

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ПОДВЕРЖЕННОЙ НЕОДНОРОДНЫМ ПЕРЕМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ В СРЕДЕ SIMULINK\SIMMECHANICS

<sup>1</sup>Антунович А.Л., <sup>1</sup>Ильёв И.Г., <sup>1</sup>Гончаренко В.П., <sup>2</sup>Миронов Д.Н.

<sup>1</sup>Военная академия Республики Беларусь, Минск

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск

Для исследования характеристик переходных процессов, протекающих в сложных механических системах целесообразно проведение натурных либо полунатурных испытаний, которые могут дать наиболее исчерпывающие ответы на ряд вопросов динамики конкретной системы.

Существующие материальные и временные условия, как правило, накладывают существенные ограничения на объем проводимых испытаний. Альтернативой решения поставленной научной задачи является разработка математической модели исследуемой механической системы, которая позволит исследовать многие принципиальные вопросы динамики системы и сократить объем натурных испытаний. Кроме того, модель может дать ответы на ряд вопросов динамики исследуемой системы в условиях, которые трудно, а порой даже и невозможно симитировать при проведении эксперимента. Особенно полезной модель будет на этапе модернизации существующих и при разработке перспективных систем.

К числу таких систем относится и многоствольная пусковая установка (ПУ) [1], которая представляет собой манипулятор, выполненный на базе автомобильного шасси (рисунок 1). В ней в качестве поворотной платформы выступает вращающаяся часть (ВЧ), а в качестве наклонного (исполнительного) механизма – качающаяся часть (КЧ). Реактивные снаряды (РС) выполняют роль груза. Основное воздействие, которое испытывает многоствольная ПУ, вызвано давлением газодинамической струи от реактивных двигателей сходящихся снарядов. Данное воздействие носит неоднородный переменный характер [2].

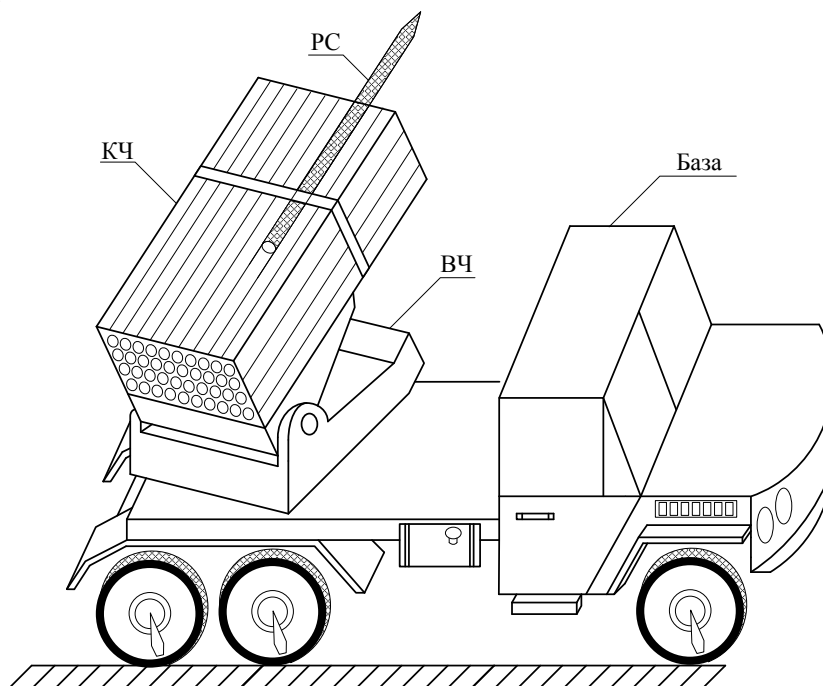
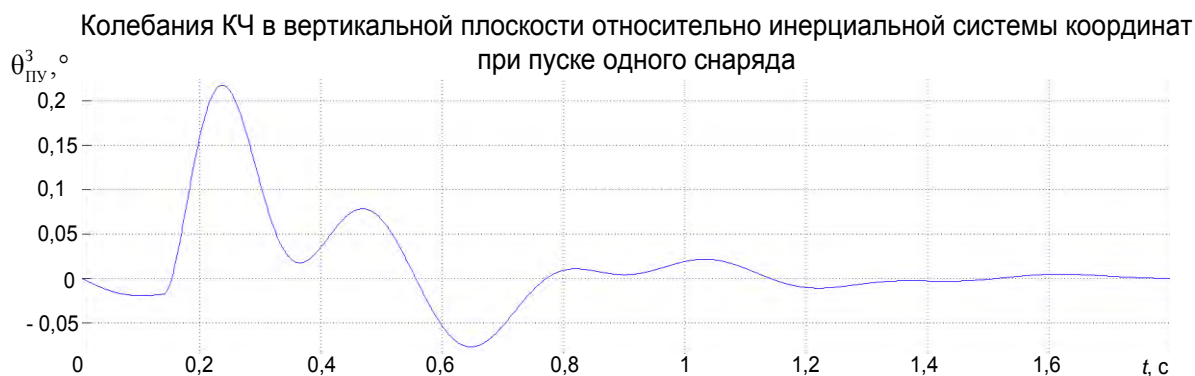


