

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА НА ТРЁХ ПЛАНАРНЫХ ПОЗИЦИОНЕРАХ\*

студ. Кузнецов В.В.

УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск

**Введение.** Построение параллельных манипуляторов, предназначенных для реализации сложных пространственных перемещений инструмента и заготовки с повышенными точностными и динамическими характеристиками обязательно требует проведения исследования динамики его исполнительного пространственного механизма. В процессе динамического анализа исполнительного механизма параллельного манипулятора решаются задачи алгоритмизация математических моделей, описывающих динамическое состояние и поведение механизма в движении и равновесии при наличии внешних силовых воздействий. На базе построенной динамической модели исполнительного механизма решаются прямая и обратная задачи динамики. В среде моделирования проводится симуляция работы исполнительного механизма по его динамической модели для конкретных случаев отработки заданных перемещений. Построенная динамическая модель выступает оптимальным средством настройки и верификации регулятора системы управления, так как учитывает одновременно и динамические и кинематические особенности исполнительного механизма.

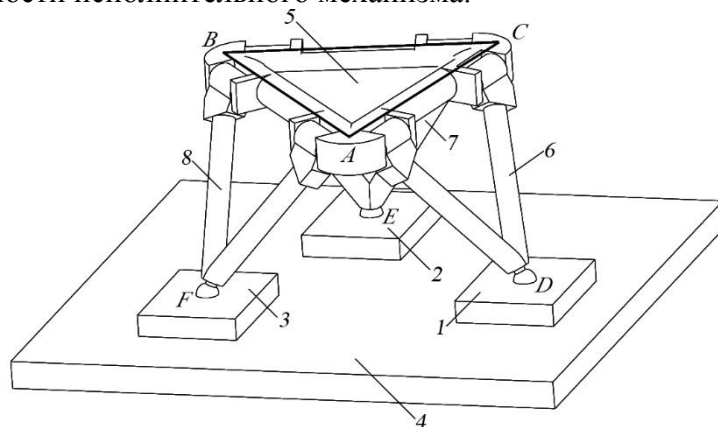


Рис. 1. Параллельный манипулятор на трёх планарных позиционерах

В статье рассмотрено имитационное моделирование динамики параллельного манипулятора на трёх планарных позиционерах. Исполнительный механизм параллельного манипулятора (рис. 1) представляет собой пространственный механизм, кинематическая цепь которого состоит из семи подвижных звеньев, из которых три 1, 2, 3 ведущие в виде индукторов планарных позиционеров, а остальные звенья 4, 5, 6, 7 образуют группу Ассур третьего класса в виде раскрывающегося тетраэдра. Выходным звеном исполнительного механизма рассматриваемого манипулятора является треугольное звено  $ABC$ , связанное вращательными парами  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$  с соответствующими треугольными шатунами.

**Блочно-модульная структура динамической модели.** Имитационное моделирование динамического анализа рассматриваемой системы перемещений с шестью степенями свободы может быть выполнено в среде MATLAB/Simulink в соответствии с концепцией моделирования пакета Simscape. Этот пакет позволяет осуществлять моделирование поступательного и вращательного движения различной сложности в трех

плоскостях, содержит набор инструментов для задания параметров звеньев (масса, координаты центра масс, моменты инерции, геометрические параметры), кинематических ограничений, локальных систем координат, способов задания и измерения движений. Динамическая модель системы реализуется в виде блочно-схемного описания механической структуры с помощью соответствующих функциональных элементов.

Поддержка интеграции с CAD (Computer-Aided Design) платформами, такими как Autodesk Inventor и SolidWorks, позволяет автоматически импортировать структурно-параметрическое описание модели системы в среду MATLAB/Simulink (рис. 2).

