

# ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

---

УДК 629.7.072.8

*А. В. Пинишин, Н. В. Мясникова, В. Н. Пинишин*

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ СТЕНДОМ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются системы подвижности авиационного тренажера. Предметом исследования являются передаточные функции гидроприводов динамического стенда. Цель работы – обеспечение равенства передаточных функций гидроприводов динамического стенда, их частотных характеристик и переходных процессов при любых статических и динамических изменениях неуравновешенности нагрузки.

*Материалы и методы.* Исследования системы подвижности авиационного тренажера выполнялись путем анализа контура регулирования с применением имитационного моделирования.

*Результаты.* Введение вычислителя системы подвижности обеспечивает идентичность передаточных функций гидроприводов, равенство и апериодический характер переходных процессов.

*Выводы.* За счет введения коррекции по скорости, ускорению или дифференциалу ошибки повышается точность отработки задаваемых параметров движения подвижной платформы, устраняются фоновые движения, улучшается качество воспроизведения динамическим стендом управляющих воздействий и, соответственно, увеличиваются обучающие возможности тренажера в целом.

**Ключевые слова:** авиационный тренажер, система подвижности, динамический стенд, гидропривод, следящая система, неуравновешенность, частотные характеристики, переходной процесс.

*A. V. Pinishin, N. V. Myasnikova, V. N. Pinishin*

## IMPROVING PLAYBACK ACCURACY AND QUALITY OF A DYNAMIC CONTROL ACTIONS STAND

### **Abstract.**

*Background.* The research object is the system of mobility of an aircraft simulator. The research subjects are the transfer functions of a dynamic hydraulic stand. The objective is to ensure equality between the transfer functions of a dynamic hydraulic stand, their frequency characteristics and transients under all static and dynamic changes of load unbalance.

*Materials and methods.* The research of the mobility system of an aircraft simulator was performed by analyzing the control loop using simulation modeling.

*Results.* The introduction of a computer motion system ensures identity of the transfer functions of hydraulic actuators, equality and aperiodic nature of the transients.

*Conclusions.* Introduction of velocity, acceleration or error differential correction enhances the accuracy of the set motion parameters' adjustment of the moving platform, eliminates background traffic, improves the quality of dynamic stand's control actions and, accordingly, increases the learning opportunities of a simulator in whole.

**Key words:** aircraft simulator, mobility system, dynamic stand, hydraulic actuator, monitoring system, unbalance, frequency characteristic, transient.

### Введение

В настоящее время достигнутый уровень технического совершенства систем подвижности (СП) практически снял вопросы о целесообразности ее использования в комплексных авиационных тренажерах.

Установлено, что СП позволяет естественным образом приближать психофизиологическое состояние тренирующегося к присущему реальному полету, что особенно необходимо в освоении техники пилотирования реальным воздушным судном (самолетом, вертолетом). Особенно важно, что физические ощущения являются первым во времени сигналом для пилота о реакции самолета или вертолета на изменение положения органов управления, а следовательно, это и первый сигнал к оценке необходимости изменения этого воздействия. Далее пилот дополнительно оценивает изменение положения летательного аппарата – по изменению видимого через остекления кабины изображения местности, а еще позднее пилот видит изменение показания приборов, характеризующих изменение скорости, высоты, угловых положений и т.д. Только правильная имитация на тренажере совокупности всей этой информации (в том числе и во времени) обеспечивает получение обучаемым правильных навыков пилотирования.

Улучшение качества воспроизведения акселерационной информации зависит в первую очередь от точности и синхронности работы гидроприводов динамического стенда СП, представляющих собой следящие системы. Поскольку в отработке сигнала перемещения по каждой степени свободы и их сочетании участвуют все гидроцилиндры, то в случае неточного отслеживания задаваемых входных сигналов возникают паразитные смещения по другим степеням свободы. В результате у тренирующегося экипажа возникают ложные ощущения, препятствующие привитию правильных навыков пилотирования реальным воздушным судном.

Кинематическая схема динамического стенда, перемещающего кабину авиационного тренажера в пространстве по шести (трем угловым и трем линейным) степеням свободы, приведена на рис. 1.

