|  |  |
| --- | --- |
| *voenmeh* | МИНОБРНАУКИ РОССИИ  федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  высшего образования  **«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**  **(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»)** |
| БГТУ.СМК-Ф-4.2-К5-02 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Факультет |  | А |  | Ракетно-космической техники |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Кафедра |  | А4 |  | Стартовые-технические комплексы ракет и космических аппаратов |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Дисциплина |  | Проектирование стартовых комплексов стратегического назначения | | |

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

на тему

|  |
| --- |
| Исследование влияния динамических и жесткостных |
| характеристик самоходной пусковой установки |
| на работу привода горизонтирования. |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил студент группы | | | |  | А4М31 |
| Рябуха Д.А. | | | | | |
| Фамилия И.О. | | | | | |
| **РУКОВОДИТЕЛЬ** | | | | | |
| Храмов Б.А. | |  |  | | |
| Фамилия И.О. Подпись | | | | | |
| Оценка |  | | | |  |
| «\_\_\_\_\_» |  | | | | 201\_г. |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2018 г.

Содержание

[Введение 3](#_Toc5054657)

[1 Расчет нагрузок, действующих на СПУ 6](#_Toc5054658)

[2 Ветровые нагрузки. 8](#_Toc5054659)

[2.1 Нагрузки на домкраты СПУ 10](#_Toc5054660)

[3 Математической модели системы 14](#_Toc5054661)

[Заключение 25](#_Toc5054662)

[Список использованной литературы 26](#_Toc5054663)

# Введение

Целью данной работы является рассмотрение динамической модели самоходной пусковой установки (Рисунок 1). Для этого необходимо определить динамические и жесткостные характеристики изучаемой системы. Для упрощения задачи на начальном этапе исследования была выбрана наипростейшая модель системы, когда самоходная пусковая установка находится в транспортном положении.