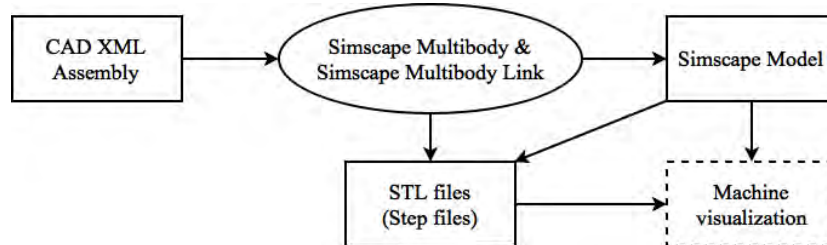


Рис. 2. Интеграция Simscape с CAD-системами

Построение имитационной динамической модели нами выполнялось при помощи встроенной среды Simulink в программный продукт MATLAB с использованием пакетов Simscape Multibody и Simscape Multibody Link. Обобщенная блочно-модульная схема представлена на рис. 3.

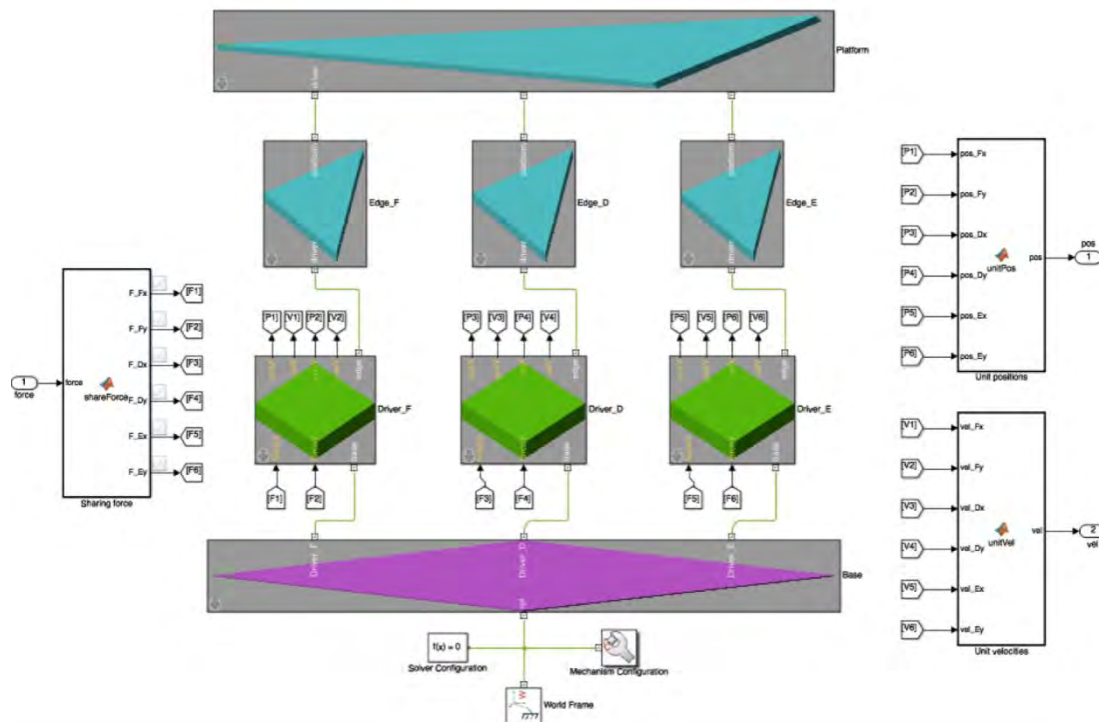


Рис. 3. Обобщенная блочно-модульная схема

Схема включает блок *Sharing force* для подачи массива сил на планарные позиционеры, статор *Base*, планарные позиционеры *Driver\_F*, *Driver\_D*, *Driver\_E*, связывающие элементы *Edge\_F*, *Egde\_D*, *Edge\_E*, представляющие боковые звенья механизма и статор; боковые звенья в свою очередь находятся в непосредственном контакте с рабочей платформой *Platform*.

**Внутренняя структура функциональных блоков.** Глобальная система отсчета *World Frame*, представляющая выбранную систему координат  $S_0$  при решении матема-

тической модели, связана со статором, внутренняя структура которого представлена на рис. 4. Она включает блоки, связывающие системы координат, а также блок *Base*, отвечающий за массогабаритные и инерционные характеристики.