Динамический стенд с шестью степенями свободы состоит из платформы 1, на которой располагается полезная нагрузка (кабина авиационного тренажера), и нескольких одинаковых следящих гидроприводов по количеству силовых гидроцилиндров 2, штоки которых с помощью верхних шарниров 3 попарно присоединены к платформе, а корпуса гидроцилиндров через нижние шарниры 4 прикреплены к фундаменту 5. Каждый гидропривод состоит из последовательно соединенных элементов – датчика положения штока гид-

роцилиндра, сумматора, усилителя мощности, гидроусилителя и силового гидроцилиндра.

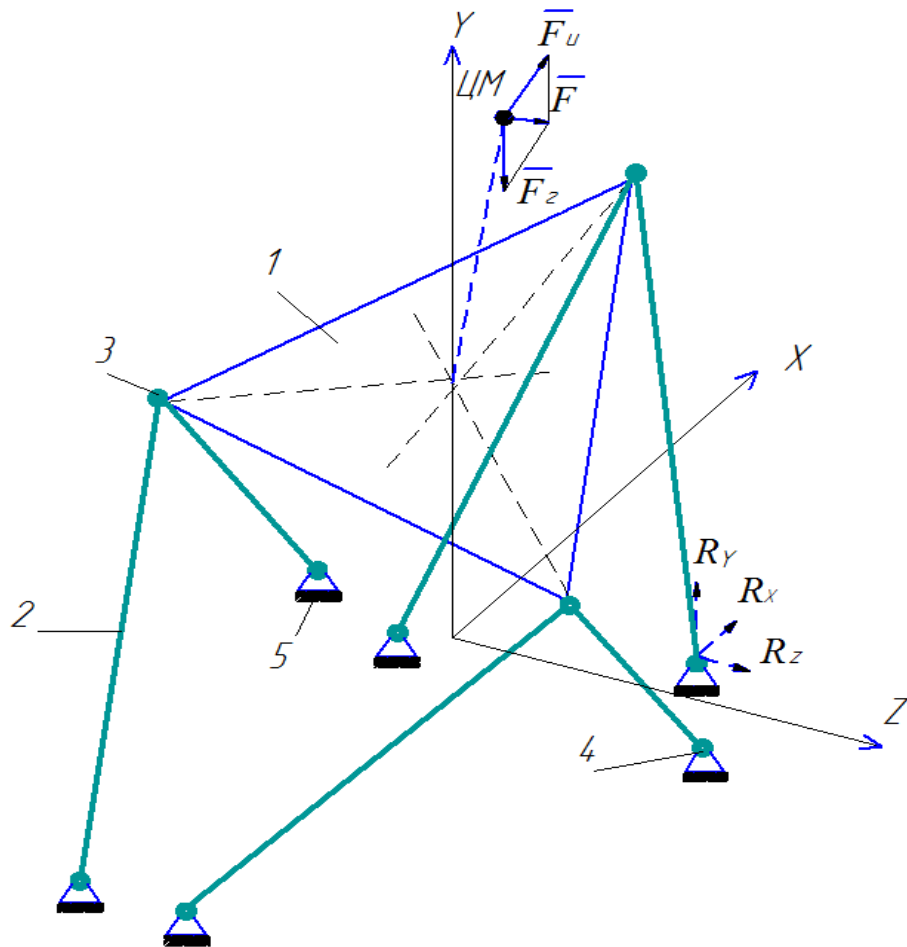


Рис. 1. Кинематическая схема динамического стенда

Поэтому одним из главных условий качественной работы комплекса следящих гидроприводов динамического стенда является высокое качество регулирования, точность и синхронность их работы, что обеспечивается равенством частотных характеристик гидроприводов и их реакций на управляющие и возмущающие воздействия за счет введения корректирующих устройств. При этом требуется не только равенство переходных процессов гидроприводов, но и аperiodический характер их протекания с высоким качеством регулирования для исключения возможности появления переходных процессов с перерегулированием и автоколебаниями, а также излишней длительности их протекания при скачках управляющего воздействия вверх и вниз для каждого гидропривода.

Выполнение этих условий осложняется тем, что каждый гидропривод динамического стенда находится под воздействием существенной неуравновешенности, обусловленной весом платформы с кабиной тренажера, приходящимися на каждый силовой гидроцилиндр. При имитации движений ре-

ального воздушного судна неуравновешенность, воздействующая на каждый силовой гидроцилиндр, постоянно меняется в зависимости от угловых положений платформы динамического стенда и ее линейных перемещений в горизонтальной плоскости.

