

А.Ю. Забелин<sup>1</sup>, Л.В. Смирнова<sup>1</sup>, С.П. Круглов<sup>1</sup>, Ковыршин С.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация.

## РАЗРАБОТКА МАКЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ С АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ

**Аннотация.** Описывается разработка макета вибрационной технологической производственной установки поверхностного упрочнения длинномерных деталей с реализацией автоматического регулирования амплитуды колебаний различных частей виброустановки в условиях действия возмущений. Поддержание амплитуд колебаний необходимо для качественной обработки детали. В настоящее время указанная установка не автоматизирована и используется с ручной подстройкой амплитуды колебаний. Закон управления амплитудой колебаний основан на методе статической адаптации. Представлены результаты расчета параметров отдельных частей макета, описаны их характеристик. Также представлены алгоритмы обработки информации с датчиков и автоматического регулирования заданными значениями амплитуды колебаний. Приведена модель системы управления установкой с визуализацией ее работы, выполненной в программной среде Codesys.

**Ключевые слова:** вибрация, демпфирование вибрации, вибрационная установка, дробеструйная обработка, макет, равенство амплитуд, производственный процесс, автоматизация.

A.Y. Zabelin<sup>1</sup>, L.V. Smirnova<sup>1</sup>, S.P. Kruglov<sup>1</sup>, Kovyrshin S.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk state University of railway transport, Irkutsk, Russian Federation.

## DEVELOPMENT OF THE LAYOUT OF THE TECHNOLOGICAL VIBRATION UNIT WITH AUTOMATIC REGULATION OF THE VIBRATION AMPLITUDE

**Abstract.** The article describes the development of a model of a vibration technological production plant for surface hardening of long-length parts with the implementation of automatic control of the amplitude of vibrations of various parts of the vibration plant under the conditions of disturbances. Maintaining the oscillation amplitudes is necessary for high-quality machining of the part. Currently, this installation is not automated and is used with manual adjustment of the oscillation amplitude. The law of oscillation amplitude control is based on the static adaptation method. The results of calculating the parameters of individual parts of the model are presented, and their characteristics are described. Algorithms for processing information from sensors and automatic control of the specified values of the oscillation amplitude are also presented. A model of the installation management system with a visualization of its operation performed in the Codesys software environment is presented.

**Keywords:** vibration, vibration damping, vibration machine, shot blasting, breadboard, amplitude equality, manufacturing process, automation.

### Введение

Ещё с 1849 года человечество задумывалось о применении вибрации в производстве для облегчения труда и повышения качества выходного продукта и в настоящее время вибрационные машины встречаются в различных отраслях промышленности от горнодобывающей и сельскохозяйственной до строительной и химической отрасли. Особенностью вибрационных технологических установок является наличие органов, позволяющих создавать вибрационное поле, оказывающее определённое воздействие на тот или иной обрабатываемый объект, при этом поддерживая заданные качественные параметры во время всего осуществляемого процесса. Однако настройка параметров таких аппаратов требует особой точности и затраты по времени для мелкосерийных или редко изготавливаемых деталей. Большинство вибрационных устройств разрабатываются под уже заданные параметры и обладают предустановленными надстройками технологического процесса для обеспечения его должной работы. Но далеко не все параметры и объекты могут быть заранее обнаружены и использованы для ручного ввода параметров с целью автоматизации процесса [1, 2].

Например, в авиационном заводе Улан-Удэ при осуществлении технологических процессов, связанных с упрочнением деталей существует множество виброустановок, в которых

приходится осуществлять регулировку параметров в ручную, что, конечно же, сказывается на эффективности проводимых работ [3].

В силу указанного, создание системы управления амплитудой колебаний технологической вибрационной машины является перспективной и актуальной в условиях априорной неопределенности исходных данных объекта.

Принимая во внимание разнообразие форм, типов, центров тяжести, моментов инерции, получаемых с заготовок для применения вибрационных процессов, становится очевидным, что с использованием классических методов управления невозможно учесть все возможные состояния среды для того, чтобы под каждый из объектов вручную подобрать соответствующий алгоритм управления колебаниями. Следовательно, необходимо создать универсальный алгоритм с возможностью управления колебаниями в априорной неопределенности.

Потому создание автоматизированной системы технологического вибрационного процесса, при котором не известны заранее такие параметры заготовки как: масса, момент инерции, расположение центра тяжести, а также меняющиеся в процессе эксплуатации параметры самой виброустановки является предметом исследования настоящей статьи.

Основной задачей при создании макета вибрационной установки – является разработка алгоритма управления, обеспечивающего поддержание на заданном уровне параметров технологического процесса.

### Выбор типа системы регулирования

Для выбора системы регулирования было предложено две идеи, заключающиеся в разных принципах возбуждения и гашения колебаний на основе механической и акустической волны, однако вскоре последовал отказ от использования акустических волн в связи с повышенным вредом человеческому организму и риску наступлению резонансов с одновременной работой нескольких устройств [4-6].

Тип 1 (см.рис.1) – представляет собой треугольную площадку на каждой из вершин которых закреплён двигатель вместе с грузом, создающий вибрации. Под рабочей поверхностью расположена пневмокамера с регулируемым давлением (регулируемая жесткость подвески) из 3 секций, скреплённых воедино.

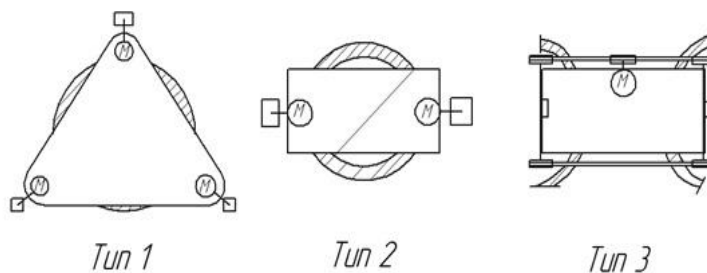


Рис.1. Системы регулирования

Преимуществами данной установки являются возможности регулирования на 3 вершинах при перемещении груза не только по одной оси координат. Недостатками являются дополнительные нагрузки на управляющий микроконтроллер в связи с применением дополнительных датчиков контроля и более усложнённой системы управления давлением в камерах. Также существует проблема о неодновременном вращении и распределении нагрузок во время монтажа: чем больше агрегатов в устройстве, тем ниже надёжность.