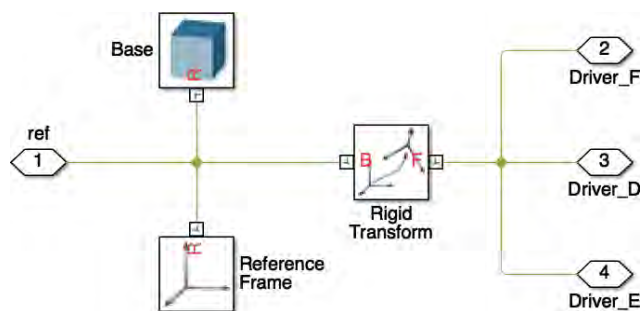


Рис. 4. Внутренняя структура статора

Статор обеспечивает связь с тремя планарными позиционерами, внутренняя структура которых (рис. 5) включает блок *Driver\_F*, отвечающий за динамические характеристики.

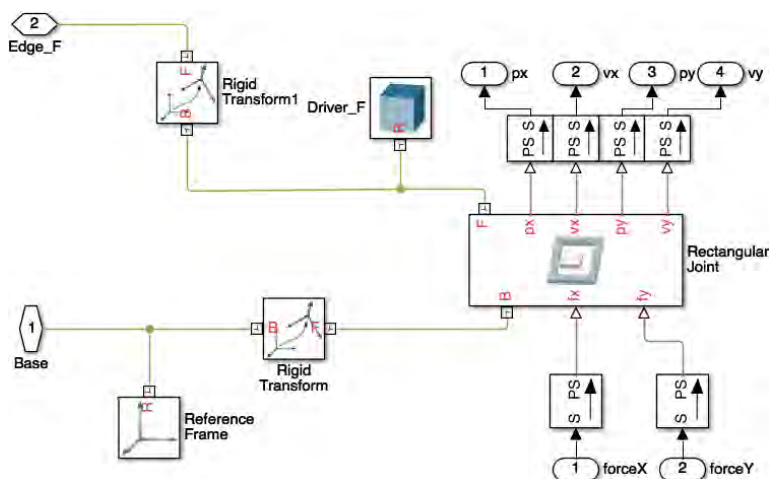


Рис. 5. Внутренняя структура планарного позиционера

Каждый из планарных позиционеров, в свою очередь, связан с соответствующим ему боковым звеном *Edge\_F*, *Edge\_D*, *Edge\_E*, внутренняя структура (рис. 6) которого включает сферический шарнир *Spherical Joint* для взаимодействия с планарным позиционером.

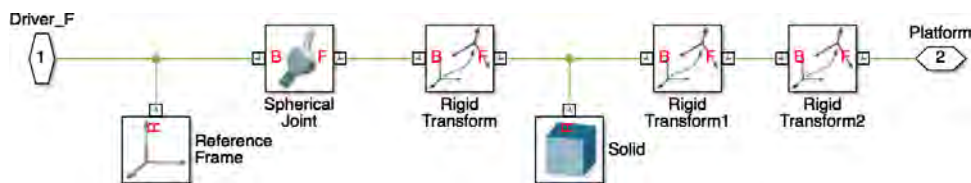


Рис. 6. Внутренняя структура бокового звена

Боковые звенья манипулятора связаны с рабочим звеном при помощи блоков *Revolute\_F*, *Revolute\_D*, *Revolute\_E* внутренней структуры рабочей платформы (рис. 7).