Рис. 1. Расчетная схема многоствольной ПУ

Математическая модель динамики многоствольной ПУ, подверженной неоднородным переменным воздействиям, была построена ранее и описана в [2], [3]. Полученные в процессе моделирования результаты (рисунок 2) для оценки адекватности были сверены с данными, полученными при проведении эксперимента в полигонных условиях. Динамические характеристики многоствольной ПУ, по результатам моделирования, с точностью до 15% соответствуют результатам эксперимента. Расхождение объясняется использованием ряда допущений при моделировании и шумами измерений датчиков, использованных при оценке координат движения реального образца.



*Рис. 2. Результаты моделирования колебаний пакета ПН*

Современный уровень развития вычислительной техники позволяет значительно упростить и ускорить процесс разработки математической модели механической системы путем использования прикладного программного обеспечения визуального моделирования. Пакеты визуального моделирования дают возможность пользователю вводить описание моделируемой системы в преимущественно графической форме, а также представлять результаты в наглядной форме в виде диаграмм, графиков или анимационных картин, что может активно использоваться в учебном процессе.

Примером может служить SimMechanics – отдельная библиотека пакета Simulink среды MATLAB. Основное назначение данной библиотеки – моделирование пространственных движений твердотельных машин и механизмов на стадии инженерного проектирования, используя законы теоретической механики. Основные достоинства, отличающие использование библиотеки SimMechanics при реализации моделирования механических систем – простота создания моделей, не требующая высокого уровня подготовки пользователя и высокая скорость вычислений при моделировании движений сложных механических систем с большим числом степеней свободы [4].

Кроме того, библиотека SimMechanics поддерживает средства анимации для демонстрации динамики механических систем.

В процессе создания модели исследуемая механическая система представляется в виде связанной блочной диаграммы, которая преобразуется в ходе моделирования в эквивалентную внутреннюю математическую модель.

Основными типами блоков, используемых при моделировании являются [4]:

- Bodies (тела, отображают составные части моделируемой механической системы (рисунок 3, поз. 4);
- Joints (шарниры, изображают степени свободы одной части механизма относительно другой (рисунок 3, поз. 7, 11);
- Constraints & Drivers (стационарные и нестационарные связи, ограничивают или запускают движения частей механизма относительно друг друга (рисунок 3, поз. 5);
- Actuators (возбудители механизмов, задают приложенные усилия, движения, меняющиеся массу и инерцию);

- Force Elements (силовые устройства и амортизаторы, моделируют усилия между частями механизма);
- Sensors (виртуальные датчики, измеряют усилия или движения частей механизма, узлов шарниров и связей).

Диаграмма любой модели должна включать блоки Solver Configuration (настройка параметров вычислителя (рисунок 3, поз. 1), World Frame (инерциальная система координат (рисунок 3, поз. 2), Mechanism Configuration (задание параметров моделирования: величины и направления действия ускорения свободного падения, шага линеаризации (рисунок 3, поз. 3).