Тип 2 (рис.1) состоит прямоугольной площадки на которой установлены 2 двигателя на противоположных концах рабочей поверхности. Данный вариант исполнения является более упрощённым по сравнению с типом 1, однако при сокращении количества двигателей и использовании меньшей площади возникают следующие проблемы.

Наличие велосипедных камер, используемых в качестве регулируемой жесткости подвески при соединении секций в круг, происходят заломы камеры, что чревато неоднородностью жесткости камеры и будущего ее разрыва. Однако, если использовать полностью круговое соединение без уменьшения рабочей области, такой вариант установки вполне выигрышен.

Тип 3 (рис.1) стал переосмыслением предыдущих концепций вибростенда и принял прямоугольную форму с 1 двигателем, передающим момент на 2 участка рабочей зоны, в которых на валах установлены эксцентрики. Пневмокамера стала отдельной, что позволило дополнительно получить место под столом для монтажного оборудования.

Из проделанного анализа конструктивных решений для прототипа принимаем систему с двумя валами и эксцентриками, расположенными на противоположных сторонах рабочей поверхности, соединённые ременной передачей, двумя пневмопружинами, разъединёнными на две секции. Пневмопружина представляет собой эластичную и герметичную камеру для подачи/откачки воздуха.

### Разработка элемента, оказывающего вибрационные воздействия

Так как было решено выбрать реализацию системы “Тип 3”, то для обеспечения вибрационных возмущения было принято решение о расчете эксцентрика, закрепляемого на валах, находящихся в противоположных сторонах рабочей области стола. Материал изготовления свинец, способ – литьё в песчано-глинистую форму (рис.2.). Вес составляет 0,1 кг. В таблице 1 приведены основные параметры эксцентрика

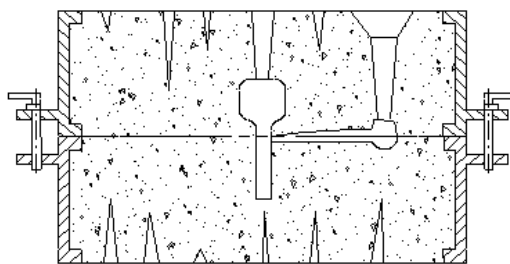


Рис.2. Литьё в песчано-глинистую форму

Табл.1 Характеристики эксцентрика

Общая площадь	4,99 см <sup>2</sup>
Координаты центра тяжести	2,46 см; 1,08 см
Главные радиусы инерции	0,6 см; 1,4 см

### Общий вид макета

Макет (см. рис.3) состоит из компрессора, двух датчиков – акселерометров, измеряющих амплитуды колебаний, двух датчиков концевой положения, двух датчиков давления в камерах. Для обеспечения безопасности макет снабжён щитами безопасности, находящиеся по обе стороны рабочей поверхности, чтобы предотвратить вылет эксцентриков за установку в случае чрезвычайной ситуации. Для реализации системы впуска/выпуска воздуха на рисунке представлены форсунки, однако рекомендуется использовать электроклапаны или систему, состоящую из пневматических распределителей типа 5/3 помимо распределителей стоит включить системы конденсации и фильтрации воздушного потока для увеличения срока службы элементов и экономии воздуха расхода. Пневмопружины оснащены дросселями для регулирования воздушного потока на его входе в камеру. Панель управления оператора, на которой осуществляется визуализация параметров технологического процесса. Каретка с грузом, обеспечивающее симуляцию центра масс.

Более 70% объектов выполнено при помощи аддитивных технологий или изготовлено из дерева.