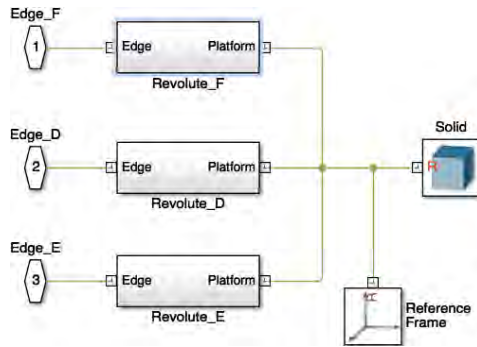


Рис. 7. Внутренняя структура рабочей платформы

Для подачи силовой управляющей функции, обеспечивающей движение планарных позиционеров по необходимой траектории к полученной блочно-модульной схеме был добавлен ПИД-контроллер (рис. 8), который позволяет преобразовывать разницы между текущей скоростью  $act\_vel$  позиционера и следующей  $des\_vel$  при определённом шаге, а также между текущей позицией  $act\_pos$  и следующей  $des\_vel$  в массив необходимых сил  $force$ . В контроллере может программироваться как однопараметрические регуляторы, так и для сложных систем регуляторы, обеспечивающие управление в пространстве состояния, включающего векторы положения, скорости и ускорения.

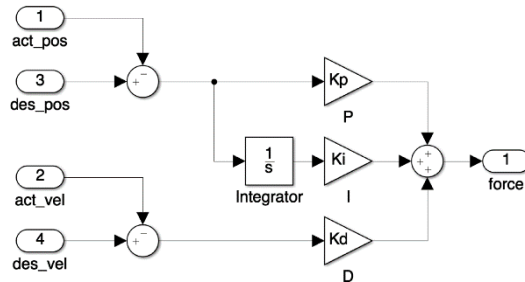


Рис. 8. Блочная структура ПИД-контроллера

Для генерации необходимой скорости и позиции на определенном шаге был добавлен блок, включающий решение обратной задачи кинематики по входным значениям положения рабочего звена в пространстве. В результате созданных блочных модулей, структура взаимодействия модулей будет иметь вид, представленный на рис. 9.

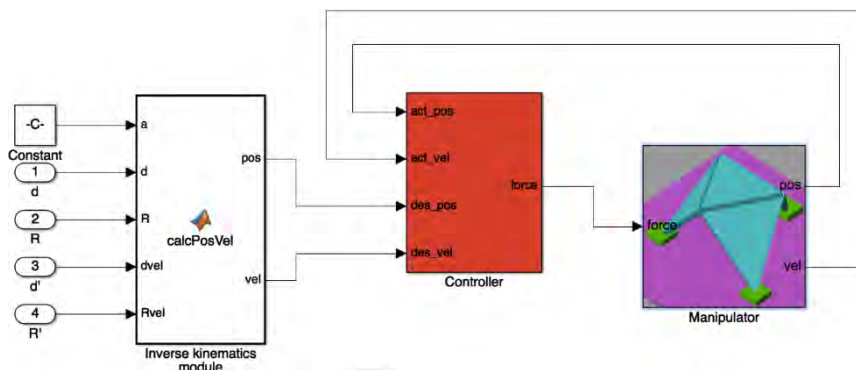


Рис. 9. Структура взаимодействия контроллера и механизма

Для тестового исследования динамики исполнительного механизма параллельной кинематики с шестью степенями свободы и системы перемещений на его основе нами был добавлен блок, генерирующий параметрические изменения во времени углов Эйлера и линейных координат, отвечающих за положение рабочего звена (платформы) в трехмерном пространстве с реализацией синусоидального закона перемещения по уг-

лам Эйлера. Внутренняя структура блока генерации состояния рабочего звена в трёхмерном пространстве представлена на рис. 10.

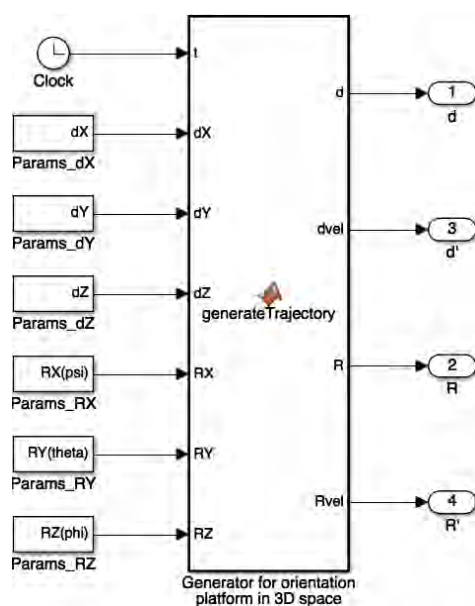


Рис. 10. Блок генерации состояния рабочего звена в трёхмерном пространстве

В результате разработанная общая блочно-модульная структура динамической модели системы перемещения на трёх планарных позиционерах с шестью степенями свободы в среде MATLAB/Simulink будет иметь вид, представленный на рис. 11.

