

## Учебное пособие для начального освоения программного комплекса анализа динамических систем ПА9

### Введение

Программный комплекс анализа динамических систем ПА9 является современным универсальным средством анализа технических систем путем математического моделирования их работы. Он позволяет определять процессы в проектируемых и потому физически еще не существующих устройствах и показатели их качества, оценивать проектируемые устройства на соответствие требованиям технического задания, улучшать показатели качества, осуществлять оптимизацию. Программный комплекс позволяет анализировать устройства любой, в том числе и смешанной физической природы практически неограниченной сложности, если устройство может быть описано системой обыкновенных дифференциальных уравнений. При этом пользователь избавляется от необходимости составления и решения систем уравнений, поскольку язык описания устройств максимально приближен к языку описания устройств, используемым проектировщиком. Адаптированный к области машиностроения программный комплекс позволяет с высокой надежностью, достоверностью и малыми затратами времени рассчитывать детали машин, машины в целом на долговечность по условиям прочности; определять необходимую мощность двигателя привода, затраты энергии во всех элементах, работа которых связана с диссипацией энергии, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности двигателя переменного тока, статические и динамические нагрузки в различных системах, включая и статически неопределимые; рассчитывать профили кулачков в устройствах с приводом от кулачковых механизмов, определять точность механизмов.

Настоящее пособие предназначено для практического освоения комплекса путем решения ряда предлагаемых задач из области физики, теоретической механики, теории механизмов и машин, машиностроения. При этом в целях удобств осваивающему комплекс целесообразно иметь под рукой распечатки настоящего пособия, документов “Моделирование кузнечно-штамповочного оборудования средствами программного комплекса анализа динамических систем ПА9”, и “Схемный графический редактор ПА9”. Пособие постоянно пополняется новыми задачами.

Некоторые сведения по математическому моделированию технических систем механической и иной физической природы.

Объект математического моделирования должен быть описан в его математической модели с полнотой достаточной для того, чтобы задача моделирования была определенной. Качественная определенность задачи моделирования обеспечивается заданием структуры объекта. Структура объекта определяется наличием тех или иных структурных элементов объекта и связей между ними. В данной версии программного комплекса ПА9 структурные элементы представлены в виде типовых конструктивных элементов машиностроительных объектов (см. документ “Моделирование кузнечно-штамповочного оборудования средствами программного комплекса анализа динамических систем ПА9”). Для выявления структуры объекта моделирования необходимо выполнить его структурный анализ. При этом объект расчленяется на элементы, с выявлением связей между ними. Для объектов механической природы каждая связь соответ-

ствует координате одно- двух или трехмерного пространства, по которой взаимодействуют элементы.

Структура объекта находит свое отражение в топологическом представлении объекта или просто – топологии. Топология объекта – совокупность графических образов математических моделей, соединенных друг с другом с помощью связей. Каждая математическая модель представляет собой в общем случае многополюсник, каждый полюс которой соответствует координате пространства, по которой элемент, представляемый данной моделью, взаимодействует с другими элементами. Соединение полюсов моделей образуют узлы топологии. Узел топологии соответствует той же координате пространства, что и координаты полюсов моделей, подключенных к узлу.

Количественная определенность задачи моделирования обеспечивается указанием значений параметров моделей. Число параметров моделей фиксировано и не может изменяться пользователем.

Пояснения, даваемые по ходу решения задач, выделены курсивом.

### Задача 1. Моделирование маятника.

Целями решения задачи являются получение графика колебательного процесса маятника, проверка адекватности математической модели (верности воспроизведения процессов, протекающих в устройстве). Адекватность математической модели можно проверить, сопоставляя процесс, полученный при моделировании, и ожидаемый процесс, а также по совпадению расчетного периода колебаний маятника и периода колебаний по результатам моделирования. Малые колебания маятника являются гармоническими, при этом период колебаний:

$$T = 2 \pi \sqrt{l / g},$$

где  $l$  – длина маятника,  $g$  – ускорение силы тяжести. Тогда при длине маятника  $l = 1$  м период колебаний будет равен  $1,994$  с.  $\approx 2$  с. Кроме того, известно, что амплитуда колебания маятника равна его начальному отклонению.

Схема самого маятника в его исходном положении показана на рис.1.1. Он содержит структурные элементы: стержень 1, закрепленный одним концом к неподвижной опоре, и груз (тяготееющая и инерционная масса) 2, закрепленный на противоположном, подвижном конце стержня.

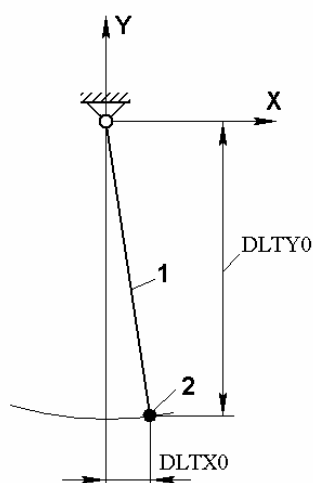


Рис. 1.1

Стержень 1 в математической модели маятника может быть представлен моделью STRGN2 (см. документ “Моделирование кузнечно-штамповочного оборудования средствами программного комплекса анализа динамических систем ПА9”), груз 2 – моделями массы и силы тяжести массы (моделью источника силы).

Для решения задачи необходимо выполнить следующие действия.

1. Запустить комплекс стартовым файлом PA9.bat. При этом открывается окно схемного графического редактора ПК с главным меню, полем с сеткой, системным и дополнительным курсорами (см., также документ “Схемный графический редактор ПА9”).

2. Создать топологию маятника.

2.1. Установить компоненты в схеме. Создать связи между компонентами.

2.1.1. Установить модель (компонент) STRGN2.

2.1.1.1. Выбрать: “Окно” (главное меню), “Образцы компонентов”, иконку с изображением механических элементов (альтернатива - “Механика” в выпадающем меню в части поля слева от иконок). Щелкнуть по графическому образу компонента “STRGN2” *Дополнительный курсор приобретает вид графического образа устанавливаемой модели (компонента).*

2.1.1.2. Установить мышью графический образ модели “STRGN2” в поле схемы, как показано на рис. 1.2. и нажать ЛКМ. Отвести курсор вместе с дублирующим графическим образом компонента “STRGN2” в свободную часть поля схемы и нажать **Del**.

2.1.2. Соединить два первых полюса модели с базовым узлом.

2.1.2.1. Переместить “пустой” курсор (см. документ “Схемный графический редактор ПА9”) в ячейку сетки поля схемы, к которой обращен первый полюс модели (компонента) “STRGN2”, и при нажатой клавише Shift или Ctrl щелкнуть ЛКМ. *Счет полюсов модели в соответствии с их изображением ведется сверху вниз и слева направо (см. документ “Моделирование кузнечно-штамповочного оборудования средствами программного комплекса анализа динамических систем ПА9”). Первый полюс (верхний левый полюс модели “STRGN2”) соответствует горизонтальной координате (x) одного из концов, в данном случае конца стержня 1 двумерного пространства (см. рис.1.1), закрепляемого к неподвижной опоре.*