Для улучшения частотных характеристик следящих приводов и выравнивания параметров переходных процессов при движении штоков силовых гидроцилиндров в структуру каждого гидропривода вводят коррекцию по скорости, ускорению или дифференциалу ошибки. Чем больше коэффициенты передачи контуров обратных связей по скорости и ускорению, тем меньше разница в переходных процессах. Технические решения, частично обеспечивающие выполнение этих условий, использовались в динамических стендах комплексных тренажеров самолетов ТУ-204<sup>3</sup> и ИЛ-96-300<sup>4</sup>. Однако невысокое качество регулирования и ограничения, накладываемые условиями устойчивости контуров привода, не позволяли обеспечить такие коэффициенты передачи контуров следящей системы, которые позволили бы полностью уравнивать переходные процессы и придать им апериодический характер протекания при движении штоков силовых гидроцилиндров вверх и вниз.

Более существенную компенсацию влияния действующей на шток каждого силового гидроцилиндра неуравновешенности, обусловленной весом платформы с кабиной тренажера, удалось получить в динамическом стенде нового поколения ДС6-ИМП [1, 2] по сравнению с динамическими стендами ТУ-204, ИЛ-96-300, что позволило заметно выровнять переходные процессы гидроприводов. Устройство компенсации действующей на гидроцилиндр неуравновешенности, присутствующее в структуре каждого гидропривода, производит увеличение или уменьшение коэффициента усиления гидропривода в зависимости от взаимного положения силовых гидроцилиндров в пространстве и по сигналу вычислительного устройства каждого гидропривода, учитывающего изменение момента неуравновешенности, действующего на данный гидропривод. Однако в динамическом стенде ДС6-ИМП при выравнивании переходных процессов следящих гидроприводов при их движении по и против неуравновешенности учитываются лишь текущие положения штоков гидроцилиндров, без учета величины и направления их векторов скоростей и ускорений и не обеспечивается необходимого качества регулирования. Вследствие этого даже при относительном равенстве переходных процессов следящих гидроприводов возможно и перерегулирование с автоколебаниями, и необоснованно большая длительность переходных процессов. Такое движение штоков силовых гидроцилиндров приводит либо к паразитному «раскачиванию» платформы с кабиной тренажера, либо к запаздываниям в обработке управляющих сигналов, в результате у тренирующегося экипажа возникают неадекватные ощущения, препятствующие привитию правильных навыков пилотирования.

Поэтому решение задач достижения равенства передаточных функций гидроприводов, их частотных характеристик и переходных процессов с апериодическим характером протекания при любых статических и динамических изменениях неуравновешенности нагрузки на каждый гидропривод динами-

<sup>3</sup> КТС ТУ-204, Техническое описание, ПКБМ, г. Пенза.

<sup>4</sup> КТС ИЛ-96-300, Техническое описание, ПКБМ, г. Пенза.

ческого стенда СП при любых перемещениях кабины авиационного тренажера позволит значительно повысить точность и качество воспроизведения акселерационной информации.

Качественные параметры каждого гидропривода определяются как функция входящих в него составляющих: гидроцилиндра, гидроусилителя, датчиков, элементов электрической схемы управления и т.д. Все перечисленные звенья имеют неизменяемую в процессе работы передаточную функцию, и только гидроцилиндр имеет передаточную функцию  $W_{\text{ГЦ}}(p)$ , изменяющуюся в зависимости от текущего положения его в пространстве, неуравновешенности нагрузки, действующей на него и параметров движения его штока:

$$W_{\text{ГЦ}}(p) = \frac{k_{\text{ГЦ}}}{p(T_{\text{Г}}T_{\text{М}}p^2 + T_{\text{М}}p + 1)}, \quad (1)$$

или

$$W_{\text{ГЦ}}(p) = \frac{k_{\text{ГЦ}}}{p(\tau^2 p^2 + 2\xi p + 1)},$$

где  $k_{\text{ГЦ}}$  – коэффициент усиления гидроцилиндра;  $\tau = \sqrt{T_{\text{Г}}T_{\text{М}}}$  – обобщенная постоянная времени;  $\xi = \frac{T_{\text{М}}}{2\sqrt{T_{\text{Г}}T_{\text{М}}}}$  – коэффициент затухания;  $p$  – оператор Лапласа;  $T_{\text{Г}}$  – гидравлическая постоянная времени;  $T_{\text{М}}$  – механическая постоянная времени.

При этом  $T_{\text{Г}} = \text{const}$ , так как зависит от неизменяющихся величин – объемного модуля упругости рабочей жидкости, ее объема и т.п.