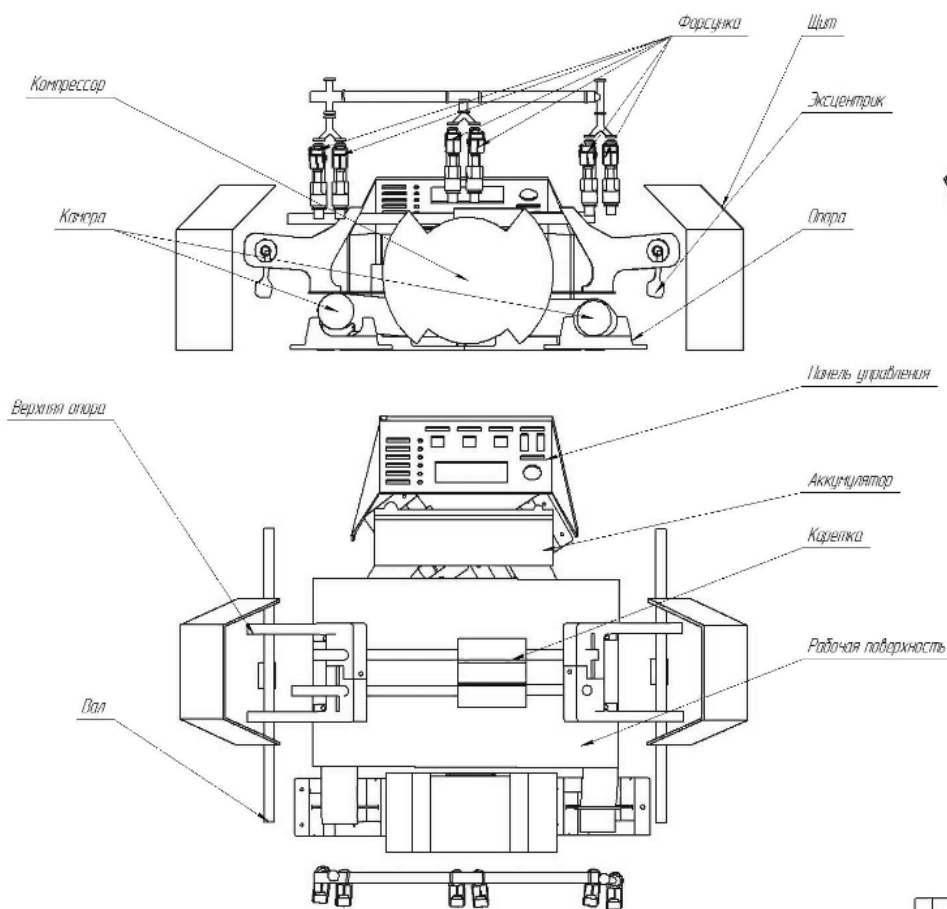


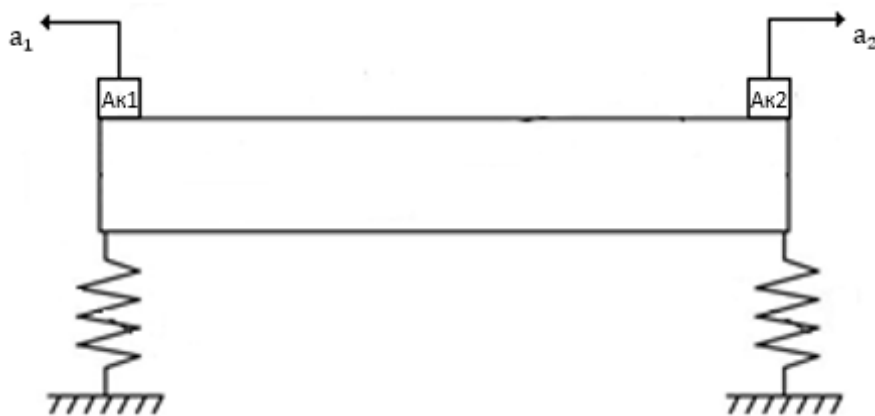
Рис.3. Общий вид макета

### Обработка информации с датчиков

Снимая показания сигналов с акселерометров мы получаем значительные помехи, которые мешают реализации автоматического регулирования пневмопружины. Задача состоит в том, чтобы сгладить полученные сигналы, для чего будем использовать фильтр низких частот (ФНЧ). ФНЧ подавляет все частоты входного сигнала выше частоты среза и пропускает без изменений все частоты ниже частоты среза.

На рис.4 представлена схема вибростенда с датчиками акселерометров, которые используются для получения информации об амплитудах колебаний левого и правого конца вибростенда. Ниже описывается алгоритм обработки сигналов с акселерометров для получения сигналов об амплитудах:

- вычитаем из сигналов акселерометров ускорение свободного падения, т.к. на датчики помимо колебаний действует и ускорение свободного падения;
- берем полученный сигнал по модулю, поскольку нам нужна амплитуда колебаний;
- усредняем полученное значение с помощью фильтра низких частот (ФНЧ), чтобы устранить высокочастотные помехи.



**Рис. 4. Схема вибростенда с датчиками акселерометров**

В качестве ФНЧ будем использовать аperiodическое звено с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени  $T_\phi$  ( $p$  – переменная преобразования Лапласа):

$$\frac{1}{T_\phi p + 1} \quad (1)$$

В соответствии с указанным алгоритмом формируемые сигналы амплитуд будут иметь значение:

$$A_j = \frac{1}{T_\phi p + 1} |a_j - g|, \quad (2)$$

где  $j$  – это номер датчика 1 и 2;  $A_j$  – получаемая амплитуда колебаний;  $a_j$  – измеряемый сигнал с соответствующего акселерометра;  $g$  – ускорение свободного падения.

Для реализации в микроконтроллере полученной зависимости (2), выведем ее в дискретном времени.

Для простоты дальнейших рассуждений представим входной сигнал для ФНЧ как  $x$  а выходной как  $y$ . Тогда зависимость (2) может быть изображена в функциях времени как:

$$p y(p) T_\phi + y(p) = x(p) \quad (3)$$

или ( $t$  – текущее время):

$$T_\phi y'(t) + y(t) = x(t) \quad (4)$$

Записываем выражение (4) в разностном виде:

$$\frac{T_\phi (y_i - y_{i-1})}{\Delta t} + y_i = x_i, \quad (5)$$

где  $i$  – момент времени,  $\Delta t$  – выборный период между указанными моментами времени.

Преобразуя выражение (5) окончательно получаем:

$$y_i = \frac{T_\phi}{T_\phi + \Delta t} y_{i-1} + \frac{\Delta t}{\Delta t + T_\phi} x_i. \quad (6)$$

### Описание алгоритма управления

Задачи автоматизированного управления технологическими вибрационными установками рассматриваются во многих работах, см., например [7-11]. Но в силу значительной нелинейности объекта управления эффективных решений до сих пор найдено не было. Для данной работе для построения автоматизированного управления вибрационной установкой используется метод статической адаптации [12, 13].

Характерным отличием схемы от традиционной следящей системы с ПИД-регулятором считается применение блока «умножение – деление» на входе в замкнутый контур управления вместо «сложение-вычитание». В связи с этим система управления является нелинейной, и поэтому аналитический анализ ее функционирования существенно усложнен.

Рассмотрим структурную схему одного канала управления (рис.5).