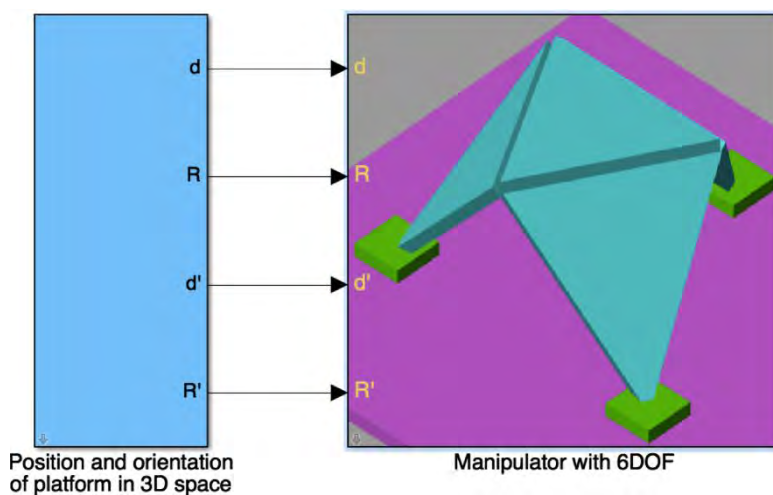


Рис. 11. Результирующая блочно-модульная структура динамической модели

**Результаты моделирования.** В качестве тестового задания на имитационное моделирование нами был выбран наиболее сложный для реализации закон перемещений платформы с синусоидальным законом изменения углов Эйлера. В результате проведенного компьютерного моделирования динамики инструментами MATLAB/Simulink были получены графики изменения силовых функций, развиваемых по координатам тремя планарными приводами в зависимости от времени, учитывающие нагрузочные и массо-габаритные характеристики рассматриваемой системы многокоординатных перемещений.



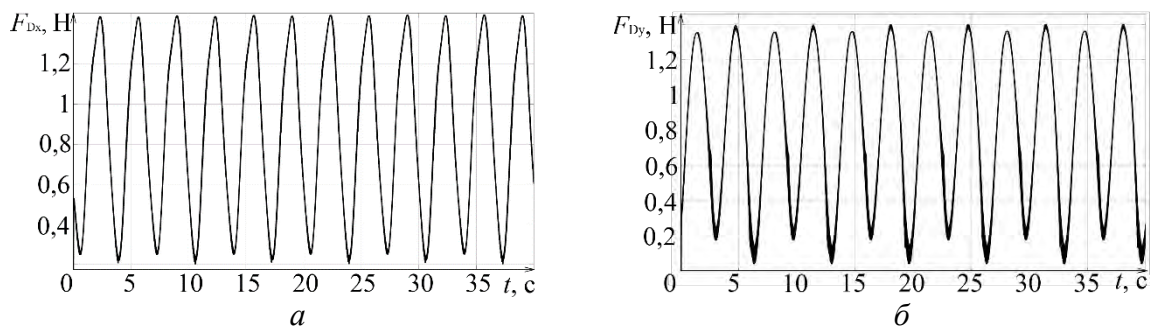


Рис. 12. Графики силовых функций

На рис. 12, *а, б* представлены графики силовых функций первого координатного планарного привода, развиваемых по двум ортогональным координатам  $x$  и  $y$  соответственно. Частотные характеристики периодичности силовых функций соответствуют частоте выбранного закона перемещений, а амплитуда полностью определяется массогабаритными характеристиками исполнительного механизма рассматриваемой системы перемещений. Результатами имитационного моделирования по разработанной в MATLAB динамической модели также являются законы перемещения, реализуемые силовыми функциями электромагнитного взаимодействия в подвижных планарных модулях.