Механическая постоянная времени определяется по формуле

$$T_{\text{М}} = \frac{R_i r_{\text{ж}}}{g F_{\text{П}}}, \quad (2)$$

где  $R_i = \text{var}$  – реакция  $i$ -го нижнего шарнира;  $r_{\text{ж}} = \text{const}$  – приведенное значение утечек рабочей жидкости;  $F_{\text{П}} = \text{const}$  – площадь поршня гидроцилиндра;  $g = \text{const}$  – ускорение свободного падения.

Таким образом, для компенсации несинхронностей, действующих на каждый силовой гидроцилиндр, необходимо в реальном масштабе времени определять возникающие фактические значения реакций  $R_i$  нижних шарниров, которые зависят от величины и направления суммарного усилия  $\bar{F}$ , приложенного к центру масс (ЦМ) (рис. 1) и представляющего собой геометрическую сумму:

$$\bar{F} = \bar{F}_{\text{И}} + \bar{F}_{\text{Г}},$$

где  $\bar{F}_{\text{И}} = m\bar{a}_{\text{И}} = \text{var}$  – инерциальная сила,  $\bar{a}_{\text{И}} = \text{var}$  – ускорение, действующее в ЦМ,  $\bar{F}_{\text{Г}} = m\bar{g} = \text{const}$  – гравитационная сила тяжести;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\bar{F} = m(\bar{a}_{\text{И}} + \bar{g})$ .

Решения обозначенных выше проблем удалось добиться введением в динамический стенд, структурная схема которого приведена на рис. 2, последовательно соединенных блока констант, вычислительного устройства, блока частотных характеристик, а в каждый гидропривод – регулируемого узла коррекции.