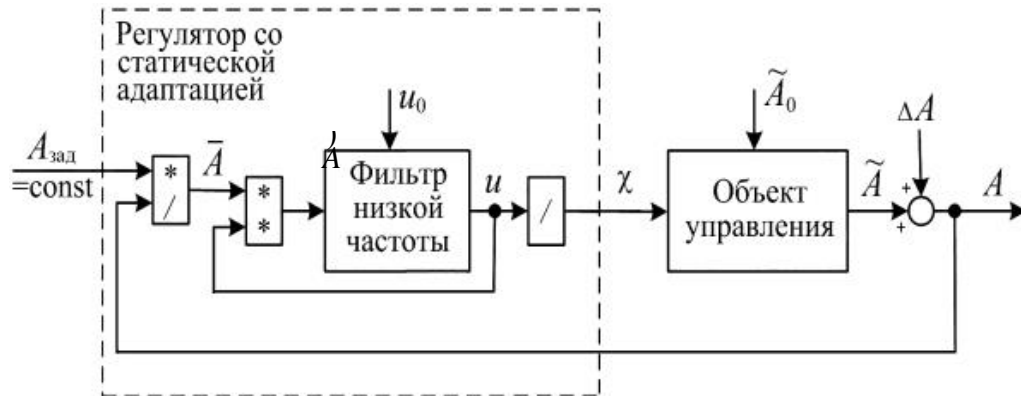


Рис.5. Структурная схема канала управления (из

Находим отношение заданной амплитуды от фильтрованного значения амплитуды с объекта управления по предыдущему шагу:

$$\bar{A}_i = A_{\text{зад}} / A_{i-1}. \quad (7)$$

Далее умножаем полученное выражение (7) на выходной сигнал фильтра. Получаем входное значение фильтра:

$$\tilde{A}_i = \bar{A}_i \cdot u_{i-1} \quad (8)$$

Подставляем данное выражение (8) в формулу ФНЧ по (6) для дискретной реализации. Получаем текущий фильтрованный сигнал ( $T$  – выбранная постоянная времени фильтра по рис.5):

$$u_i = \frac{T}{T + \Delta t} u_{i-1} + \frac{\Delta t}{\Delta t + T} A_i \quad (9)$$

Находим отношение 1 от текущего фильтрованного сигнала (9) и получаем сигнал управления для давления в камере ( $\chi$ ):

$$\chi_i = u_i^{-1} \quad (10)$$

### Реализация работы системы регулирования пневмобаллонов

Использование эластичных и гибких пневматических демпферов, позволяет осуществлять регулировку значений коэффициента жёсткости на большом интервале значений, подстраивая заполненность воздухом внутри пневмопружины под нужное показание. Следова-

тельно, для обеспечения работы системы понадобятся устройства способные осуществлять управление подачей воздуха. Для это рассмотрим использование пневмоклапанов.

Будем использовать шесть клапанов для автоматической работы пневморегулирования воздушных камер. Автоматический режим системы будет строится за счёт показаний концевых датчиков, осуществляющих проверку критической заполненности пневматических демпферов, а также текущего положения клапанов впуска/выпуска.

Для осуществления регуляции было принято использовать предварительно схему подключения блока регулирования, изображённом на рис.6

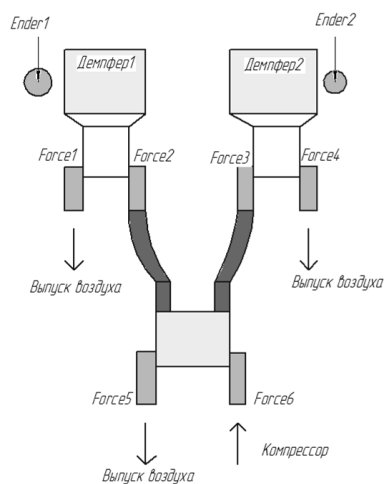


Рис. 6. Схема расположения и нумерация клапанов

Чтобы составить всевозможные положения системы, необходимо разобраться в отклонение амплитуды установки с учётом порогового значения мёртвой зоны (зоны нечувствительности). Распишем пороговые выражения амплитуд в положительную и отрицательную сторону с последующим их сравнением с показаниями, снятыми с вибродатчиков:

$$A_{\text{зад}}(1 + MZ) \text{ и } A_{\text{зад}}(1 - MZ) \quad (11)$$

где  $A_{\text{зад}}$  – заданное значение амплитуды, будет выставлено потенциометром,  $MZ$  – «Мёртвая зона» ускорения вибродатчиков. Мёртвая зона – это некий малый радиус вокруг нейтрального положения, в пределах которого сигналы игнорируются. Данное положение необходимо для того, чтобы нивелировать погрешности монтажа датчиков на самом макете, а также положения относительно земной поверхности для осуществления выравнивания показаний амплитуд.

Датчики концевой положения в свою очередь отвечают за ограничение хода камер, для предотвращения её разрыва, выдавая исходя из этого сигнал в виде логической 1 или 0.

На основе показаний и выражений (11) выстраиваются следующие условия пневморегулирования, показанные в табл.2. Всего 16 условий при которых меняются положения управляющих клапанов с 1-6. Так как значения датчиков из-за зашумленности и внутренней погрешности не могут принимать постоянно однородное значение, то принято ввести в условия неравенства, позволяющие избежать данную ситуацию.

### Модель системы визуализации в программной среде Codesys

Центральный пульт управления представляет собой операторское окно с человеко-машинным интерфейсом. Человеко-машинный интерфейс (ЧМИ) – широкое понятие, охватывающее инженерные решения, обеспечивающие взаимодействие человека-оператора с управляемыми им машинами. Рассмотрим схему рис.7 панели управления вибростенда.

Основные элементы окна управления рис.7:

- главный экран (дисплей).

