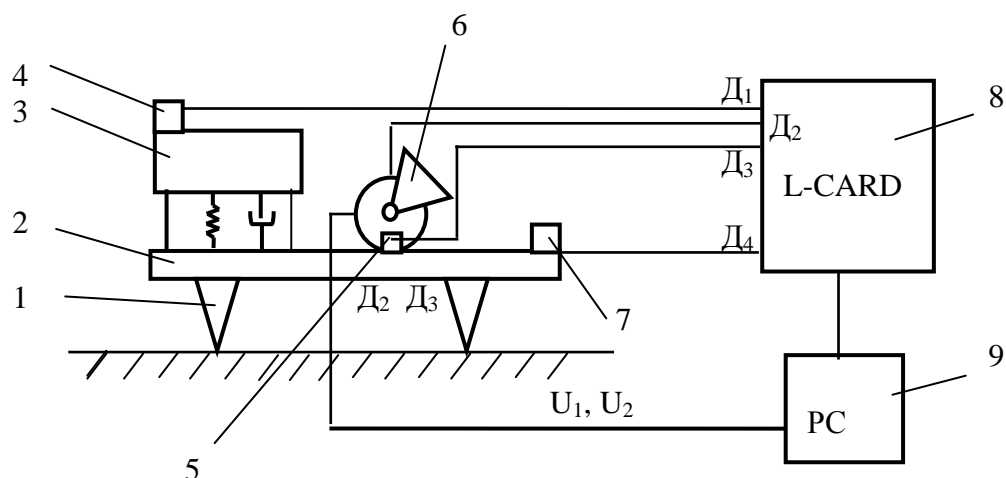


Рис. 15. Схема экспериментального стенда для изучения движения прыгающего робота

На рис. 15 приведена схема экспериментального стенда для изучения движения прыгающего робота. Стенд состоит из: пассивных противоударных опор - 1; несущей платформы - 2; навесного оборудования с системой активной виброзащиты - 3; акселерометра - 4; двух датчиков угловых скоростей, установленных на валах электродвигателей, - 5; дебалансов, установленных на валах электродвигателей, - 6; двухкоординатного датчика ускорений, установленного на платформе - 7; аналого-цифрового преобразователя - 8; цифрового регулятора, выполненного на базе микроконтроллера, - 9.

Управляющее напряжение, поступающее на электродвигатели, формируется ШИМ - регулятором в соответствии с принятой стратегией управления движением. Сигналы с датчиков поступают на L-card, где оцифровываются и далее поступают в компьютер для обработки. Напряжение питания от источника питания подается на схему стабилизации напряжения VR1. Полученное напряжение используется для питания микроконтроллера, а также некоторых периферийных модулей.

На рис. 16 приведен общий вид экспериментального стенда прыгающего робота. В соответствии с разработанной методикой была определена средняя скорость движения мобильного объекта для различных значений частоты вращения дебалансов. Результаты исследований в виде зависимости средней скорости движения робота от частоты вращения двигателей приведены на рис. 17.



Рис.16 Общий вид макета прыгающего робота

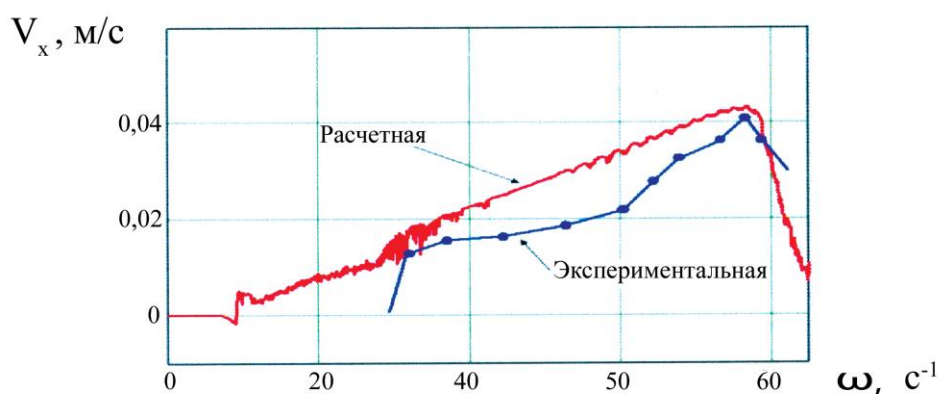


Рис. 17. Зависимость средней скорости движения робота от частоты вращения двигателей

На этом же рисунке приведена расчетная кривая, отражающая зависимость средней скорости движения робота от частоты вращения. Максимальное расхождение теории и эксперимента наблюдается в диапазоне частот от 35 до 65 (1/с).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВООДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе проведенных исследований и обобщений в диссертации получены следующие научные и практические результаты:

1. Выявлено перспективное направление совершенствования мобильных вибрационных роботов, обеспечивающих управляемое движение по заданному закону с изменением высоты и длины прыжка. Разработана конструкция вибрационного прыгающего устройства на базе двигателя постоянного тока с внутренней вращающейся массой.