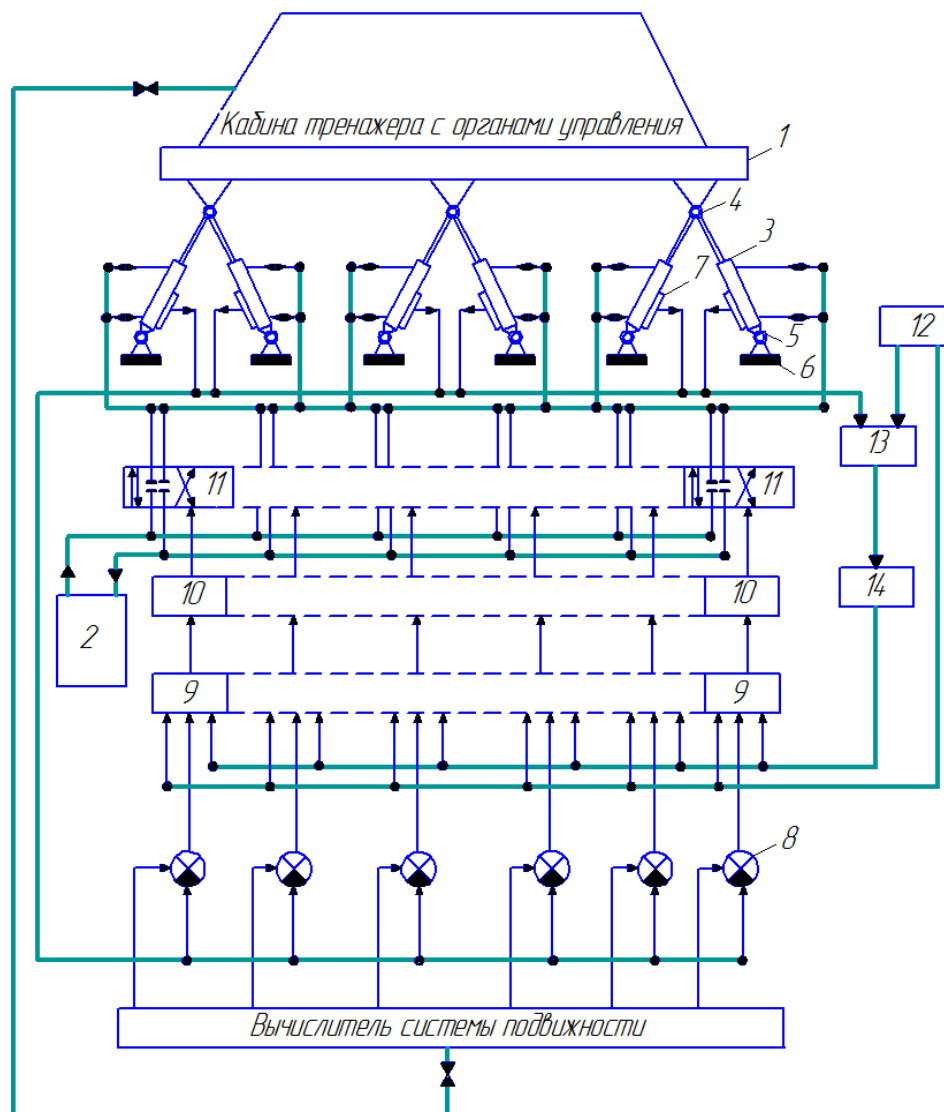


Рис. 2. Структурная схема динамического стенда

Динамический стенд, структурная схема которого приведена на рис. 2, содержит подвижную платформу 1, источник гидропитания 2 и несколько одинаковых следящих гидроприводов по количеству силовых гидроцилиндров 3, штоки которых с помощью верхних шарниров 4 попарно присоединены к платформе 1, а корпуса гидроцилиндров 3 через нижние шарниры 5 прикреплены к фундаменту 6. Каждый гидропривод состоит из последовательно соединенных датчика 7 положения штока гидроцилиндра 3, сумматор-

ра 8, регулируемого узла коррекции 9, усилителя мощности 10, гидроусилителя 11 и силового гидроцилиндра 3. В состав динамического стенда также входят последовательно соединенные блоки – блок констант 12, вычислительное устройство 13 и блок частотных характеристик 14.

При перемещении подвижной платформы динамического стенда в каждый момент времени с блока констант 12 на соответствующие входы вычислительного устройства 13 поступают значения координат нижних шарниров 5 и расстояний между верхними шарнирами 4, а на остальные входы – текущие значения сигналов с датчиков 7 положения штоков гидроцилиндров 3. Вычислительное устройство 13 вычисляет фактическое положение гидроцилиндров 3 и положение подвижной платформы относительно начальной системы координат, а также линейные и угловые ускорения верхних шарниров 4 и величины реакций нижних шарниров 5. Вычисленные параметры с выхода вычислительного устройства 13 поступают на входы блока частотных характеристик 14, моделирующего имеющиеся амплитудные и фазовые частотные характеристики каждого гидропривода в реальном масштабе времени, которые с его выходов поступают на соответствующий вход регулируемого узла коррекции 9 каждого гидропривода. При этом на другой вход каждого регулируемого узла коррекции 9 поступают с выхода блока констант 12 желаемые амплитудно-фазовые частотные характеристики. По результатам сравнения параметров имеющейся и желаемой амплитудно-фазовых частотных характеристик соответствующего гидропривода моделируются параметры (индивидуальные для каждого гидропривода) частотных характеристик регулируемого узла коррекции 9. Таким образом, вычислительное устройство 13, блок констант 12 и блок частотных характеристик 14, взаимодействуя с регулируемым узлом коррекции 9 каждого гидропривода, в каждый момент времени обеспечивают высокое качество регулирования, демпфируя «разгруженный» гидропривод и увеличивая добротность «перегруженного» гидропривода. Тем самым обеспечивается желаемая идентичность передаточных функций гидроприводов, равенство и апериодический характер переходных процессов. При этом наиболее полно учитывается влияние неуравновешенности, действующей на каждый силовой гидроцилиндр динамического стенда СП, изменяющейся в зависимости от текущего положения гидроцилиндра в пространстве, скоростей, ускорений движения его штока, определяемых по совокупности изменения величин перемещений, скоростей и ускорений штоков всех силовых гидроцилиндров с учетом направления их движения.

Результирующие частотные характеристики каждого гидропривода приобретают устойчивый вид, приведенный на рис. 3, а график переходного процесса имеет апериодический характер, идентичный для всех гидроприводов динамического стенда.

### **Заключение**

За счет введения коррекции по скорости, ускорению или дифференциалу ошибки повышается точность отработки задаваемых параметров движения подвижной платформы, устраняются фоновые движения, улучшается качество воспроизведения динамическим стендом управляющих воздействий и, соответственно, увеличиваются обучающие возможности тренажера в целом.