Компоненты окна управления:

- индикаторы текущего положения форсунок 1-6;

Кнопки управления оборудованием подсистем:

- кнопка «Система готова к эксплуатации»;
- кнопка «Пуск» (Вкл. системы);
- кнопка «Стоп» (Вык. системы);
- Кнопка «Квитирование»;
- Кнопка «Опробования», проверка системы;
- Потенциометр (нужен для установления уставки в виде амплитуды для реализации технологического процесса);

Таб. 2. Условия пневморегулирования

№	Неравенства системы	ф1	ф2	ф3	ф4	ф5	ф6	16-я система счисления
1	$V1 < A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) < B2$ и $K1, K2=0$	0	1	0	1	0	1	D5
2	$V1 > A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) > B2$ и $K1, K2=0$	0	0	1	0	1	1	CB
3	$V1 < A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) < B2$ и $K1=1, K2=0$	0	0	1	0	0	1	C9
4	$V1 > A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) > B2$ и $K1=1, K2=0$	0	1	0	0	1	1	D3
5	$V1 < A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) < B2$ и $K1, K2=1$	0	0	1	0	0	1	C9
6	$V1 > A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) > B2$ и $K1, K2=1$	0	0	0	1	0	1	C5
7	$V1 < A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) < B2$ и $K1=0, K2=1$	0	0	1	1	0	1	CD
8	$V1 > A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) > B2$ и $+K1, K2=1, -K1=0, K2=1$	1	0	0	0	1	1	E3
9	$V1 > A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) < B2$ и $K1, K2=0$	1	0	1	0	1	1	EB
10	$V1 < A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) > B2$ и $K1, K2=0$	0	1	0	1	0	1	D5
11	$V1 > A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) < B2$ и $K1=1, K2=0$	1	0	1	0	1	1	EB
12	$V1 < A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) > B2$ и $K1=1, K2=0$	0	1	0	0	0	1	D1
13	$V1 > A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) < B2$ и $K1, K2=1$	1	0	1	0	1	1	EB
14	$V1 < A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) > B2$ и $K1, K2=1$	1	0	0	0	0	1	E1
15	$V1 > A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) < B2$ и $K1=0, K2=1$	1	0	1	0	1	1	EB
16	$V1 < A_{зад} +/- (A_{зад} * MZ) > B2$ и $K1=0, K2=1$	1	0	0	0	0	1	E1

Где V1-вибродатчик1, B2-вибродатчик1,  $A_{зад}$ - заданное значение амплитуды, MZ- «Мёртвая зона», K1-концевик1, K2-концевик2.

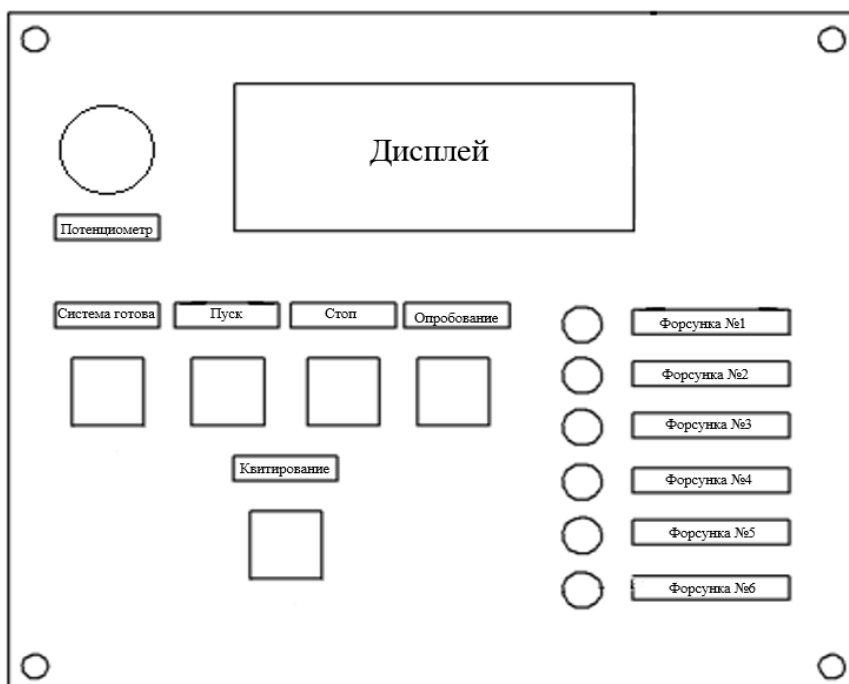


Рис. 7. Схема панели управления вибростенда



Создан макет панели управления в программной среде Codesys [14] (см. рис.8).