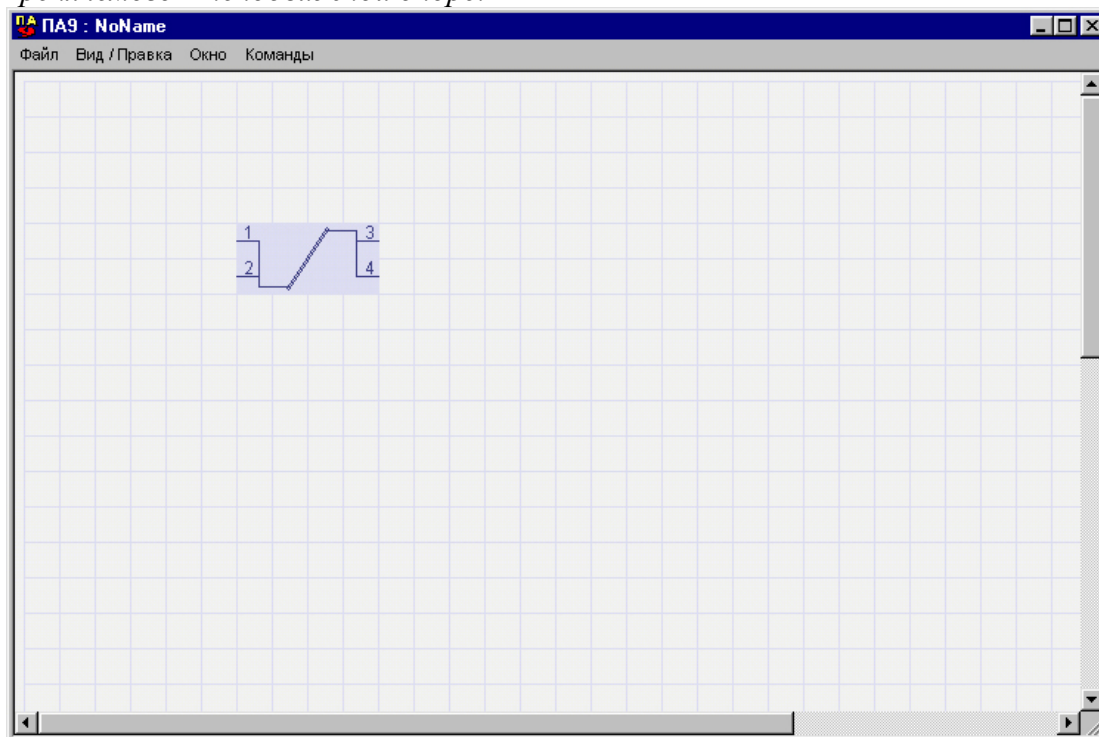
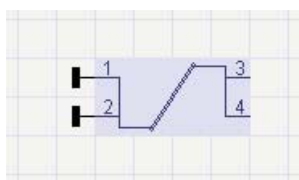


Рис. 1.2



2.1.2.2. Соединить второй полюс модели с базовым узлом (рис. 1.3). *Второй (нижний левый) полюс соответствует вертикальной координате того же*

конца стержня. Базовый узел представляет систему отсчета в выбранной системе координат. Соединение с базовым узлом первого и второго полюсов модели “STRGN2” обеспечивает требуемую по условиям задачи неподвижность конца стержня, соответствующего этим полюсам.

Рис. 1.3

2.1.3. Установить модели массы.

2.1.3.1. Повторить действия по п. 2.1.1.1 в отношении компонента “Масса”

2.1.3.2. Установить мышью графический образ модели (компонента) “Масса” в поле схемы как показано на рис. 1.4 и нажать ЛКМ.

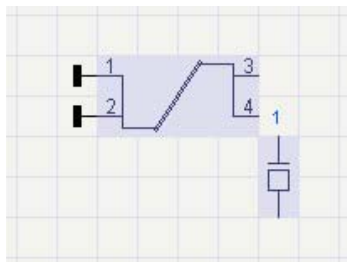


Рис. 1.4

2.1.3.3. Провести мышью второй графический образ модели “Масса” в поле схемы, как показано на рис. 1.5, и нажать ЛКМ. Отвести курсор вместе с дублирующим графическим образом модели “Масса” в свободную часть поля схемы и нажать **Del**. Масса на втором (незакрепленном) конце стержня (см. рис. 1.1) участвует в двух независимых друг от друга движениях: по координатам “x” и “y”. Поскольку масса проявляет свои инерционные свойства при движении по каждой из координат независимо от характера движения по другой координате, в модели маятника должны

иметься в наличии две модели массы. Каждая из них будет воспроизводить свойства одной и той же массы груза маятника при движении по своей координате.

2.1.4. Соединить полюса моделей масс с базовым узлом.

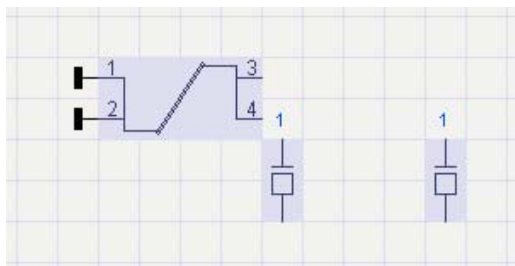


Рис. 1.5

2.1.4.1. Повторить действия по п. 2.1.2.1 в отношении нижнего полюса одной из моделей массы. Соединение полюса модели массы с базовым узлом “привязывает” эту массу к инерциальной системе отсчета.

2.1.4.2. Повторить действия по п. 2.1.2.1 в отношении нижнего полюса другой модели массы (рис. 1.6).

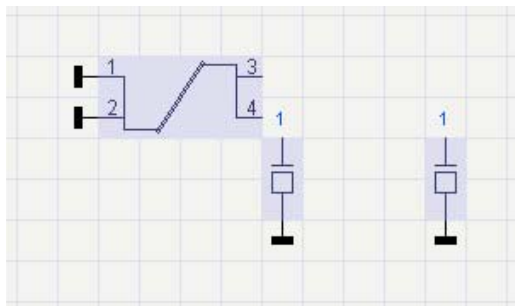


Рис. 1.6

2.1.5. Соединить третий (правый верхний) полюс модели “STRGN2” с моделью массы наиболее удаленной на поле схемы от графического образа модели “STRGN2”. Для этого переместить “пустой” курсор в ячейку сетки поля схемы, к которой обращен третий полюс модели STRGN2”. При нажатой клавише Ctrl или Shift нажать ЛКМ и, удерживая ЛКМ нажатой, перемещать курсор по горизонтальному ряду ячеек сетки поля до их вертикального ряда модели массы, а затем вниз по вертикальному ряду ячеек сетки поля до соединения создаваемой связи с верхним полюсом модели массы (альтернатива - при нажатой клавише Ctrl или Shift и неподвижности мыши перемещать “пустой” курсор по горизонтальным и вер-

тикальным рядом ячеек сетки поля клавишами  $\rightarrow, \downarrow, \leftarrow, \uparrow$ ). Третий полюс модели “STRGN2” соответствует координате “x” второго, незакрепленного конца стержня 1 (рис. 1.1). Его соединение с верхним полюсом модели массы будет означать, что груз 2 и конец стержня 1 имеют одинаковые движения по координате “x”.

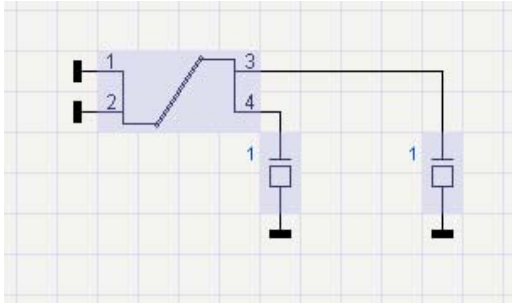


Рис. 1.7

стержня 1 имеют одинаковые движения по координате “y”.

2.1.7. Установить модель источника силы тяжести, как показано на рис. 1.8, повторяя действия по п.п. 2.1.3. в отношении компонента “Источник силы”.