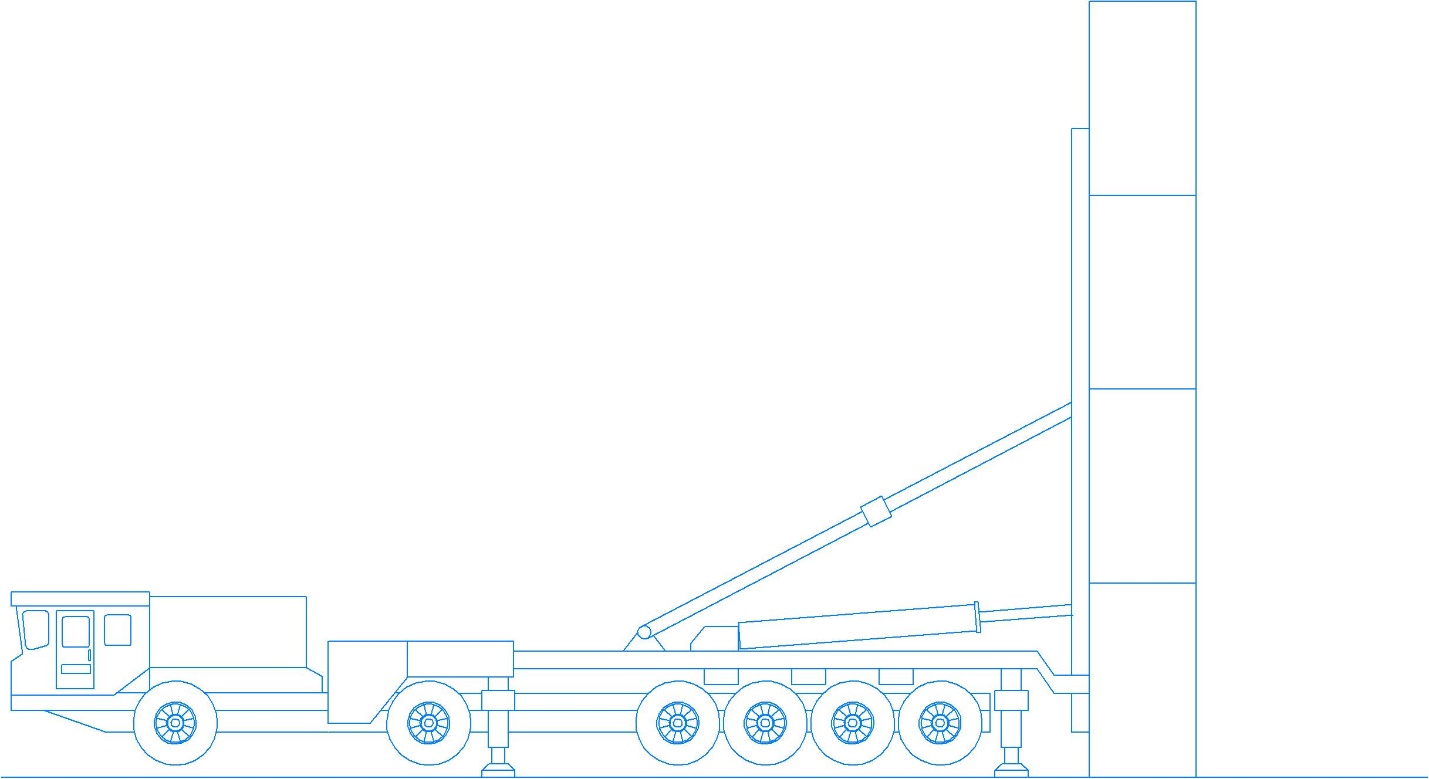


Рисунок 1. Самоходная пусковая установка в развернутом положении.

Изучаемая пусковая установка работает следующим образом:

В исходном состоянии шасси СПУ на колесах на специально подготовленной площадке для развертывания. Штоки домкратов системы вывешивания и горизонтирования находятся во втянутом положении. Качающая часть СПУ с ТПК находятся в горизонтальном положении, при этом она застопорена к передней опоре приводом фиксации качающейся части. ТПК зафиксирован от продольного перемещения, также его перемещение ограничено кареткой.

После размещения СПУ на месте развертывания выполняемся операция вывешивания. Происходит одновременное выдвижение штоков всех четырех домкатов СПУ до срабатывания сигнализаторов давления.

После вывешивания шасси при помощи домкратов производится предварительное грубое горизонтирование СПУ в поперечном направлении с заданной точностью, контроль производится датчиком, расположенным на металлоконструкции платформы. Для осуществления этой операции рабочая жидкость подается в необходимые домкраты в зависимости от направления крена СПУ до исключения полного крена с заданной точностью до срабатывания датчика давления.

Далее выполняют подъем качающейся части. В начале поршневую полость цилиндров перемещения кареток подается давление с целью предотвращения внезапного опускания ТПК вниз при подъеме качающейся части. Затем расфиксируют привод удерживания качающейся части по-походному.

Далее с помощью телескопического гидроцилиндра качающуюся часть поворачивают на угол более 90 градусов относительно платформы до срабатывания сигнализатора. Одновременно с поворотом качающейся части автоматически происходит развертывание механизма вертикализации качающейся части.

Далее при помощи гидроцилиндра подъема качающейся части проводят вертикализацию ТПК в продольной плоскости самоходной пусковой установки до момента совпадения показаний датчика определения угла поворота и датчика, установленного на платформе, с заданной точностью.

Для того, чтобы опустить ТПК на грунт механизмы фиксации от продольного перемещения расфиксируют. При упоре ТПК на грунт происходит расцепление гидравлической и пневматической части штока гидроцилиндра перемещения каретки, и гидравлическая часть штока продолжает перемещение до срабатывания сигнализатора.

После подъема и грубой вертикализации качающейся части с ТПК и установки ТПК на грунт производится точная вертикализация ТПК при помощи передних домкратов и дозаторов с заданной точностью. Контроль вертикализации производится при помощи датчика, расположенного на качающейся части. После точной вертикализации производится фиксация домкратов в рабочем положении. После этой операции СПУ находит в рабочем положении.