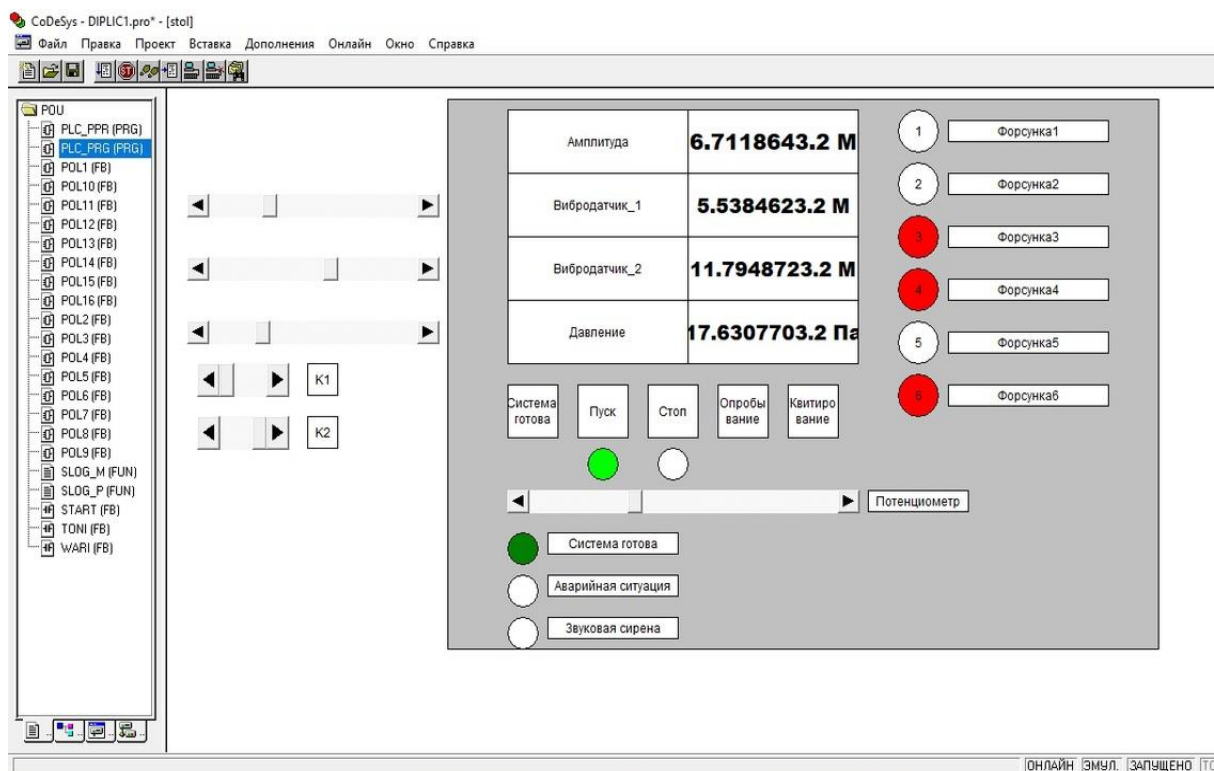


Рис. 8. Модель системы визуализации в программной среде Codesys

Данная панель управления Рис.8 содержит в себе экран с показаниями:

- Заданное значение амплитуды с потенциометра;
- Показание Вибродатчика 1 и 2;
- Показание датчика давления.

Наименование кнопок:

- Кнопка "Система готова к работе" (нажимаем данную кнопку при начале работы со стендом и при устранении аварийной ситуации);
- Кнопка Пуск (После включения данной кнопки стенд начнёт функционировать);
- Кнопка стоп (Выключение стенда);
- Кнопка Опробование (все светодиоды начинают моргать, тем самым демонстрируя их работоспособность);
- Кнопка Квитирование (выключает аварийную звуковую сигнализацию);

Так же на панели управления имеется ползунок, имитирующий потенциометр.

Аварийная ситуация возникает при высоком давлении более 50 Па.

Слева от панели управления имеются ползунки имитирующие показания:

- вибродатчиков 1 и 2;
- значение давления с шины;
- датчиков концевого положения 1 и 2.

В программе имитируются все 16 положений форсунок.

### Оптимизация времени работы

Использование нескольких технологических комплексов в определённом цехе без автоматизации увеличивает временные затраты на производство операции. Условимся на том, что у нас имеется помещение в котором находятся 15 установок, которые требуют мануальную работу оператора. Данные установки расположены в нескольких метрах друг от друга и

в них уже загружены детали. Для обеспечения работы всех 15 аппаратов, потребуется время, включающая в себя:

Время перемещения между установками:

$$t_1 = \frac{L}{U} + t_p, \quad (13)$$

где  $L$  - расстояние между установками, принимаем равное 1.5 м;  $U$  – скорость перемещения рабочего, принимаем равную 1.2 м/с;  $t_p$  – время реакции рабочего.

Время на настройку нужных параметров:

$$t_2 = u_{\text{пп}} \cdot k, \quad (14)$$

где  $u_{\text{пп}}$  – среднее время подбора параметров, принимаем равное 5с;  $k$  - коэффициент сложности настройки детали.

Время на остановку процесса:

$$t_3 = t_1 + t_{\text{останов}} \quad (15)$$

Время, затрачивающееся на погрузку отгрузку принять как переменную  $t_4$ .

Персонал в виде 1 человека.

Введём формулу расчёта время затрат из выражений (13), (14), (15):

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5, \quad (16)$$

где  $t_5$  время самого процесса.

Подставляем в выражение (16) численные значения параметров:

$$T = 1,25 + t_p + 5k + 1,25 + t_p + t_{\text{останов}} + t_4 = 2,5 + 0,4 + 5k + t_{\text{останов}} + t_4 + t_5 \quad (17)$$

Так как установок 15, то выражение (17) примет вид (18):

$$T = 37,5 + 6 + 75k + 15 \times t_{\text{останов}} + 15t_4 + t_5 \quad (18)$$

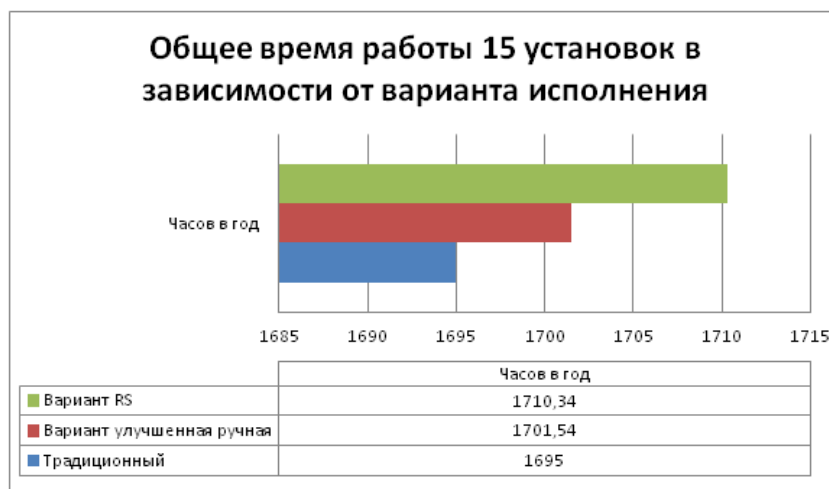
Принимаем, что время погруз/отгруз = 300 с.

