

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента, к.т.н. Колюбина С.А.  
на диссертацию Горлатова Дмитрия Владимировича  
«Алгоритмы управления типовыми режимами работы мехатронных  
многооторных вибрационных установок», представленную на соискание  
учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 -  
«Информационно-измерительные и управляющие системы (в  
машиностроении)»**

### **Актуальность темы**

Диссертационная работа Д.В. Горлатова посвящена разработке и реализации алгоритмов управления замкнутого типа, предназначенных для повышения эффективности работы виброустановок, характеризующихся существенной нелинейностью и нестационарностью параметров. Отсутствие на практике полноценной априорной информации о параметрах объекта управления и среде функционирования мотивирует применение подобных регуляторов.

В диссертационной работе развивается подход управляемого пуска и прохождения резонансной зоны и управления кратной синхронизацией для двух- и трехоторных виброустановок. Алгоритмы, полученные в работе, могут повысить производительность и улучшить качество технологических процессов, выполняемых вибромашинами, уже введенными в эксплуатацию, без необходимости их модернизации и внесения существенных изменений в их конструкцию. Подтверждением актуальности задач, решаемых автором, является также то, что исследования проводились в рамках гранта, выделенного по соответствующей тематике: «УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ И СЕТЯМИ», грант РНФ 14-29-00142.

### **Содержание работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений.

Во введении обоснована актуальность темы и представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируются существующие подходы в области управления вибрационными установками, описываются исследовательские вибростенды, в том числе, используемый в экспериментах вибростенд СВ-2М и ставится задача диссертационной работы. В данной главе также предложена формулировка приближенной кратной частотно-координатной синхронизации, которая является первым научным результатом диссертационной работы.

Вторая глава посвящена синтезу математических моделей многороторных вибрационных установок и разработке методики перехода от них к компьютерным моделям, реализуемым с помощью MATLAB.

В третьей главе синтезируются алгоритмы управления пуском и прохождением резонансной зоны, простой и кратной частотно-координатной синхронизацией неуравновешенных роторов для двух- и трехроторных вибрационных установок. В данной главе также разработан нестационарный наблюдатель для восстановления скорости вертикальных колебаний платформы, позволяющий реализовать полученные алгоритмы в случае неполной измеряемости переменных вектора состояний.

Четвертая глава содержит результаты компьютерного исследования моделей вибрационных установок из второй главы под управлением алгоритмов, полученных в третьей главе. В MATLAB произведено моделирование работы виброустановок с учетом ограничений по уровню управляющих воздействий; динамики электроприводов, вращающих неуравновешенные роторы; упругости карданных валов, соединяющих приводы и роторы; наличия груза переменной массы.

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования алгоритма управления пуском и прохождением резонансной зоны и алгоритма управления синхронизацией роторов на двухроторном лабораторном вибростенде СВ-2М.

Содержание автореферата в целом соответствует содержанию диссертации, хотя и имеет некоторые неточности. Тем не менее, **автореферат** полностью отражает основные выводы, полученные результаты и положения, выносимые на защиту.

### **Научная новизна и практическая значимость**

В работе получены следующие новые научные результаты:

- определение приближенной кратной частотно-координатной синхронизации роторов многороторных вибрационных установок;
- алгоритмы управления простой и кратной синхронизацией роторов двухроторной виброустановки с возможностью управления сдвигом фаз роторов;
- два типа алгоритмов управления простой и кратной синхронизацией роторов вибрационных установок с числом роторов не менее трех;
- нестационарный наблюдатель для оценки линейной скорости платформы виброустановки.

Также в работе получена методика реализации математических моделей виброустановок как объектов управления в MATLAB с учетом нестационарности груза, динамики электроприводов и упругости карданных валов, соединяющих двигатели и неуравновешенные роторы.

### **Достоверность результатов**

По результатам, приведенным в диссертационной работе Д.В. Горлатова, опубликованы 18 научных статей, в частности, 3 статьи – в сборниках материалов научных конференций, входящих в Scopus, и 3 статьи – в научных журналах из перечня ВАК.

Эффективность работы полученных алгоритмов управления и наблюдателя подтверждается результатами компьютерного моделирования. Алгоритмы экономичного пуска и прохождения резонанса и алгоритм синхронизации для двухроторной виброустановки были испытаны на лабораторном вибростенде и показали свою работоспособность.