Процесс свертывания агрегата.

При свертывании агрегата имеем следующее исходное состояние: шасси вывешено и отгоризонтировано в поперечной плоскости, штоки домкратов опущены, качающаяся часть с ТПК в вертикальном положении, ТПК опущены на грунт, перемещение ТПК ограничено кареткой.

После включения насосной станции начинается операция подъема ТПК с грунта с помощью пневмогидроцилиндра каретки. Подъем осуществляется до срабатывания сигнализаторов давления. Далее происходит фиксация ТПК от продольного перемещения.

Перед опусканием качающейся части в горизонтальное положение производим частичное «сламывание» тяг механизма подъёма качающейся части. Опускание качающейся части происходит до срабатывания сигнализаторов. В конце опускания производится стопорение КЧ двумя стопорами. Производим фиксацию ТПК механизмом фиксации в транспортном положении.

Далее происходит процесс втягивания штоков домкратов и их последующая фиксация в транспортном положении.

# Расчет нагрузок, действующих на СПУ

Будем рассматривать агрегат, когда он вывешен на домкратах, а ТПК находится в транспортном положении (Рисунок 2).

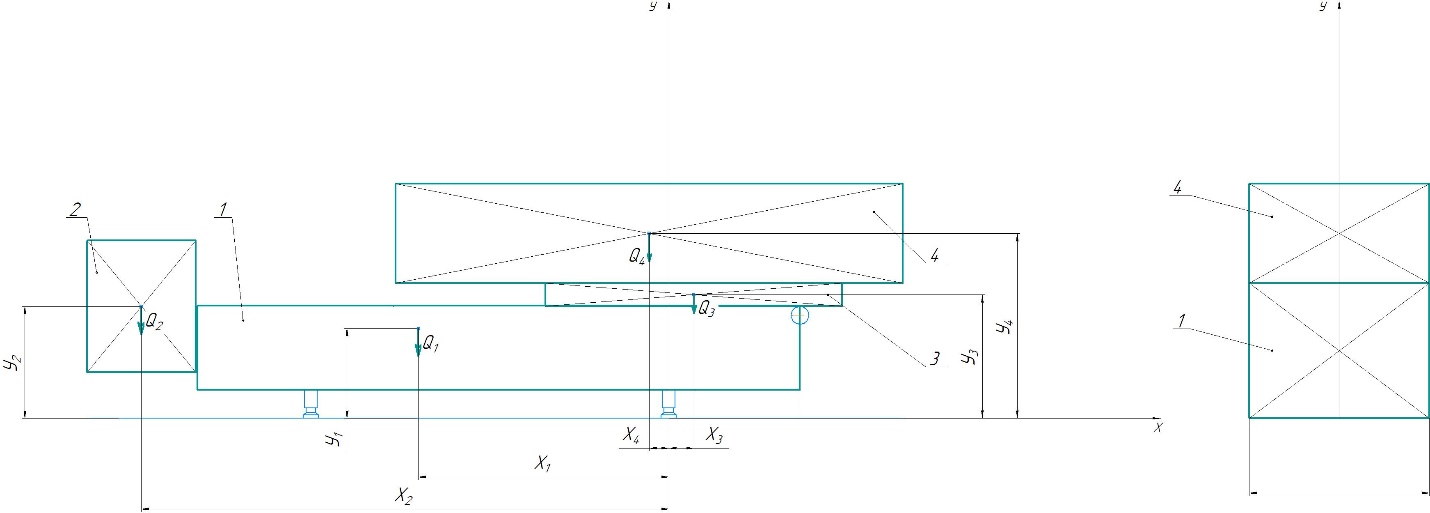


Рисунок 2. Расчетная схема для определения нагрузок на СПУ.

Прежде всего необходимо определить все нагрузки, действующие на домкраты системы горизонтирования.

К нагрузкам можно отнести весовые нагрузки от весы СПУ, комплекта ТПК, а так же ветровые нагрузки, действующие на всю СПУ в целом.