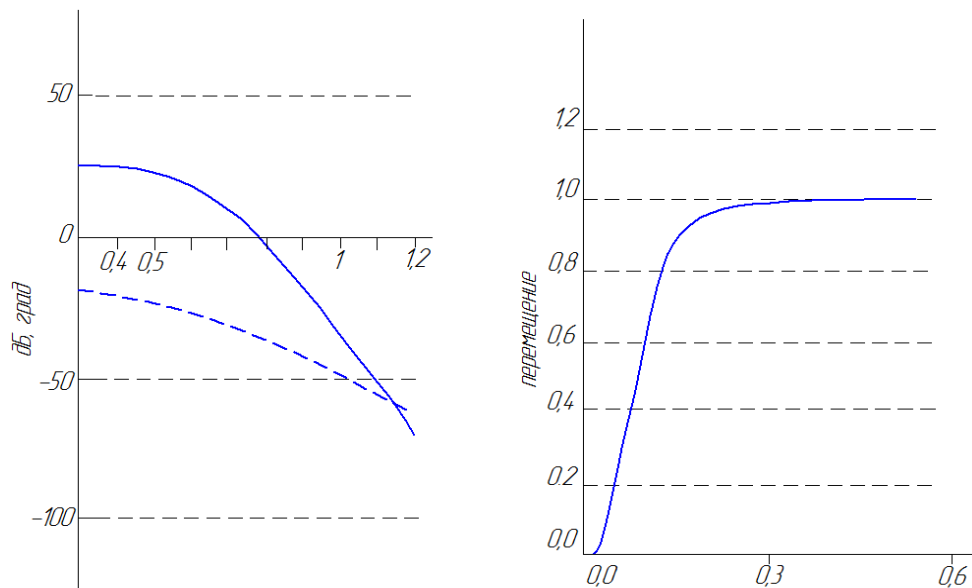


Рис. 3. Частотные характеристики и переходной процесс гидроприводов динамического стенда

#### Список литературы

1. Патент РФ № 2129305. G09B9/08. Динамический многостепенной стенд / Жуков А. А., Смирнов Б. А., Тимаков В. М., Федоров В. С. ; патентообл. Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал». – № 96124554/06; заявл. 27.12.1996 ; опубл. 20.04.1999.
2. Патент РФ № 2259597. G09B9/08. Динамический многостепенной стенд / Адеский Л. Б., Новоселов Б. В., Смирнов Б. А., Тимаков В. М., Федоров В. С., Пинишин В. Н. ; патентообл. Открытое акционерное общество «Пензенское конструкторское бюро моделирования». – № 2004110448/28 ; заявл. 06.04.2004 ; опубл. 27.08.2005.

#### References

1. Patent Russian Federation No. 2129305. G09V9/08. Dynamic multiphase stand. Zhukov A. A., Smirnov B. A., Timakov V. M., Fedorov V. S.; applicant and patentee All-Russian Scientific-Research Institute "Signal". No. 96124554/06; appl. 27 December 1996; publ. 20 April 1999.
2. Patent Russian Federation No. 2259597. G09V9/08. Dynamic multiphase stand. Adesskiy L. B., Novoselov B. V., Smirnov B. A., Timakov V. M., Fedorov V. S., Pinishin V. N.; Public company "Penza simulation design and engineering center". No. 2004110448/28; appl. 6 April 2004; publ 27 August 2005.

**Пинишин Алексей Владимирович**  
аспирант, Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: avitel@pnzgu.ru

**Мясникова Нина Владимировна**  
доктор технических наук, профессор,

**Pinishin Aleksey Vladimirovich**  
Postgraduate student, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

**Myasnikova Nina Vladimirovna**  
Doctor of engineering sciences, professor,



кафедра автоматике и телемеханики,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: superlobzik@ya.ru

sub-department of automation  
and remote control, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

***Пинишин Владимир Николаевич***  
пенсионер, бывший сотрудник  
ОАО «Пензенское конструкторское  
бюро моделирования» (Россия, г. Пенза,  
ул. Гоголя, 60)

E-mail: avitel@pnzgu.ru

***Pinishin Vladimir Nikolaevich***  
Retired employee of the Public company  
“Penza simulation design and engineering  
center” (60 Gogolya street, Penza, Russia)

---

УДК 629.7.072.8

**Пинишин, А. В.**

**Повышение точности и качества воспроизведения динамическим  
стендом управляющих воздействий / А. В. Пинишин, Н. В. Мясникова,  
В. Н. Пинишин // Известия высших учебных заведений. Поволжский реги-  
он. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 62–70.**