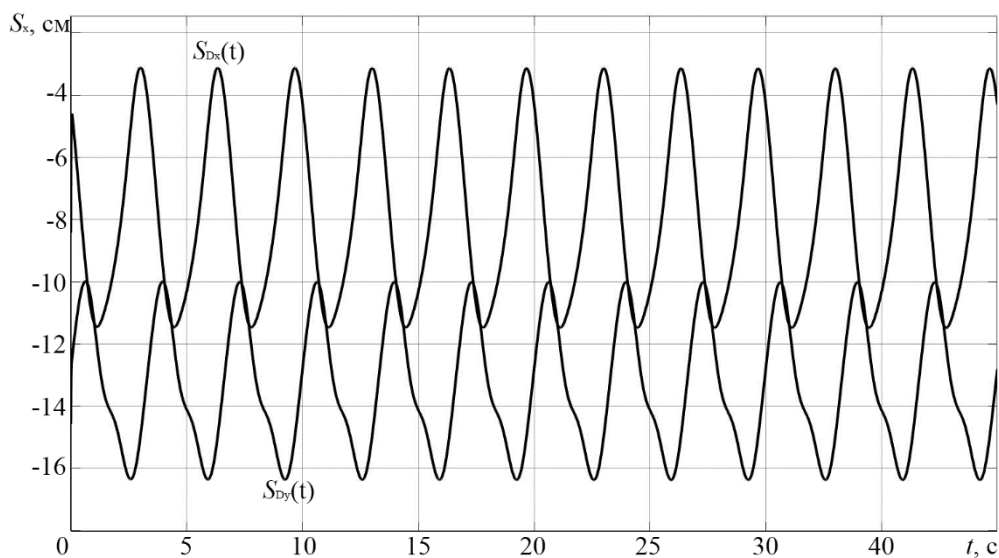


Рис. 13. Графики перемещений планарного позиционера  $D$  по координатам  $x, y$

На рис. 13 в качестве примера приведены графики по координатных функций перемещений планарного позиционера  $D$  полученные из динамической модели.

В результате имитационного моделирования по динамической модели, разработанной инструментами MATLAB/Simulink также были получены графики по координатных скоростей трёх планарных позиционеров  $D, E, F$ , которые представлены для координаты  $x$  на рис. 14, а для координаты  $y$  на рис. 15.