Для определения нагрузок, вызванных весом СПУ, в качестве исходных данных приняты массы шасси, кабины с технологическим оборудованием, качающейся части и комплекта ТПК, а также координаты центров масс этих элементов Хi , Yi . Координаты центров масс определены для системы координат, у которой ось Х совпадает с поверхностью, на которой располагается СПУ, а ось Y направлена по оси правого домкрата.

Массовые и центровочные данные сведены в Таблицу 1

Таблица 1. Массовые и центровочные данные элементов СПУ для транспортного положения.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № структурного элемента | Структурный элемент | Масса, кг | Транспортное положение | |
| Хi, м | Yi, м |
| 1 | Шасси | 26000 | -4,037 | 1,446 |
| 2 | Кабина и оборудование | 2000 | -8,5 | 1,80 |
| 3 | Качающаяся часть | 4000 | -0,4 | 2 |
| 4 | Комплект ТПК | 16000 | -0,316 | 3 |

# Ветровые нагрузки.

Расчет ветровых нагрузок производится для рабочего и транспортного положения для случая рабочего ветрового воздействия. Скорость ветра при рабочем ветровом воздействии 20,0 м/с2.

Поскольку в данной работе изучается динамика СПУ в продольном направлении, то и ветровое воздействие на СПУ будет определяться также в продольном направлении для рабочего и транспортного положения.

Будут рассматривать случай, когда СПУ находится в транспортном положении, ветровая нагрузка действует на шасси СПУ и комплект ТПК.

Величина полной ветровой нагрузки определяется по следующей формуле:

Pв. = ⅀Pвi. ,

где Pвi – полная ветровая нагрузка на i-ый элемент конструкции.

Pвi = Pстi + Pдi ,

где Pстi – статическая составляющая полной ветровой на i-ый элемент конструкции; Pдi – динамическая составляющая полной ветровой на i-ый элемент конструкции.

Величина статической ветровой нагрузки каждого i-го элемента конструкции определяется по формуле:

где qp – расчётный скоростной напор ветра;

c – аэродинамический коэффициент i-го элемента конструкции;

kj = 1 – коэффициент увеличения скоростного напора ветра по высоте;

Fj – расчётная наветренная площадь i-го элемента конструкции.

Расчётный скоростной напор для рабочего воздействия определяется по формуле:

,

где плотность воздуха при температуре t = 300C, соответствующей расчётной скорости ветра;

Vр.р. = 20 м/с расчётная средняя скорость ветра для рабочего воздействия.

Динамическая составляющая полной ветровой нагрузки от пульсаций скоростного напора определяется по формуле:

Pдi = Pстi· kдi ,

где kдi ­­– коэффициент динамичности.

,

– число стандартов нормального распределения;

m = 0,33 – коэффициент вариации скоростного напора;

A = 0,9 – коэффициент масштаба конструкции в зависимости от наибольшего габаритного размера конструкции в продольном направлении ветрового воздействия;

B = 0,25 – спектральный коэффициент, зависящий от отношения частоты собственных колебаний и скорости ветра;

– коэффициент, учитывающий несинхронность пульсации ветрового воздействия на конструкцию;

= 0,01 – коэффициент затухания.

Результаты расчета ветровой нагрузки, действующей на СПУ, для случая 1 представлены в Таблице 2:

Таблица 2. Результаты расчета ветрового воздействия на СПУ.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № элемента | Положение центра давления, м | Значение аэродинамического коэффициента с | Наветренная площадь элемента, м2 | Ветровая нагрузка, кН | | |
| Yцд, м | Pст | Pд | Рв |
| 1 | 1,35 | 1,22 | 7 | 2,477 | 1,649 | 4.126 |
| 4 | 3,15 | 1,22 | 6 | 2,123 | 1,414 | 3.536 |
|  |  |  |  | Суммарное значение | | 7,662 |

# 2.1 Нагрузки на домкраты СПУ

В процессе эксплуатации домкраты системы вывешивания и горизонтирования СПУ подвергаются действию вертикальных нагрузок, которые определяются такими факторами, как:

– вывешивание СПУ на домкратах;

– изменение положение центра масс СПУ при повороте качающейся части;

– изменение положения центра масс СПУ при опускании комплекта ТПК на грунт;

– действие ветровой нагрузки на СПУ в целом.