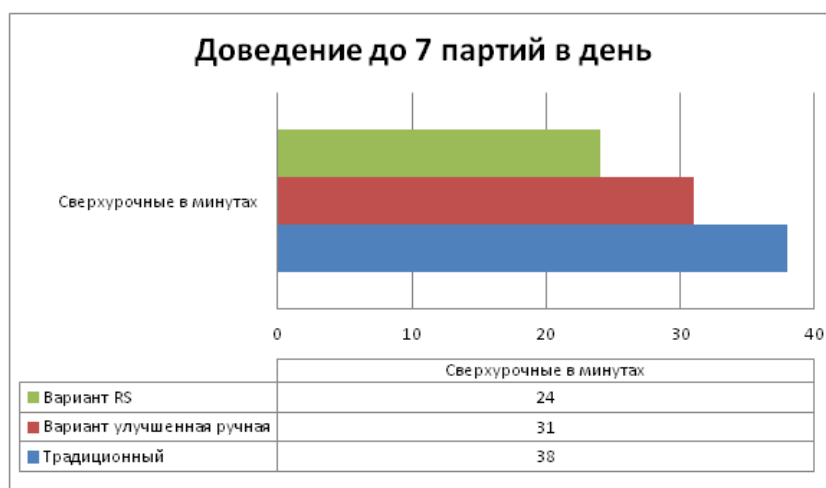
Время работы установки = 3600 с

Время остановки процесса = 15 с.

Коэффициент сложности = 1,25 с.

Время реакции рабочего = 0,3 с





**Рис.9. Экономические диаграммы**

Отличие между методами является отсутствия временных затрат на перемещение, облегчение подбора параметров, Вариант RS представляет собой несколько аппаратов соединённых по интерфейсу RS-485 и осуществляется управление с одной общей панели.

### **Заключение**

Созданная установка и подобранный алгоритм управления, позволяет решить задачу автоматизированного управления производственным процессом посредством управления амплитудой колебаний виброустановкой с технологической массой, способствуя экономии времени. Использование системы пневматического регулирования через эластичные резино-кордные пневмопружины позволяет управлять их жёсткостью по средством подачи/выпуска воздушных масс, тем самым осуществляя регулирование произведённого стенда.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Самойлов П. И. Технология поверхностно-пластической деформации с применением ультразвуковых процессов // Инженер: студенческий научно-технический журнал / П. И. Самойлов, А. Н. Михайлов // Донецк: ДонНТУ, 2007, № 8. – С. 80–83.
2. Зайцев А. М. Обеспечение надежной работы деталей авиационных двигателей / Зайцев А.М. – М.: Транспорт, 1971. – 196 с.
3. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / Смелянский В. М. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
4. Марков А. И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов / Марков А. И. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
5. Патент RU 2291033 С1. Устройство для ультразвуковой обработки поверхностей деталей / Ю. В. Холопов (Россия). № 2005124573/02; заявл. 02.08.2005; опубл. 10.01.2007. Бюл. № 1.
6. Кудашева И. О. Совершенствование технологии изготовления прецизионных деталей “тело вращения” на основе применения ультразвукового упрочнения и поверхностно-активных веществ: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Кудашева Ирина Олеговна. – Саратовский государственный технический университет. – Саратов, 2008. – 129 с.
7. Управление мехатронными вибрационными установками / Б.Р. Андриевский, И.И. Блехман, Ю.А. Борцов, С.В.Гаврилов, В.А. Коноплев, Б.П. Лавров, Н.Д. Поляхов, О.П. Томчина, А.Л. Фрадков, В.М. Шестаков / под ред. И.И. Блехмана, А.Л. Фрадкова. – СПб.: Наука, 2001. – 278 с.
8. Бурьян Ю.А. К вопросу о стабилизации амплитуды колебаний механической системы / Ю.А. Бурьян, П.Д. Балакин, В.Н. Сорокин // Омский научный вестник, 2014, № 2 (130). С. 38–44.
9. Елисеев С.В. Неудерживающие связи в динамических взаимодействиях сыпучей среды и вибрирующей поверхности: научно-методологическое обоснование технологии процессов вибрационного упрочнения / С.В. Елисеев, В.Б.Кошуба, А.Г. Пнёв, А.В. Елисеев, И.С. Сайтов // Системы. Методы. Технологии, 2014, № 3(23). – С. 17–31.
10. Гончаревич И.Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И.Ф. Гончаревич, К.В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 320 с.
11. Шестаков В.М. Синтез законов управления режимами работы автоматизированных вибрационных установок /В.М. Шестаков, Е.В. Белокузов, А.Е. Епишкин // Электричество, 2013, № 11. – С. 31–36.

12. Круглов С.П. Стабилизирующий регулятор со статической адаптацией // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами: электрон. науч. журн. –2019. – № 2. С. 1–11. Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/23-2019>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (Дата обращения: 05.06.2019).

13. Круглов С.П. Автоматизация управления амплитудой колебаний технологической вибрационной машин / С.П. Круглов, С.В. Ковыршин, Р.С. Большаков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. –Т. 65 No 1. –С. 21–30. –DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).21-30.

14. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608с.

## REFERENCES

1. Samoilo P.I., Mikhailov P.I. Tekhnologiya poverhnostno-plasticheskoy deformatsii s primeneniem ul'trazvukovykh processov [Technology of surface plastic deformation using ultrasonic processes]. *Inzhener: studencheskiy nauchno-tekhnicheskij zhurnal [Engineer: student scientific and technical journal]* Donetsk: DonNTU, 2007, No8. P.80-83.

2. Zaitsev AM Obespechenie nadezhnoy raboty detalej aviacionnykh dvigatelej [Ensuring reliable operation of aircraft engine parts]. Moscow, Transport, 1971, 196p.

3. Smelyanskiy V.M. Mekhanika uprochneniya detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Mechanics of parts hardening by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie, 2002. 300 p.