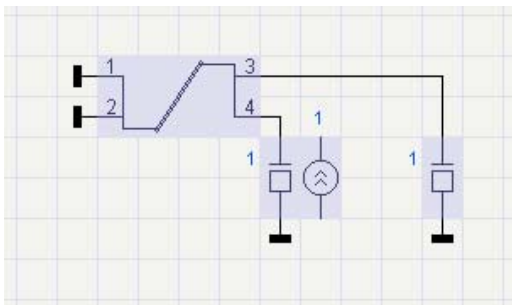


Рис. 1.8

сом модели “STRGN2 означает приложение силы, в данном случае - силы тяжести груза 2 (см. рис. 1.1) ко второму, незакрепленному концу стержня 1 в направлении координаты “y”.

2.2. Установить индикаторы в схеме. Создать связи между индикаторами и компонентами. Индикаторы служат для указания подлежащих выводу для визуального наблюдения величин, вычисляемых при моделировании.

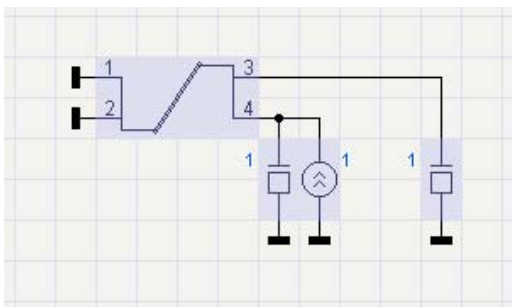


Рис. 1.9

Непосредственно при моделировании вычисляются величины, называемые фазовыми переменными (ФП), которые могут быть либо ФП типа потока, либо ФП типа потенциала.

2.1.6. Повторяя действия по п. 2.1.5., соединить четвертый (правый нижний) полюс модели (компонента) “STRGN2 с верхним полюсом второй (ближайшей к модели “STRGN2”) модели массы (см. рис. 1.7). Четвертый полюс модели “STRGN2” соответствует координате “y” второго, незакрепленного конца стержня 1 (рис. 1.1). Его соединение с верхним полюсом модели массы будет означать, что груз 2 и конец стержня 1 имеют одинаковые движения по координате “y”.

2.1.8. Соединить нижний полюс модели источника силы тяжести с базовым узлом, повторяя действия по п. 2.1.2.1. в отношении нижнего полюса компонента “Источник силы”.

2.1.9. Соединить верхний полюс модели источника силы тяжести с четвертым полюсом модели “STRGN2” (см. п. 2.1.5), как показано на рис. 1.9. Включение модели источника силы тяжести ее полюса между базовым узлом и четвертым полюсом модели “STRGN2 означает приложение силы, в данном случае - силы тяжести груза 2 (см. рис. 1.1) ко второму, незакрепленному концу стержня 1 в направлении координаты “y”.

К ФП типа потока относятся переменны любой физической природы, для которых справедлив I электрический закон Кирхгофа, либо его аналог.

Они представляются потоками, “текущими” в полюсах моделей. Поэтому индикаторы для вывода ФП типа потока включаются в разрывы связей между

моделями. К ФП типа потока относятся электрический ток, сил, момент сил, гидравлический и объемный газовый расходы, тепловой поток.

К ФП типа потенциала относятся величины любой физической природы, для которых справедлив II электрический закон Кирхгофа, либо его аналог. Они представляются потенциалами узлов, образуемых соединением полюсов моделей. Индикаторы для вывода ФП типа потенциала подключаются к узлам топологии. К ФП типа потенциала относятся электрическое напряжение, линейная и угловая скорости, давление среды, температура.

В данном случае для наблюдения предлагается вывод горизонтальных составляющих перемещения и скорости груза 2 (рис. 1.1).

2.2.1. Установить индикатор горизонтальной составляющей скорости груза.

2.2.1.1. Выбрать: “Окно” (главное меню), “Образцы компонентов”, иконку с изображением калькулятора (альтернатива - “Базовые компоненты” в выпадающем меню в части поля слева от иконок). Щелкнуть по изображению индикатора “Потенциал” (первый вариант) в разделе “Индикаторы”. Компонент “Потенциал” привлекается в связи с тем, что, как это было отмечено ранее, выводимая величина – горизонтальная составляющая скорости – является фазовой переменной типа потенциала.

2.2.1.2. Вызвать контекстное меню, для чего щелкнуть правой кнопкой мыши (в дальнейшем - ПКМ). Щелкнуть по значку “Повернуть направо на 90” в разделе “Операция” контекстного меню.

2.2.1.3. Установить индикатор в поле схемы, как показано на рис. 1.10 и нажать ЛКМ. Отвести курсор вместе с дублирующим изображением индикатора в свободную часть поля схемы и нажать **Del**.

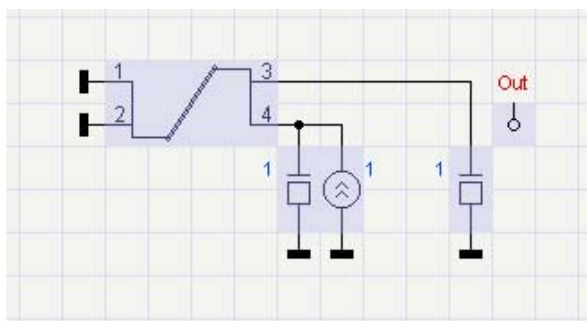


Рис. 1.10

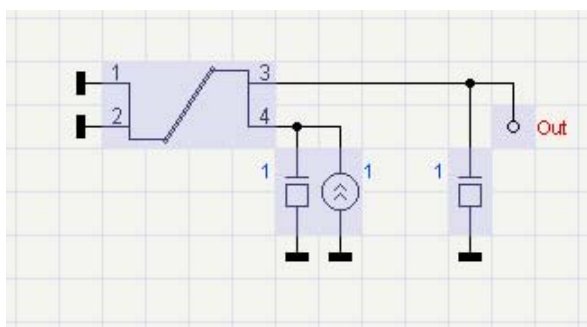


Рис. 1.11

2.2.1.4. Присоединить индикатор к узлу, соответствующему горизонтальной координате перемещения груза маятника (рис. 1.11). Индикатор присоединяется к узлу, поскольку с его помощью выводится ФП типа потенциала (см. п. 2.2).

2.2.1.5. Назначить атрибуты индикатора.

2.2.1.5.1. Щелкнуть по изображению индикатора на схеме.

2.2.1.5.2. Удалить флажок в поле “Автокорректировка пределов”. Заменить имеющийся идентификатор на идентификатор Vx. Ввести значение верхнего предела равное “1”, нижнего предела равное “-1”. Введенные верхний и нижний пределы будут определять значения выводимой в виде графика величины на верхней и нижней границах графика.

2.2.1.5.3. Установить цвет линии графика вывода горизонтальной составляющей скорости груза маятника, для чего установить курсор в круговой диа-

грамме цветов в соответствующем месте и щелкнуть ЛКМ. Установить флажок в поле “Включен”, ОК.

2.2.2. Установить индикатор горизонтального перемещения груза маятника.

2.2.2.1. Выполнить действия по п. 2.2.1.1. в отношении индикатора “Интеграл потенциала”. Компонент “Интеграл потенциала” привлекается в связи с тем, что выводимое с его помощью перемещение груза маятника является результатом интегрирования скорости (ее горизонтальной составляющей).