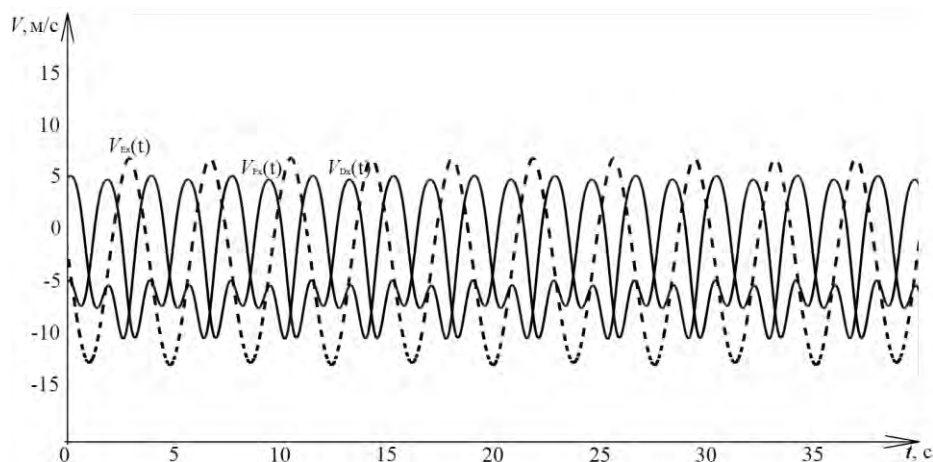


Рис. 14. Графики скоростей планарных позиционеров по координате  $x$

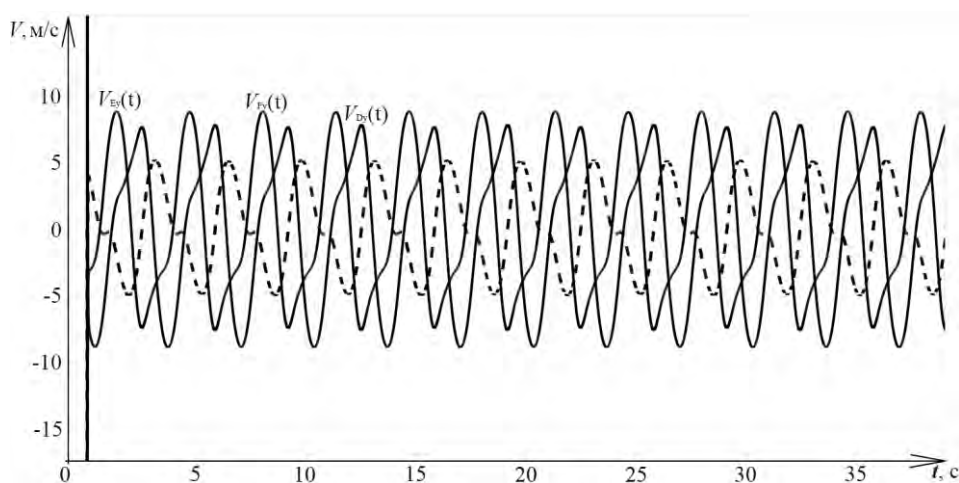


Рис. 15. Графики скоростей планарных позиционеров по координате  $y$

Полученные из динамической модели функции перемещения ведущих звеньев позволяют уточнить все необходимые при проектировании системы перемещений кинематические характеристики, включая функции перемещения всех других подвижных звеньев, линейные угловые скорости и ускорения точек и звеньев, геометрию и расположение рабочей области.

Разработанная имитационная динамическая модель исполнительного механизма параллельной кинематики на трёх планарных позиционерах позволяет не только анализировать динамические условия перемещения подвижных модулей, но и позволяет в блоке «Контроллер» подбирать параметры регулятора при реализации контурного управления.

*Работа выполнялась в рамках гранта БРФФИ № Т16-М108 «Мехатронные системы параллельной кинематики на кольцевом приводе прямого действия».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов, В.В. Алгоритмизация и моделирование пространственной системы параллельной кинематики на трех планарных позиционерах / В.В. Кузнецов // Известия национальной академии наук Беларуси. – 2016. – Вып. 3. – С. 310–319.
2. Kuzniatsou V.U. Computer modeling of kinematics and dynamics of parallel manipulator with six degrees of freedom / V.U. Kuzniatsou // Present Day Trends of Innovations 7. – Zilina, Slovakia : Printing House of Zilina University, 2017. – P. 65–73.

3. Карпович, С.Е. Имитационное моделирование кинематики системы перемещений с интерактивной визуализацией результатов / С.Е. Карпович, В.В. Кузнецов, М.М. Форутан // Докл. БГУИР – Минск, 2016. – №. 3. – С 22–28.
4. Алгоритмизация обратной задачи кинематики параллельного манипулятора на шестикоординатном линейном шаговом двигателе / С.Е. Карпович [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения : научн.-техн. журнал. / Объед. инст. машиностр. Нац. академии наук Беларуси – Минск, 2016. – Вып. 5. – С. 64 – 68.
5. Attaway, S. MATLAB. A practical introduction to programming and problem solving / S. Attaway. – Elsevier Inc., 2017 – 567 p.
6. Moosavian, A. Statically redundant parallel robots / A.Moosavian, F.Xi // Meccanica. – 2016. – Vol. 51, Iss. 7. – P. 1623-1637.
7. Chen, Ch.-T. Trajectory planning of parallel kinematic manipulators for the maximum dynamic load-carrying capacity / Ch.-T.Chen, T.-T.Liao // Meccanica. – 2016. – Vol. 51, Iss. 8. – P. 1653-1674.