При расчете будем учитывать следующие допущения:

– влиянием горизонтальных нагрузок на домкраты системы вывешивания и горизонтирования СПУ будем пренебрегать;

– будем считать, что площадка, на которой располагается СПУ при развертывании горизонтальна, т.е не имеет уклона;

– будем рассчитывать нагрузки на домкраты системы вывешивания и горизонтирования СПУ в случае, когда ветровая нагрузка действует в продольном направлении.

Рассмотрим расчетный случай, когда СПУ находится в вывешенном положении, качающаяся часть с комплектом ТПК находится в горизонтальном положении.

Для определения нагрузок на домкраты вначале для каждого расчетного случая рассчитаем координаты общего центра массы системы согласно данным таблицы 1.

Положение общего центра масс СПУ вдоль оси Х относительно правого домкрата рассчитаем по формуле:

,

где j – номер расчетного случая.

Положение общего центра масс СПУ вдоль оси Y относительно правого домкрата рассчитаем по формуле:

,

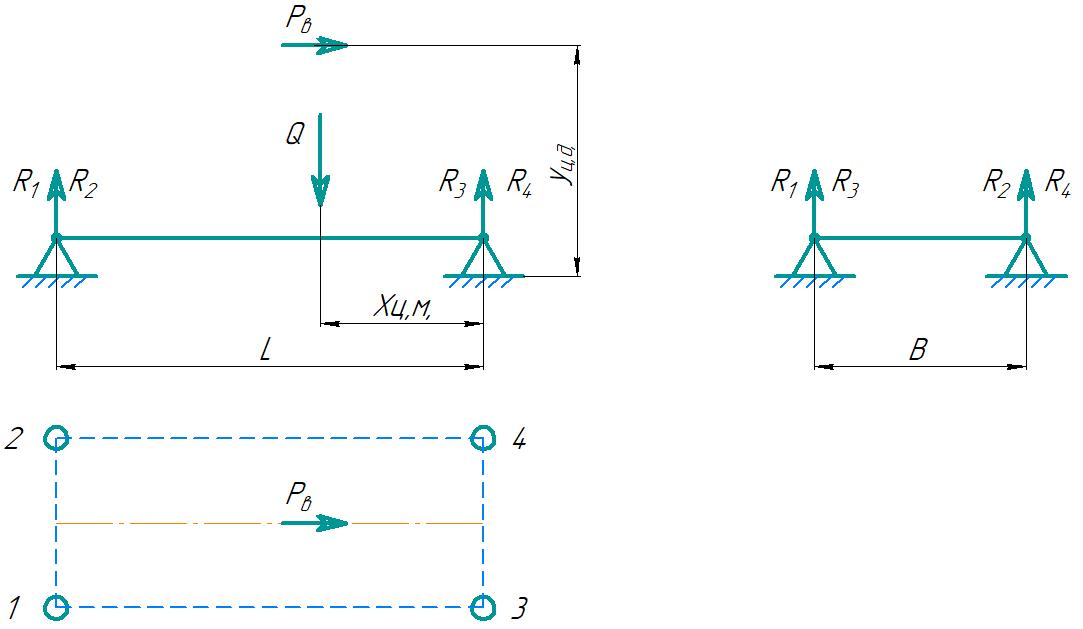
где j – номер расчетного случая.

Результаты расчета координат общего центра масс СПУ сведены в Таблицу 3. Отметим, что при расчете координат общего центра масс СПУ для расчетного случая 3 масса элемента 4 не учитывалась, так как комплект ТПК в этом случае установлен на грунт и он отвзян от общей системы.