## Критический анализ представленной на оппонирование диссертации

В целом диссертация хорошо структурирована и оставляет хорошее впечатление после прочтения. Очевидной является практическая направленность работы. Диссертация содержит массу результатов компьютерного моделирования и натуральных испытаний предлагаемых алгоритмов управления и наблюдателя. В то же время, по мнению оппонента, некоторые результаты исследования не были достаточно подробно теоретически проанализированы и обоснованы.

Оппонент считает необходимым высказать следующие **замечания и предложения по диссертационной работе:**

1. В уравнении 1.1, описывающем уравнение Лагранжа 2-го рода, отсутствует член, зависящий исключительно от обобщенных координат системы и соответствующий действию гравитационных сил и сил упругой деформации пружин вибрационной установки. Данный факт требует дополнительного пояснения.

2. Цель управления при синтезе алгоритмов пуска, прохождения резонанса и кратной синхронизации включает достижение желаемого уровня полной энергии системы. При этом не указано, каким образом производился расчет ее текущего значения «Н» и выбор целевого уровня «Н\*», если динамические параметры системы, входящие в уравнения для кинетической и потенциальной энергии, являются неизвестными.

3. Для полученного наблюдателя вертикальной скорости платформы по измерениям соответствующей координаты было бы целесообразно провести сравнительный анализ обеспечиваемых динамических и точностных показателей сходимости оценок по отношению к простой схеме численного дифференцирования, а также другим широко известным наблюдателям.

4. В уравнении 1.8 отсутствует пояснение величины  $L_{sr}$ .

5. При определении приближенной кратной частотно-координатной синхронизации в уравнениях 1.9 и 1.10 указаны требуемые точности синхронизации  $\epsilon$  и  $\epsilon^*$ . Стоило бы указать, за счет каких параметров предлагаемых регуляторов можно обеспечить любые заданные точности, в том числе бесконечно

малые отклонения. В противном случае, необходимо было провести оценку, какие точности являются достижимыми в отдельных случаях при действующих ограничениях и принятых допущениях.

6. В работе не предлагается конструктивная процедура по выбору весовых коэффициентов  $\alpha$  в уравнении 1.12 и далее при формировании целевых функций.

7. Требуется пояснение, насколько математические модели многороторных вибрационных установок, подробный вывод которых на основании метода Эйлера-Лагранжа представлен в разделе 2, являются новыми. В целом, утверждение относительно научной новизны предложенной методики моделей многороторных вибрационных установок требует комментариев автора.

8. Пренебрежения некоторыми членами, допущенные для упрощения вычислений полной энергии системы (уравнения 3.13 и 3.14), а также при синтезе упрощенного пропорционально-интегрального алгоритма скоростного градиента (уравнение 3.17), требуют обоснования, например, в части сохранения устойчивости замкнутой системы. По мнению оппонента, представленные результаты компьютерного моделирования не являются в этом смысле достаточным обоснованием. Для большей наглядности можно было бы, например, продемонстрировать переходные процессы в системе при использовании оригинального алгоритма скоростного градиента и его предложенной модификации.

9. Для алгоритмов управления пуском и прохождения резонансной зоны 3.28 и 3.29 стоило бы привести пояснение, каким образом они позволяют достичь сформулированную цель управления 1.5-1.6, т.е. достижение целевого уровня полной энергии при ограниченном управлении.

10. Автору стоило бы пояснить, почему на многих рисунках, соответствующих изменению угловых скоростей роторов, как для компьютерного моделирования, так и для экспериментальных исследований, наблюдаются высокочастотные колебания с амплитудой порядка 5-10 рад/с. Какими факторами это обусловлено?

11. По мнению оппонента, некорректной является формулировка «пуск без управления». Более точно было бы говорить о задании пусковых моментов без обратной связи.

12. По мнению оппонента, приводить в Приложениях 1-7, занимающих порядка 70 страниц текста, листинги программ, содержащие длинные цепочки арифметических операций, было излишне. Более информативно было бы представить блок-схемы или псевдокод соответствующих программ.

### Заключение

Несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа Горлатова Дмитрия Владимировича представляет собой законченную научную работу, посвященную решению актуальной задачи управления вибрационными установками. В работе получены новые научные и практические результаты. Публикации соискателя адекватным образом отражают основной объем проведенных диссертационных исследований.

Диссертационная работа написана технически грамотно, ее структура, содержание и объем соответствуют требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Горлатов Дмитрий Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении)».

Официальный оппонент:

кандидат технических наук,

доцент кафедры Систем управления и информатики,

Университета ИТМО

Подпись удостоверяю



С.А. Колюбин

О.В. Котусева