2. Разработана математическая модель плоского движения прыгающего робота и получены дифференциальные уравнения, описывающие как полет



робота, так и режим его посадки на опорную поверхность. Разработан алгоритм численного интегрирования дифференциальных уравнений движения для случая, когда центр масс платформы совпадает с осью вращения внутренней массы, и получена карта параметров, обеспечивающих траектории перемещения робота с одной, двумя и тремя петлями.

3. Разработана расчетная схема робота, оснащенного пассивной противоударной системой, проведены динамические исследования периодических режимов движения робота. Разработана математическая модель движения навесного оборудования, снабженного системой активной виброзащиты, на основе модели плоского движения робота, и выполнено исследование влияния параметров регулятора, а также параметров пассивной системы на характер движения робота с навесным оборудованием. Выполнено исследование системы пассивной виброзащиты виброробота, методом конечно-элементного анализа определено напряженно-деформированное состояние упруго-вязкого элемента пассивной системы виброзащиты.

4. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд для изучения работы активной электродинамической системы, позволяющий исследовать свойства виброзащитной системы для различных стратегий управления. Разработана математическая модель, описывающая работу однокоординатной активной виброзащитной системы с электродинамическим приводом.

5. Проведены исследования качественных показателей системы автоматического управления ВЗС для различных параметров ПИД - регулятора, и выявлены оптимальные параметры, при этом применялся программный комплекс MATLAB с приложением SIMULINK и блоком оптимизации NCD.

6. Проведено исследование активной виброзащитной системы для различных стратегий управления с учетом внешних возмущений оптимального ПИД-регулятора одно и трехканальной обратной связи, показано, что учет информации об относительных скоростях и ускорениях позволяет повысить эффективность виброзащитной системы.

7. Разработан экспериментальный стенд для изучения движения прыгающего робота. Прототип робота снабжен системой измерения параметров движения устройствами обработки аналоговой и цифровой информации и системой автоматического управления, основанной на цифровом ПИД-регуляторе.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:**  
**Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации**

1. Сапронов, К.А. Исследование движения прыгающего робота [Текст] / К.А. Сапронов, Е.С. Тарасова, А.С. Яцун // Известия ВУЗов. Машиностроение. – Москва, 2009. - № 3. – С. 42 – 51.



### Другие публикации

2. Сапронов, К.А. Исследование системы автоматического управления активной защитой электронных компонентов от вибрации [Текст] / К.А. Сапронов, А.С. Яцун // Вибрационные машины и технологии: сборник научных трудов. – Курск: КГТУ, 2008. - С. 401 – 408.

3. Сапронов, К.А. Активная защита электронных компонентов от вибрации с применением электродинамического привода [Текст] / К.А. Сапронов, А.С. Яцун, А.В. Мальчиков // Вибрационные машины и технологии: сборник научных трудов. – Курск: КГТУ, 2008. - С. 408 – 414.

4. Сапронов, К.А. Исследование движения мобильного двухмассового вибрационного робота [Текст] / К.А. Сапронов, А.А. Черепанов, С.Ф. Яцун // Вибрационные машины и технологии: сборник научных трудов. – Курск: КГТУ, 2008. - С. 858-874.

5. Сапронов, К.А. Управляемая система виброзащиты навесного оборудования мобильных роботов [Текст] / К.А. Сапронов, А.С. Яцун // Теория и системы управления: материалы конференции. – Москва: РАН ИПМ им. А.Ю. Ишлинского, 2009. - С. 76.

6. Сапронов, К.А. Математическое моделирование движения прыгающего робота [Текст] / К.А. Сапронов // Инжиниринг: сборник научных трудов. – Орел: ОрелГТУ, 2009. - С. 131 – 136.

7. Лупехина, И.В. Моделирование движения прыгающего вибрационного микроробота [Текст] / И.В. Лупехина, К.А. Сапронов, С.Ф. Яцун // Известия Курского государственного технического университета. – Курск: КГТУ, 2009. - №5. - С. 25-31.

8. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2009114605 от 17.04.09. - Прыгающий робот / К.А. Сапронов, Мищенко В.Я., Яцун С.Ф.

Подписано в печать \_\_\_\_\_ 2009. Формат 60x84 1/16.

Печатных листов 1,0. Тираж 100 экз. заказ \_\_\_\_\_.

Курский государственный технический университет.

Издательско-полиграфический центр

Курского государственного технического университета.

305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94