Каждая деталь механизма описывается моделью, содержащей один или несколько блоков, которые для удобства могут объединяться в подсистемы.

На рисунке 3 показана блочная диаграмма модели многоствольной ПУ.

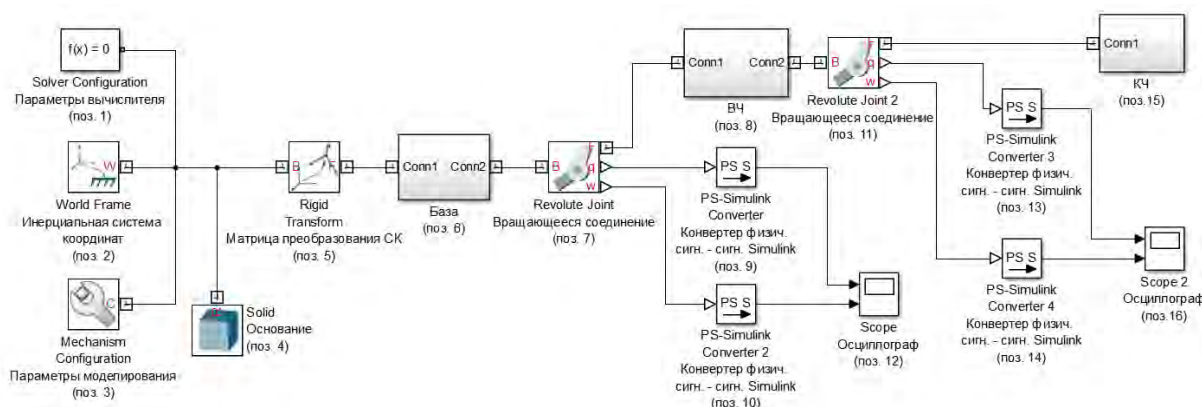
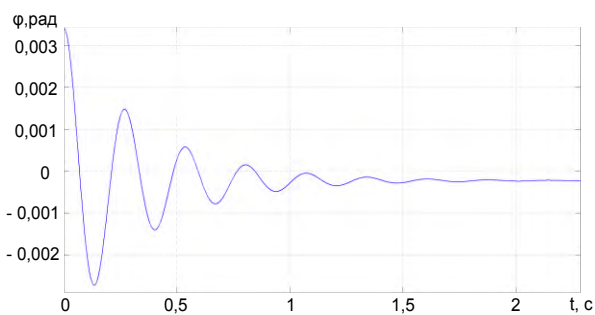


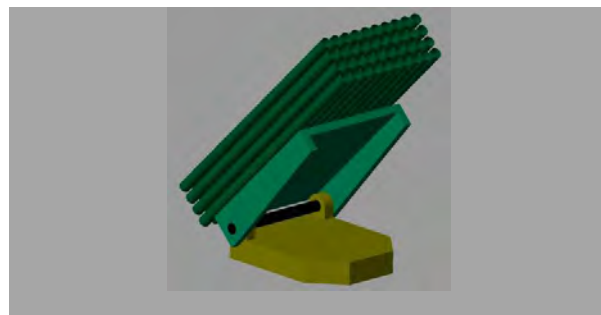
Рис. 3. Блочная диаграмма модели многоствольной ПУ в библиотеке SimMechanics

Все составные части модели многоствольной ПУ (база, ВЧ, КЧ) представлены в структуре диаграммы SimMechanics соответствующими подсистемами (рисунок 3, поз. 6, 8, 15), каждая из которых является группой взаимосвязанных блоков. ВЧ с базой, КЧ с ВЧ соединены вращающимися соединениями с заданными коэффициентами жесткости и демпфирования.