Таблица 3. Общие координаты центра массы СПУ для каждого расчетного случая.

|  |  |
| --- | --- |
| , м | , м |
| -2,545 | 2,117 |

Нагрузки на домкраты при действии ветра в продольном направлении будет определять в соответствии с расчетной схемой, представленной на Рисунке 3.



*Рисунок 3. Расчетная схема для определения нагрузок на домкраты.*

Нагрузки на домкраты будем определять по следующим формулам:

где G – нагрузка от веса СПУ;

G = 637,7 кН;

L – база в продольном направлении между домкратами СПУ;

L = 5,77 м;

– расстояние правого домкрата до общего центра масс СПУ;

– для расчетного случая 1;

Рвj – полная ветровая нагрузка, действующая на СПУ в продольном направлении;

yцдj – положения центра давления ветровой нагрузки, действующей на СПУ относительно грунта.

Результаты расчета вертикальных нагрузок на домкраты при действии ветра в продольном направлении спереди приведены в Таблице …. .

# Математической модели системы

Для изучения динамических и жесткостных характеристик агрегата, изображенного на Рисунке 1, необходимо разбить его на отдельные элементы и определить их массово-инерционнные характеристики.

Будем считать, что вся СПУ вместе с ТПК в горизонтальном положении представляют собой единую массу, размещенное на двух опорах, обладающих жесткостью. Расчетная схема такой модели представлена на Рисунке 2.

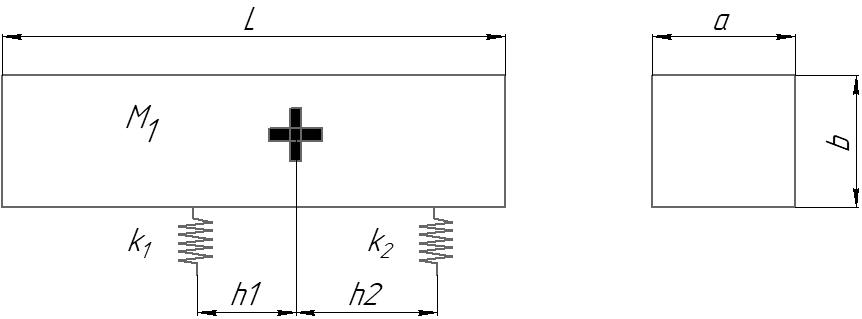


Рисунок 4. Расчетная схема динамической системы.

Ниже приведены численные значения геометрических, массово-инерционных и жесткостных параметров системы, расчетная схема которой приведена на рисунке 4.

Геометрические характеристики системы:

h1=3,225 м; h1=2,545 м

Массово-инерционные характеристики:

m1=65000 кг

Будем считать, что тело представляет собой параллелепипед со сторонами a=3 м и b=4 м длинной L=12 м

Тогда момент инерции относительно оси z (направлена перпендикулярно плоскости чертежа) равен:

кг\*м^2

Будем считать жесткости опор равными

Н/м

Рассматриваемая динамическая система имеет две степени свободы, для которых принимаем следующие обозначения:

 – поступательное вертикальное смещение элемента 1,

 – угловое смещение элемента 1.

Нумерация элементов принимается в соответствии с рисунком 2. Положительное направление вращения – против часовой стрелки, положительное смещение направлено вверх.

Для построения уравнений движения в матричной форме, введем вектор обобщенных перемещений:

Запишем выражения для деформаций каждого из упругих элементов:

Введем вектор деформаций упругих элементов:

Обобщенное усилие для каждого упругого элемента может быть записано в виде:

,

где  и  соответственно жесткость и обобщенная деформация i-го элемента.

Силы инерции, соответствующие каждой степени свободы, имеют вид:

; .

Вектор инерции:

В соответствии с принципом виртуальных перемещений, сумма всех виртуальных работ рассматриваемой системы должна быть равна нулю:

,

где  – работа сил упругости на виртуальных перемещениях,

;

 – работа сил инерции на виртуальных перемещениях,

;

 – работа силы Р на виртуальном перемещении,

.