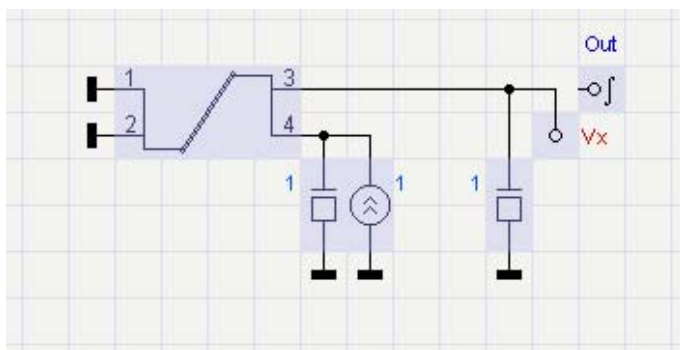


Рис. 1.12

2.2.2.2. Установить индикатор в поле схемы, как показано на рис. 1.12 (см. п. 2.2.1.3.).

2.2.2.3. Присоединить индикатор к узлу, соответствующему горизонтальной координате перемещения груза маятника, как показано на рис. 1.13 (см. п. 2.2.1.4.). Индикатор присоединяется к узлу, поскольку с его помощью выводится результат интегрирования ФП типа потенциала.

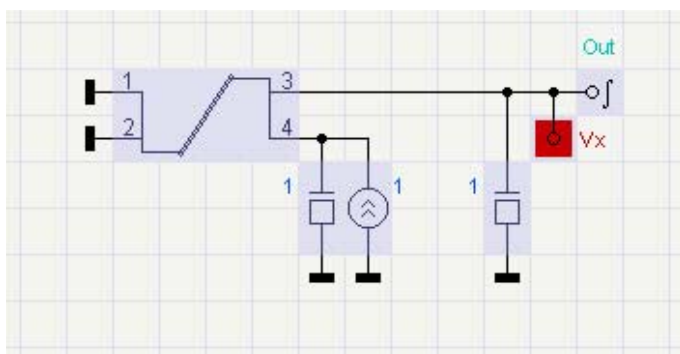


Рис. 1.13

2.2.2.4. Назначить атрибуты индикатора (см. п. 2.2.1.5.) Удалить флажок в поле “Автокорректировка пределов”. При этом имеющийся идентификатор Out заменить на идентификатор Sx, значение верхнего предела ввести равным 0.1, нижнего предела - равным - 0.1, начальное значение - равным 0.1.

3. Ввести параметры моделей (названия и обозначения параметров моделей см. в документе “Моделирование кузнечно-штамповочного оборудования средствами программного комплекса анализа динамических систем ПА9”).

3.1. Ввести параметры модели “STRGN2”.

3.1.1. Щелкнуть по изображению модели “STRGN2” на схеме.

3.1.2. Ввести параметры модели модель “STRGN2” – Сжимаемый (растяжимый) стержневой элемент в двухмерном пространстве):  $DLTX0 = 0.1$ ,  $DLTY0 = -0.99$ ,  $F = 0.1$ ,  $E = 2.e11$ ,  $M = 0.$ ,  $LC = 0.5$ ,  $TIAG = 1$ , ОК. Введенные параметры  $DLTX0$  и  $DLTY0$  обеспечивают значения длины маятника равной 1м и малость колебаний маятника, поскольку его начальное отклонение от положения равновесия (0,1м) составляет 0,1 от его длины. Минус при значении параметра  $DLTY0$  соответствует положению стержня маятника в выбранной системе координат, показанному на рис. 1. Значение массы стержня введено равным 0, так как масса маятника в рассматриваемом случае сосредоточена в

грузе и вводится значениями массы последнего. Как указывалось выше, если не оговорено иное, параметры задаются основными единицами системы СИ.

3.2. Ввести параметры моделей масс.

3.2.1. Щелкнуть по изображению первой модели массы на схеме.

3.2.2. Ввести значение параметра массы  $M = 10$ . Ввести идентификатор  $M_y$ , ОК.

3.2.3. Щелкнуть по изображению второй модели массы на схеме.

3.2.4. Ввести значение параметра массы  $M = 10$ . Ввести идентификатор  $M_x$ , ОК. Введенные значения масс  $M_x$  и  $M_y$  должны быть одинаковыми, поскольку они представляют одну и ту же массу, имеющую движение по двум координатам двумерного пространства. Выбор значения массы равно  $10 \text{ кг}$  является произвольным. Вводимые значения массы могут быть и другими.

3.3. Ввести параметр модели силы тяжести.

3.3.1. Щелкнуть по изображению модели силы тяжести на схеме.

3.3.2. Ввести значение параметра силы тяжести  $F = -98.1$ . Значение параметра должно быть равным значению параметра масс  $M1$  и  $M2$  умноженному на ускорение силы тяжести. Знак минус – в связи с тем, что направление силы тяжести груза противоположно направлению оси  $Y$  системы координат. Установить идентификатор  $F_y$ , ОК.

4. Выполнить моделирование маятника.

4.1. Выбрать: “Окно” (главное меню), “Образцы компонентов”, иконку с изображением калькулятора. Щелкнуть по изображению оператора “Анализ динамики” Dynamic в разделе “Операторы”.

4.2. Расположить изображение оператора Dynamic на свободной части поля схемы, например, как показано на рис. 1.14 и нажать ЛКМ. Отвести курсор вместе с дублирующим изображением оператора в свободную часть поля схемы и нажать **Del**.

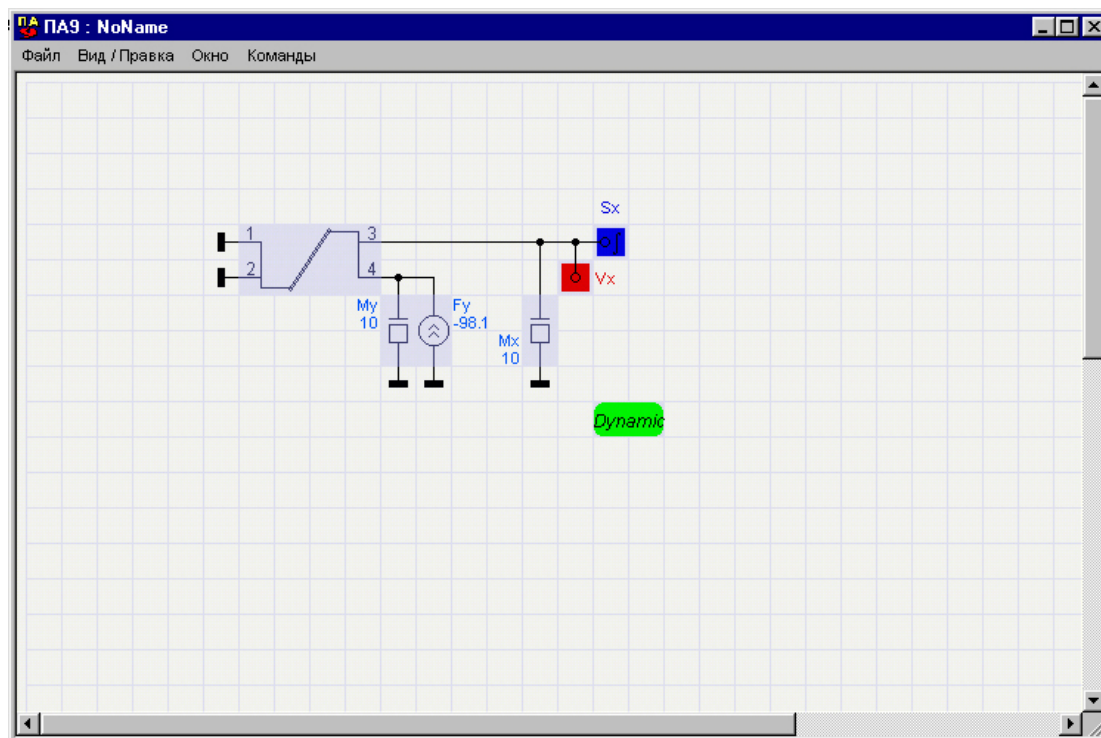


Рис. 1.14



4.3. Ввести параметры управления процессом моделирования и запустить задачу на выполнение.