Блоки раздела Joints библиотеки SimMechanics (рисунок 3, поз. 7, 11) имеют возможность вывода данных с встроенных виртуальных датчиков, которые включаются в настройках блока. Так, к примеру, на рисунке 4 (а) показаны данные углового положения КЧ в вертикальной плоскости в результате пробного однократного возмущающего воздействия, снятые с виртуального датчика размещенного на оси вращения КЧ. На рисунке 4 (б) представлена визуализация КЧ при помощи встроенных средств анимации среды Matlab Simulink.



а – Данные углового положения КЧ



б – Визуализация КЧ

Рис. 4. Моделирование динамики КЧ в SimMechanics

Частота затухающих колебаний КЧ определенная по результатам моделирования (рисунок 4) соответствует собственной частоте колебаний КЧ, снятой при проведении эксперимента и результатам математического моделирования [3].

Сила давления газовой струи была рассчитана по методике, изложенной в [3]. Для моделирования ее возмущающего воздействия были использованы блоки External Force and Torque.

На рисунке 5 представлена визуализация модели многоствольной ПУ в SimMechanics, на рисунке 6 – данные с виртуальных датчиков углового положения и угловой скорости КЧ при моделировании залпового огня.

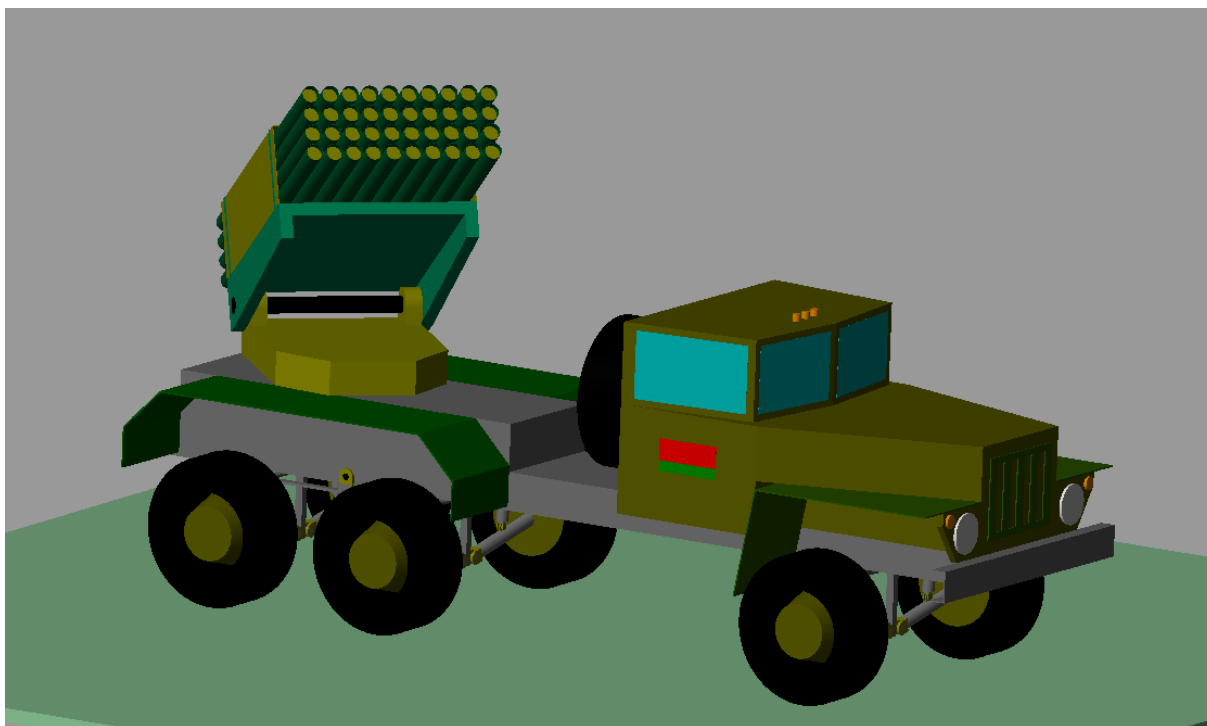


Рис. 5. Визуализация модели многоствольной ПУ в SimMechanic

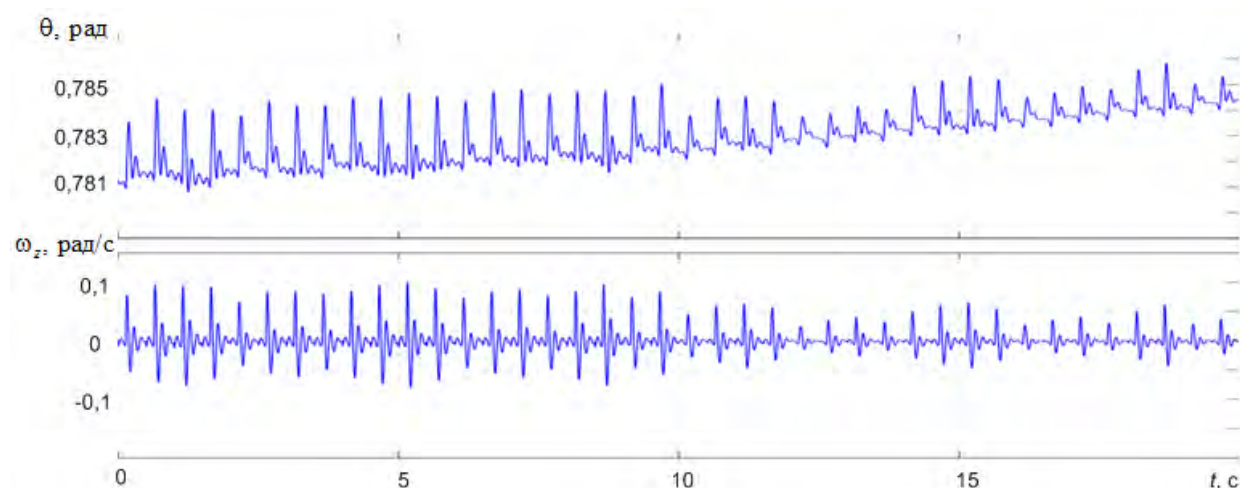


Рис. 6. Данные углового положения и угловой скорости КЧ по результатам моделирования

Результаты моделирования, представленные на рисунке 6 соответствуют имеющимся в литературе [2] данным, а также результатам математического моделирования [3] и эксперимента [5]. Смещение положения равновесия КЧ в процессе залпа объясняется постепенным уменьшением массы, вследствие схода РС.