С учетом произвольности вектора , запишем в окончательном виде матричное уравнение движения рассматриваемой системы:

.

где  – матрица жесткости,

;

 – вектор внешних нагрузок,

.

Рассмотрим нагружение рассматриваемой системы только массовыми силами. В этом случае сила  равна нулю, поэтому

.

По условию задачи, характер поведения рассматриваемой системы квазистатический, поэтому единственным ускорением, действующим на инерционные элементы, будет ускорение свободного падения. Таким образом:

где .

Определение смещений элементов системы при действии весовых нагрузок производится посредством решения системы линейных алгебраических уравнений:

.

Параметры свободных колебаний динамической системы определятся из частотного уравнения:

,

где  – значение круговой частоты свободных колебаний,

 – вектор, характеризующий форму свободных колебаний.

Рассматриваемая система имеет семь ненулевых частот свободных колебаний, каждой из которых соответствует свой вектор .

Частоты свободных колебаний в герцах определятся по формуле:

.

В результате получим график изменения положения центра масс тела от времени, а так же его углового положения, который представлен на Рисунке 5.

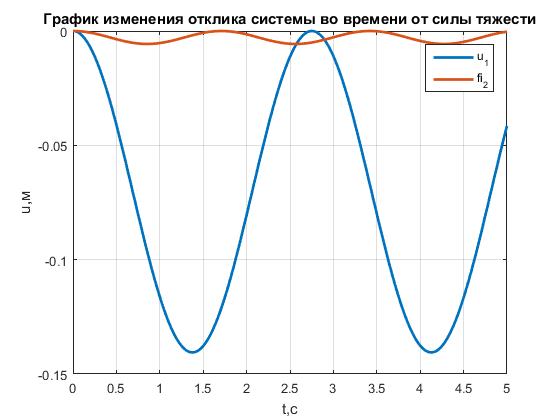


Рисунок 5. Результаты расчета динамической модели.

Ниже представлен листинг программы в среде MatLab:

clear;

% Геометрические параметры:

h1 = 3.225; h2 = 2.545;

a = 3; b = 4; L = 12;

% Массово-инерционные характеристики:

m1 = 65000; I1 = (m1\*(a^2 + L^2))/12

% Жесткостные параметры:

k1 = 4.6e6; k2 = 4.6e6;

% Матрицы:

D = [-1 h1 ;

-1 -h2 ];

C = diag([k1 k2]);

M = diag([m1 I1]);

K = D'\*C\*D;

% Определение смещений от веса

g = 9.81;

Ug = [g; 0];

Fg = -M\*Ug;

U\_ves = K\Fg

% Определение частот и форм свободных колебаний

[A,om\_sq] = eig(K,M);

freq = diag(om\_sq)/(2\*pi) % Вектор частот свободных колебаний (Гц)

tmax = 5; % Время

n = 100000; % Количество шагов по времени

dt = tmax/n; % Шаг по времени

T = 0:dt:tmax ;

U1 = U\_ves(1) - U\_ves(1)\*cos(freq(1)\*T/(2\*pi));

U2 = U\_ves(2) - U\_ves(2)\*cos(freq(2)\*T/(2\*pi));

figure;

plot(T,U1, T,U2, 'LineWidth',2)

title('График изменения отклика системы во времени от силы тяжести')

legend('u\_1','fi\_2')

xlabel('t,c');

ylabel('u,м');

grid on

Для проверки полученных результатов расчет динамической модели системы был также выполнен в среде Mathcad.

Составим систему уравнений динамики для вращательного и поступательного движения тела:

ɛ·J=∑ M,

m∙a=∑ F,

где ɛ — угловое ускорение, а — ускорение, J — момент инерции.