4.3.1. Щелкнуть по изображению оператора Dynamic.

4.3.2. Установить метод интегрирования “Трапес”.

4.3.3. Установить время интегрирования 10 (абсолютное). *Указанное время представляет собой время моделируемого процесса в секундах.*

4.3.4. Установить флажок в поле Smx (максимальный шаг интегрирования). Установить значение параметра Smx в открывшемся поле равное 0.01, ОК.

4.3.5. Выбрать “Команды” (главное меню), “Выполнить задание”.

5. Проанализировать и оценить полученные результаты.

5.1.1. Проверить адекватность модели. *Получаемые результаты моделирования показаны на рис. 1.15. (В случае несоответствия полученных результатов рисунку 1.15 следует повторить выполнение пунктов 2-4, обращая внимание на безошибочность своих действий). Визуальная оценка полученных результатов показывает, что графики горизонтальных составляющих скорости и перемещения груза представляют собой синусоиды и, следовательно, колебания маятника являются гармоническими. Период колебаний маятника равен 2с и совпадает с расчетным. Амплитуда колебания равна начальному отклонению маятника. Таким образом, проверка адекватности модели маятника имеет удовлетворительные результаты.*

5.1.2. Определить количественные характеристики результатов.

5.2.1. Выбрать: “Окно” (главное меню окна результатов), “Мин / Макс значения”. В открывшемся окне найти амплитудные значения горизонтальных составляющих скорости и перемещения груза маятника. Закрыть окно. Выбрать: “Окно” (главное меню окна результатов), “Численные значения”. Совместив появившийся визир с какой-либо точкой графика, щелкнуть ЛКМ. Найти значе-

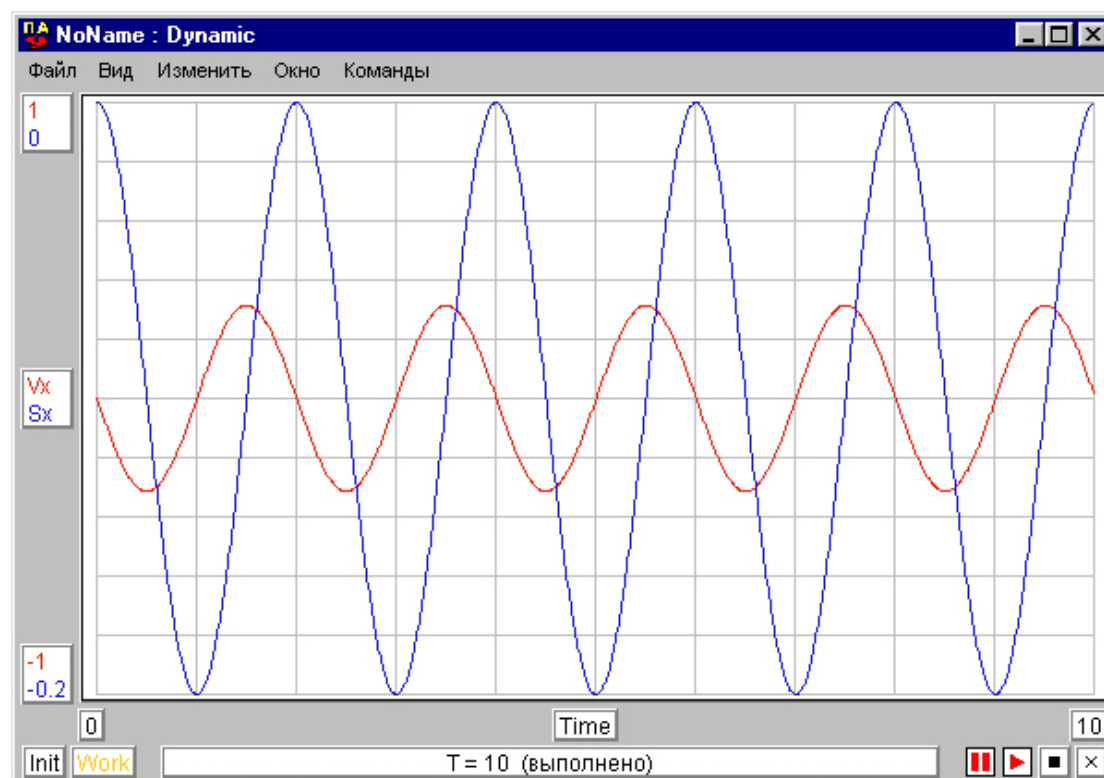


Рис. 1.15

ние горизонтальной составляющей груза маятника при модельном времени 1,3с. В строке “Вариант 1” содержатся значения величин, выведенных на графики, при выбранном значении модельного времени. В строке “Точка” содержатся значения тех же величин, соответствующие положению визиры.

6. Выполнить моделирование маятника для случая “больших” колебаний. Маятник в условиях “больших” колебаний не является линейной системой. “Большие” колебания маятника не являются гармоническими. Получение закона движения для этих условий аналитическими методами математики затруднительно. Вместе с тем моделирование позволяет получить закон движения для случая “больших” колебаний без особых затруднений, как и для случая малых колебаний, в чем можно убедиться, выполняя дальнейшие пункты задания.

6.1. Изменить параметр DLTU0 модели “STRGN2”, выполняя действия по п. 3.1, назначив его значение 0.99 вместо - 0.99. При этом исходное положение маятника будет соответствовать рис. 1.16.

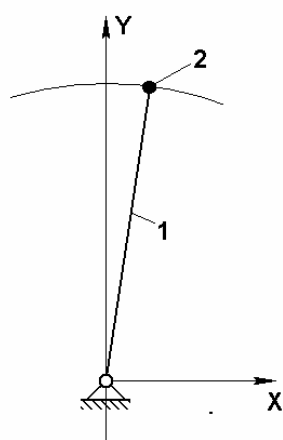


Рис. 1.16

6.2. Изменить атрибуты индикаторов. (см. п. 2.2.1.5).

6.2.1. Установить флажок в поле “Автоматическая коррекция пределов” индикатора горизонтальной составляющей скорости груза  $V_x$ . Удалить значения верхнего и нижнего пределов, оставив их поля пустыми.

6.2.2. Установить флажок в поле “Автоматическая коррекция пределов” индикатора горизонтальной составляющей перемещения груза  $S_x$ . Удалить значения верхнего и нижнего пределов, оставив их поля пустыми.

6.3. Установить значение параметра  $S_{mx}$  равное  $2 \cdot e^{-4}$ . (п.4.3).

6.4. Запустить задачу о моделировании

маятника на выполнение.

7. Проанализировать и оценить полученные результаты. Получаемые результаты моделирования показаны на рис. 1.17. Их анализ подтверждает, что “большие” колебания маятника не являются гармоническими. Как видно из полученного графика, период “больших” колебаний маятника в нашем случае оказался равным 5,58с. Настоящий пример дает возможность убедиться, что получение закона движения методами математического моделирования для случая “больших” колебаний маятника, т.е. при нелинейности системы, не связано с преодолением дополнительных трудностей по сравнению со случаем малых колебаний при линейности динамической системы.

8. Пользователю предлагается самостоятельно на основе полученного опыта повторить моделирование для случая горизонтального исходного положения маятника, которое показано на рис. 1.18, введя соответствующие значения параметров DLTX0 и DLTU0 в модели “STRGN2” и “Начальное значение” в индикаторе  $S_x$ . Убедиться в негармоническом характере колебаний, определить период колебаний.