Таким образом, использование SimMechanics существенно ускоряет и упрощает процесс создания модели исследуемой механической системы. Существует возможность оперативного изменения параметров модели, в том числе в процессе моделирования. Встроенные средства визуализации позволяют дополнительно расширить возможности исследования динамических характеристик. Особенно полезным будет использование SimMechanics в учебном процессе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Богомолов, А. И. *Основания устройства и расчет реактивных систем* / А. И. Богомолов. – Пенза: ПАИИ, 2003. – 320 с.
2. Антуневич, А. Л., [и др.] *Применение математической модели для анализа сложной механической системы, подверженной неоднородным переменным воздействиям* // А.Л. Антуневич, И. Г. Ильёв, В. П. Гончаренко, Д. Н. Миронов. – Теоретическая и прикладная механика, №32, с 207-213.
3. *Оценка возможности построения и разработка облика системы управления пуском реактивной системы залпового огня. Шифр «Супра»: отчет о НИР / Науч. рук. И. Г. Ильёв; отв. исп. А. Л. Антуневич. Минск, УО «ВА РБ», 2016. – 133 с.*
4. Щербаков, В. С., [и др.] *Моделирование и визуализация движений механических систем в MATLAB: учеб. пособие* / В. С. Щербаков, М. С. Корытов, А. А. Руппель, В. А. Глушец, С. А. Милюшенко. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2007. – 84с.
5. Сахарук, Д. А., [и др.] *Повышение эффективности стрельбы реактивной системы залпового огня вследствие учета начальных возмущений* / Д. А. Сахарук, В.В. Шаболтиев, И.Г. Ильёв, А.Л. Антуневич // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2016. – № 30. – С. 124–130.