Исходя из уравнений динамики, запишем уравнения для углового ускорения, угловой скорости, ускорения, скорости тела (угловая и линейная скорости считаются путем интегрирования):

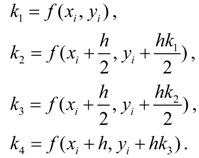


Имеем систему из 4 уравнений. Для решения данной системы воспользуемся методом Рунге-Кутта 4 порядка. Который заключается в следующем:

Для дифференциального уравнения:

С начальными условиями:

Приближенные значения переменной в последующих точках будут вычисляться:

где

Вычисляем по данному методу в Mathcad значения времени, угла, а также координаты центра масс.







После вычисления можем построить графики зависимости координаты центра масс (Рисунок 6), угла поворота в зависимости от времени (Рисунок 7).

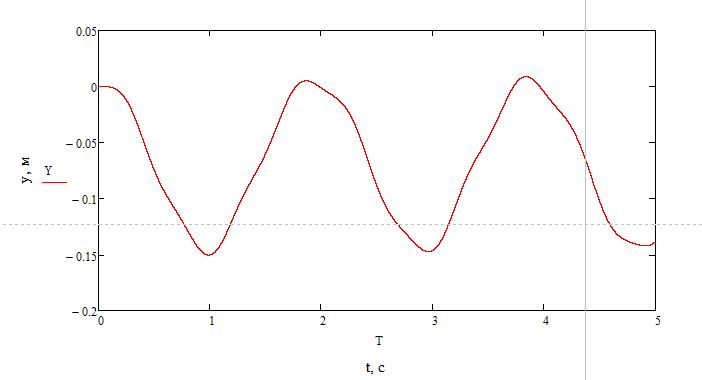


Рисунок 6. График зависимости координаты центра масс изделия от времени.

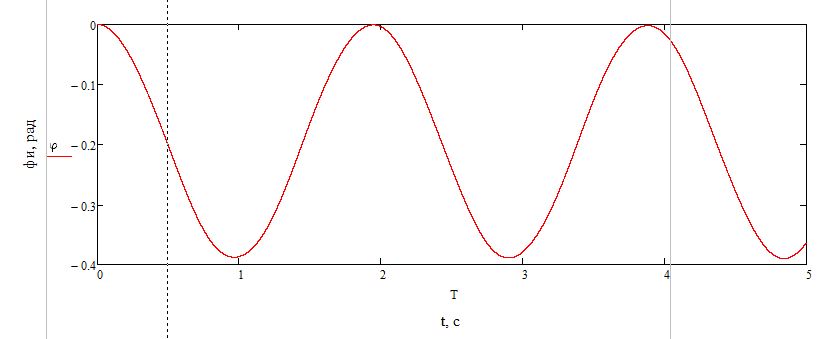


Рисунок 7. График зависимости угла поворота центра масс изделия от времени.

Сравнив полученные результаты, реализованные двумя различными методами и математическими средами, можно сделать вывод о том, что в обоих случая характер перемещения и поворота центра масс системы похожий, однако среда MatLab позволяет получить более точные результаты.

# Заключение

В данном курсовом проекте мною был рассмотрен алгоритм работы самоходной пусковой установки, рассчитаны ветровые нагрузки на самоходную пусковую установку, когда она находится в транспортном положении, а также нагрузки на домкраты, когда самоходная пусковая установка находится в вывешенном положении.

Далее для этого случая положения самоходной пусковой установки была составлена динамическая модель. В результате были получены графики перемещения и изменения углового положения самоходной пусковой установки в положении после ее вывешивания.

Характер этих графиков показывает, что даже без воздействия на самоходную пусковую установку она имеет собственные колебания.

# Список использованной литературы

1. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний.
2. Храмов, Б.А. Основы теории и проектирования устройств и систем боевого железнодорожного ракетного комплекса: учебное пособие/ Б.А. Храмов: Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2005. – 112 с.
3. Иванов, Е.В. , Нестеров, В.Н. Анализ способов горизонтирования опорных платформ образцов вооружения и военной техники. Fundamental Research №5, 2017. – 46-50 с.
4. Шапошников, Александров, Смирнов. Динамика и устойчивость сооружений