9. Выполнить моделирование маятника для случая малых колебаний с выводом всех силовых и кинематических переменных.

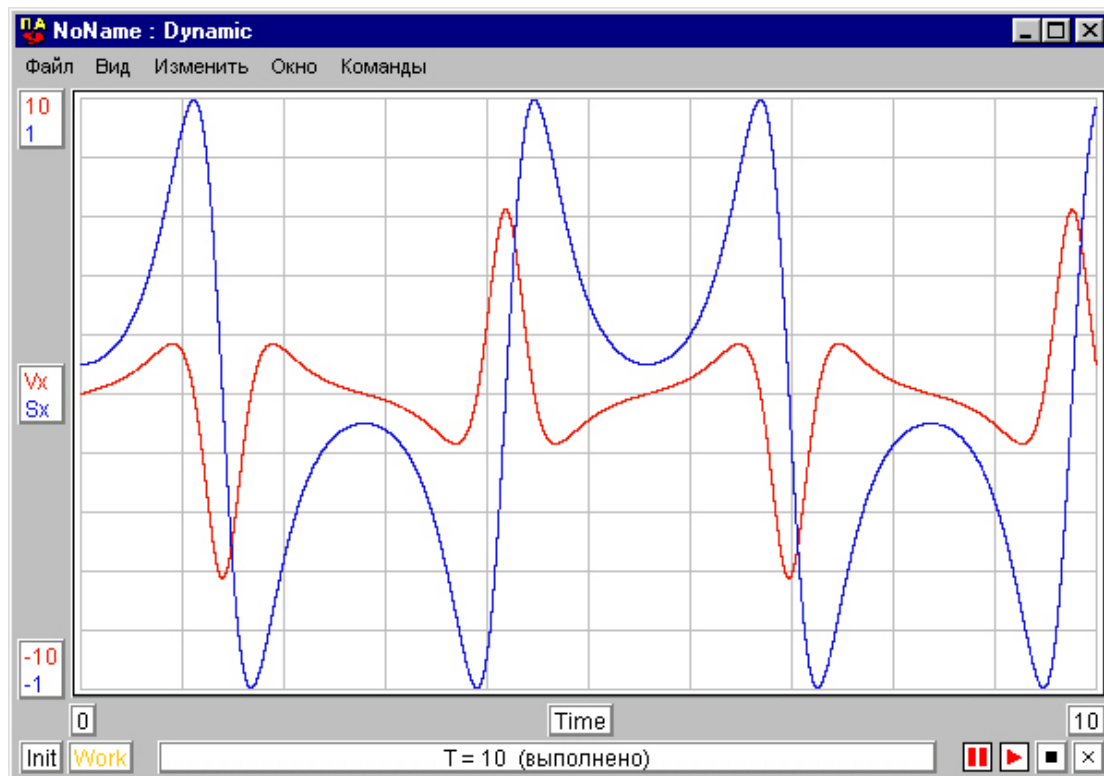


Рис. 1.17

9.1. Вернуться к параметрам моделей, атрибутам индикаторов и параметрам управления процессом моделирования для случая малых колебаний маятника (см. п.п. 2, 3, 4.3).

9.2. Сместить изображения моделей и индикаторов на схеме.

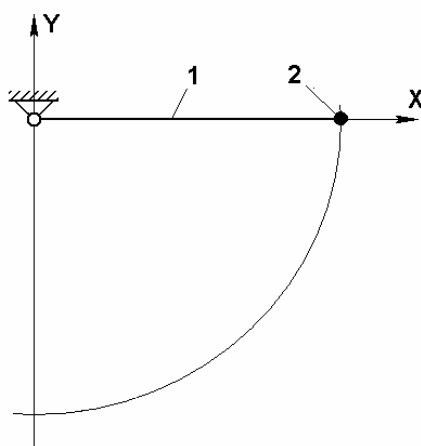


Рис. 1.18

9.2.1. Удалить связи модели стержня “STRGN2” с прочими элементами схемы. Удалить соединения моделей с базовым узлом.

9.2.1.1. Подвести курсор к началу связи модели “STRGN2” ее третьим полюсом с моделью массы  $M_x$ , установив его за пределами поля модели “STRGN2”. Поле модели включает в себя затемненную часть поля схемы. Признаком того, что курсор находится в пределах поля модели является наличие рамки у модели.

9.2.1.2. Удерживая нажатой DEL, перемещать курсор по горизонтальной, а затем по вертикальной частям связи.

9.2.1.3. Повторяя действия по п.п. 9.2.1.1 и 9.2.1.2, удалить связи модели “STRGN2” ее четвертым полюсом с моделями  $M_y$  и  $F_y$ .

9.2.2. Удалить соединение полюсов моделей масс  $M_x$ ,  $M_y$  и модели  $F_y$  с базовым узлом, для чего устанавливать курсор на изображения базового узла у моделей и при нажатой DEL щелкать ЛКМ.

9.2.3. Переместить изображение индикатора  $S_x$ .

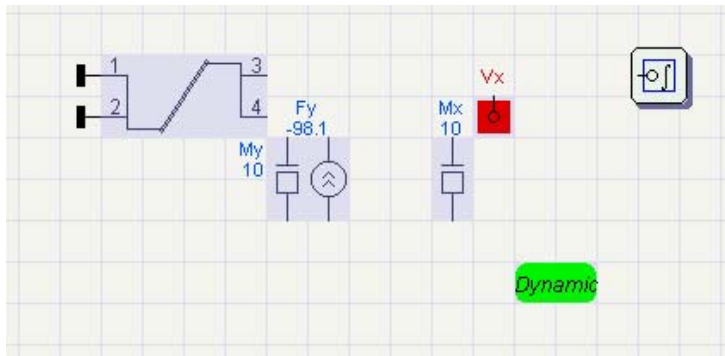


Рис. 1.19

тива 9.2.3.2 и 9.2.3.3 – “Пробел”).

9.2.3.4. Установить курсор на изображение индикатора  $S_x$  и, удерживая ЛКМ нажатой, переместить изображение индикатора вправо, как показано на рис. 1.19 (на три ячейки сетки поля вправо), после чего ЛКМ отпустить.

9.2.3.5. Удерживая курсор на изображении индикатора  $S_x$ , щелкнуть ПКМ.

9.2.3.6. Щелкнуть по иконке “опускания” изображения элемента. (Альтернатива 9.2.3.5 и 9.2.3.6 – “Пробел”).

9.2.4. Переместить изображения индикатора  $V_x$ , моделей масс  $M_x$ ,  $M_y$ , силы тяжести  $F_y$ .