4. Markov A.I. Ul'trazvukovoe rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov [Ultrasonic cutting of difficult-to-machine materials]. Moscow, Mashinostroenie, 1968. 352p.

5. Pat. RU 2291033 C1 Russian Federation. Ustrojstvo dlya ul'trazvukovoy obrabotki poverhnostej detalej [Device for ultrasonic treatment of surfaces of parts], Yu. V. Holopov (Russia). No. 2005124573/02; declared 02.08.2005; publ. 10.01.2007. Bul. No. 1.

6. Kudasheva I.O. Sovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniya precizionnykh detalej "telo vrashcheniya" na osnove primeneniya ul'trazvukovogo uprochneniya i poverhnostno-aktivnykh veshchestv [Improvement of the technology of manufacturing precision parts "body of revolution" based on the use of ultrasonic hardening and surfactants]. Diss. ... Cand. tech. Sciences: 05.02.08 / Kudasheva Irina Olegovna. Saratov State Technical University. Saratov, 2008. 129 p.

7. Upravlenie mekhatronnymi vibracionnymi ustanovkami [Control of mechatronic vibration installations] / B.R. Andrievsky, I.I. Blekhman, Yu.A. Bortsov, S.V. Gavrilov, V.A. Konoplev, B.P. Lavrov, N. D. Polyakhov, O.P. Tomchina, A.L. Fradkov, V.M. Shestakov / ed. I.I. Blekhman, A.L. Fradkov. SPb, Nauka, 2001. 278 p.

8. Burian Yu.A., Balakin P.D., Sorokin V.N. K voprosu o stabilizatsii amplitudy kolebanij mekhanicheskoy sistemy [On the question of stabilization of the vibration amplitude of a mechanical system]. *Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk Scientific Bulletin]*, 2014, No. 2 (130). P. 38-44.

9. Eliseev S.V. Koshuba V.B., Pnev A.G., Eliseev A.V., Saitov I.S. Neuderzhivayushchie svyazi v dinamicheskikh vzaimodejstviyah sypuchej sredy i vibriruyushchej poverhnosti: nauchno-metodologicheskoe obosnovanie tekhnologii processov vibracionnogo uprochneniya [Non-retaining connections in dynamic interactions of a granular medium and a vibrating surface: scientific and methodological substantiation of the technology of vibration hardening processes]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2014, No. 3 (23). P. 17-31.

10. Goncharevich I.F., Frolov K.V. Teoriya vibracionnoj tekhniki i tekhnologii [Theory of vibration technology and technology]. Moscow, Nauka, 1981. 320 p.

11. Shestakov V.M., Belokuzov E.V., Epishkin A.E. Sintez zakonov upravleniya rezhimami raboty avtomatizirovannykh vibracionnykh ustanovok [Synthesis of the laws of control over the modes of operation of automated vibration plants]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 2013, No.11, P. 31-36.

12. Kруглов С.П. Стабилизирующий регулятор со статической адаптацией [Stabilizing controller with static adaptation]. *Informacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: elektron. nauch. zhurn. [Information technologies and mathematical modeling in the control of complex systems: electron. scientific. zhurn.]*. 2019, No. 2, P. 1–11. Access mode: <http://ismm-irgups.ru/toma/23-2019> (Date of access: 05.06.2019).

13. Kруглов С.П., Ковыршин С.В., Бол'шаков Р.С. Автоматизация управления амплитудой колебаний технологической вибрационной машин [Automation of vibration amplitude control of technological vibration machines]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*. 2020. Vol. 65 No 1. P. 21-30. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1 (65).21-30

14. Denisenko V.V. Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskim processom, eksperimentom, oborudovaniem [Computer control of technological process, experiment, equipment]. Moscow, Hotline-Telecom, 2009. 608p.

## Информация об авторах

Забелин Александр Юрьевич – студент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [estelprom@gmail.com](mailto:estelprom@gmail.com)

*Смирнова Любовь Валерьевна* - студент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail:

*Круглов Сергей Петрович* – д. т. н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [kruglov\\_s\\_p@mail.ru](mailto:kruglov_s_p@mail.ru)

*Ковыршин Сергей Владимирович*– к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [sergkow@mail.ru](mailto:sergkow@mail.ru)

#### **Authors**

*Zabelin Alexander Yurievich* - student of the department “Automation of production processes”, Irkutsk State University of Railways, Irkutsk, e-mail: [estelprom@gmail.com](mailto:estelprom@gmail.com)

*Smirnova Lyubov Valerievna* student of the department “Automation of production processes”, Irkutsk State University of Railways, Irkutsk, e-mail:

*Kruglov Sergey Petrovich* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of “Automation of production processes”, Irkutsk State University of Railways, Irkutsk, e-mail: [kruglov\\_s\\_p@mail.ru](mailto:kruglov_s_p@mail.ru)

*Sergey B. Kovyrshin*– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of “Automation of production processes”, Irkutsk state University of railway transport, Irkutsk, e-mail: [sergkow@mail.ru](mailto:sergkow@mail.ru)

#### **Для цитирования**

Забелин А.Ю. Разработка макета технологической вибрационной установки с автоматическим регулированием амплитуды колебаний [Электронный ресурс] / А.Ю. Забелин, Л.В. Смирнова, С.П. Круглов, С.В. Ковыршин // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2021. — № 1. — Режим доступа: <https://mnv.irgups.ru/toma/111-2021>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 07.06.2021).

#### **For citation**

Zabelin A.Y., Smirnova L.V., Kruglov S.P., Kovyrshin S.V. *Razrabotka maketa tekhnologicheskoy vibracionnoj ustanovki s avtomaticheskim reguliro-vaniem amplitudy kolebanij* [Development of the layout of the technological vibration unit with automatic regulation of the vibration amplitude]. *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2021, no. [Accessed 07.06.21]