9.2.4.1. Выделить, удерживая нажатой ЛКМ, участок поля схемы содержащий элементы  $V_x$ ,

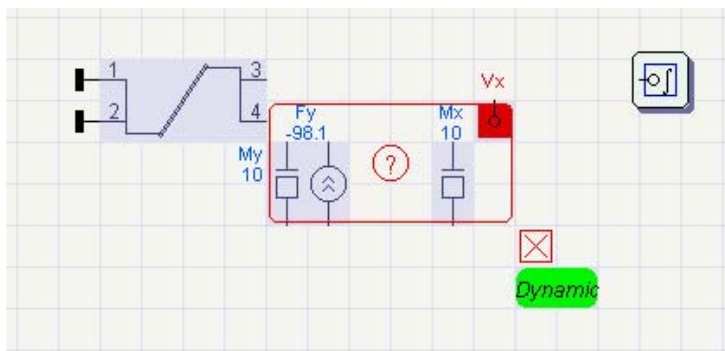


Рис. 1.20

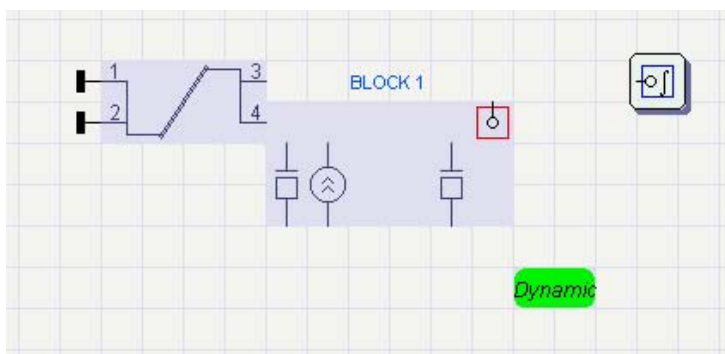


Рис. 1.21

9.2.3.1 Удерживать курсор на изображении индикатора  $S_x$  так, чтобы у него появилась рамка.

9.2.3.2. Вызвать контекстное меню, для чего щелкнуть правой кнопкой мыши.

9.2.3.3. Щелкнуть по иконке “поднятия” изображения элемента. (Альтернатива

9.2.4.1)  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $F_y$ . Отпустить ЛКМ (рис.1.20)

9.2.4.2. Установить курсор на выделенном участке, щелкнуть (рис. 1.21), нажать клавишу “Пробел”. Выделенная часть схемы оказывается “поднятой”

9.2.4.3. Установить курсор на “поднятую” часть схемы, нажать ЛКМ и, удерживая её нажатой, перетащить мышью часть схемы на три ячейки сетки поля вправо, нажать клавишу “Пробел”, щелкнуть (рис. 1.22).

9.3. Восстановить связи моделей (см. п. 2.1) и соединения моделей их полюсами с

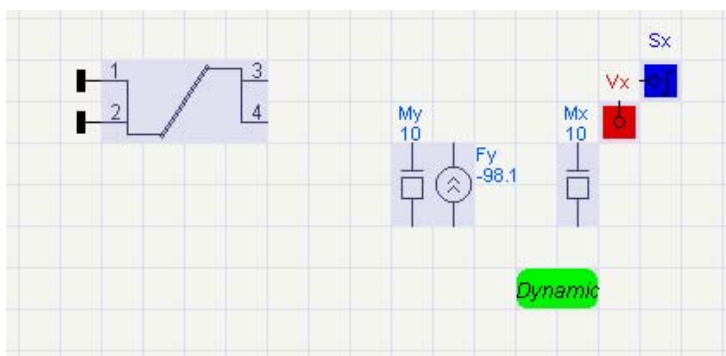


Рис. 1.22

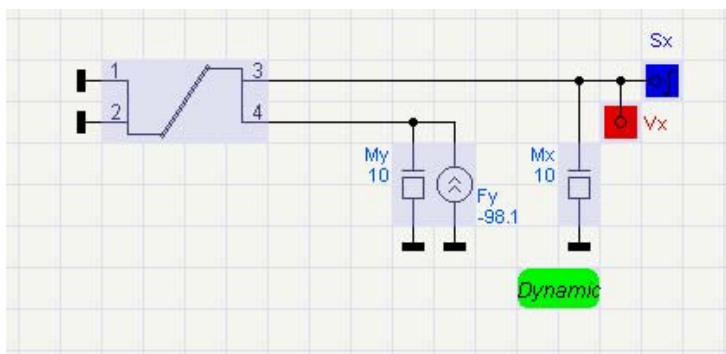


Рис. 1.23

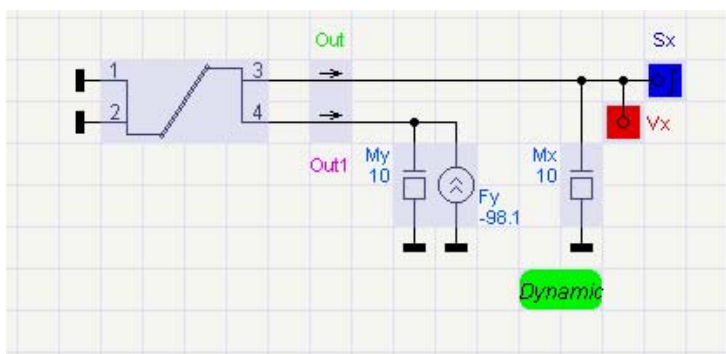


Рис. 1.24

базовым узлом (см. п. 2.1.4), как показано на рис. 1.23. Процедуры по п.п. 9.2, 9.3 могут быть выполнены проще. Для этого действия по п.п. 9.2.4.1 – 9.2.4.3. следует выполнить, относя к объекту перемещения часть поля схемы, содержащую все перемещаемые элементы.

9.4. Установить индикаторы

9.4.1. Установить индикаторы “Поток” (см. п. 2.2) в разрывах связей третьего и четвертого полюсов модели “STRGN2” с прочими элементами (рис. 1.24). Удалять дублирующее изображение индикатора (п. 2.2.1.3) следует после установки обоих индикаторов. Индикатор, установленный в разрыве верхней связи т.е. связи, соответствующей координате “x” груза, предназначен для вывода горизонтальной составляющей силы взаимодействия груза и стрессня маятника. Индикатор, установленный в разрыве ниж-

ней связи, т.е. связи, соответствующей координате “y” груза, предназначен для вывода вертикальной составляющей силы взаимодействия груза и стрессня маятника.

9.4.2. Назначить атрибуты установленных индикаторов.

9.4.2.1. Щелкнуть по изображению верхнего введенного индикатора на схеме.

9.4.2.2. Удалить флажки в полях “Автокорректировка пределов” и “Идеальный”. Заменить имеющийся идентификатор на идентификатор Rx. Ввести значения: верхнего предела равное 20, нижнего предела равное –20.

9.4.4. Установить цвет линии графика. Установить флажок в поле “Включен” (см. п. 2.2.1.5.3.), ОК.

9.4.5. Щелкнуть по изображению нижнего введенного индикатора на схеме.

9.4.6. Удалить флажки в полях “Автокорректировка пределов”, “Идеальный”. Заменить имеющийся идентификатор на идентификатор  $P_y$ . Ввести значения: верхнего предела равно 100, нижнего предела равно 90.

9.4.7. Установить цвет линии графика. Установить флажок в поле “Включен”, ОК.

9.5. Установить индикаторы вертикальной составляющей скорости (п. 2.2.1) и вертикального перемещения (п. 2.2.2) груза маятника, как показано на рис. 1.25.

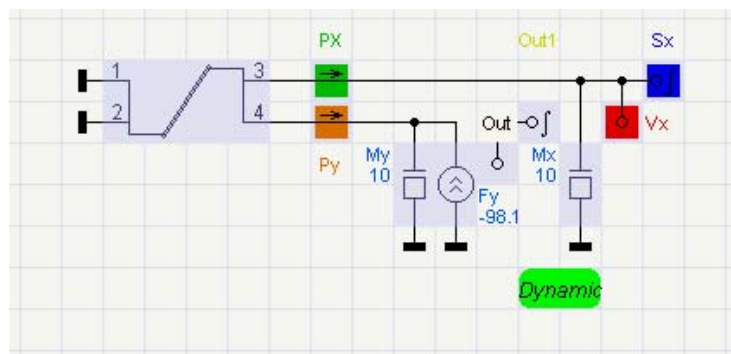


Рис. 1.25

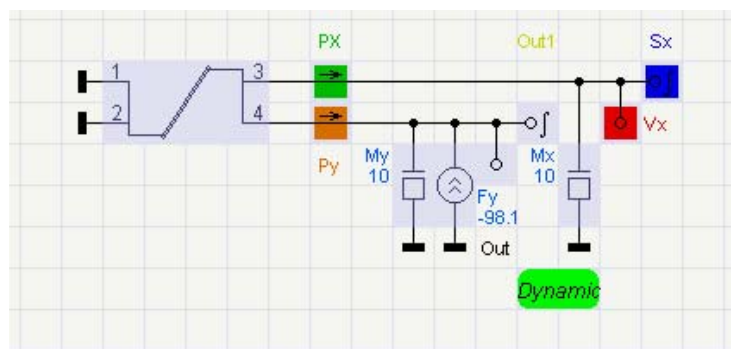


Рис. 1.26

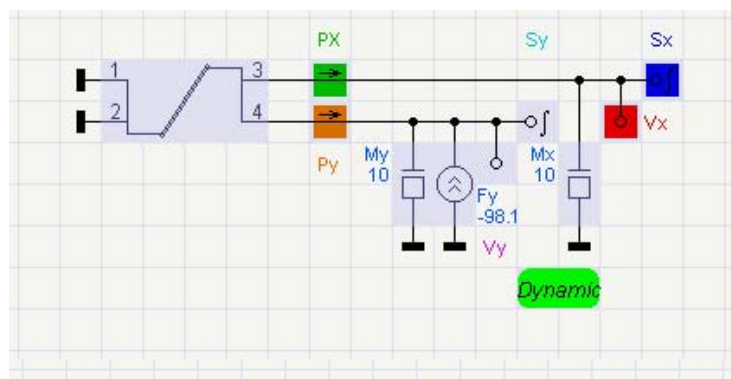


Рис. 1.27

9.6. Соединить установленные индикаторы с узлом схемы, соответствующим вертикальной координате перемещения груза маятника (п.п. 2.2.1.4, 2.2.2.3.), как показано на рис. 1.26.

9.7. Назначить атрибуты индикаторов (см. п. 2.2.1.5.).

9.7.1. В индикаторе “Потенциал” заменить имеющийся идентификатор на идентификатор  $V_y$ , удалить флажок в поле “Автокорректировка пределов”, указать верхний и нижний пределы “0.02” и “- 0.02”, установить цвет линии графика. Флажок в поле “Включен” не устанавливать

9.7.2. В индикаторе “Интеграл потенциала” заменить имеющийся идентификатор на идентификатор  $S_y$ , удалить флажок в поле “Автокорректировка пределов”, указать верхний и нижний пределы “0.” и “-0.01”, установить цвет линии графика. Флажок в поле “Включен” не устанавливать (рис. 1.27).

9.8. Ввести параметры управления процессом моделиро-

вания и выполнить моделирование.

9.8.1. Щелкнуть ЛКМ по изображению оператора Dynamic.

9.8.2. Установить метод интегрирования “Euler”.

9.8.3. Установить значения параметров:  $S_{mn} = 1.e-9$ ,  $S_{mx} = 1.e-4$ ,  $S_{st} = 1.e-7$ .

9.8.4. Установить время интегрирования 5с, ОК.

9.8.5. Выбрать: “Команды” (главное меню), “Выполнить задание”.

10. Проанализировать и оценить полученные результаты.

*Получаемые результаты моделирования показаны на рис. 1.25. Для удобства анализа можно “развернуть” часть полученного графика. Для этого нужно переместить курсор в левый верхний угол левой верхней ячейки “разворачиваемой” части графика, нажать ЛКМ, переместить курсор в правый нижний угол правой нижней ячейки разворачиваемой части графика (при этом разворачиваемая часть графика окрашивается в желтый цвет) и отпустить ЛКМ. Возврат в исходный режим можно осуществить, щелкнув по полю “Work”.*

10.1. Осуществить ввод и удаление графиков.

10.1.1. В окне результатов щелкнуть “Вид” (главное меню), “Атрибуты графиков” (альтернатива – щелкнуть по одному из полей значений величин графиков на верхней и нижней осях; в данном случае верхнее поле содержит числа “20,100,1,0”, нижнее – “-20,90,-1,-0.2”). Удалить флажки в полях графиков  $P_x$ ,  $P_y$  колонки “Вкл.”, ОК. Удаление графиков, не представляющих интерес, целесообразно осуществлять в связи с трудностями восприятия чрезмерно большого количества информации или по другим причинам.

10.1.2. Повторить действия по п. 10.1.1, установив в открывшемся окне “Dynamic (Атрибуты графиков)” флажки в полях  $V_y$ ,  $S_y$  колонки “Вкл.”, ОК

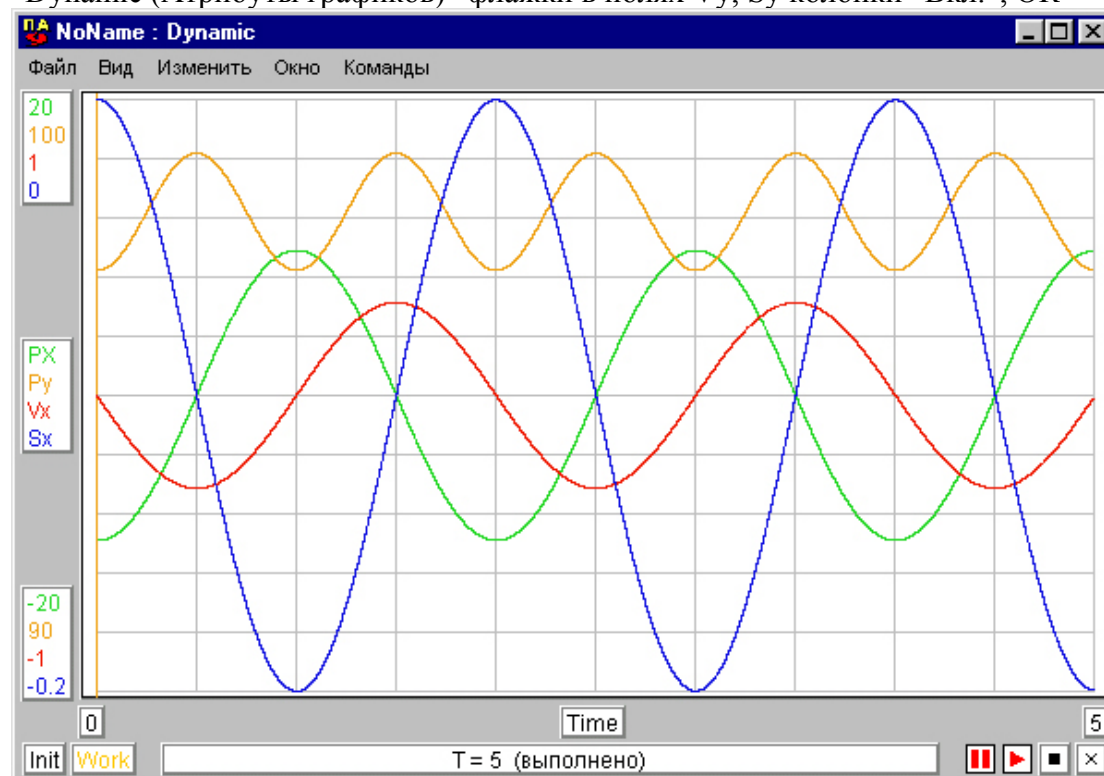


Рис. 1.25

## Задача 2. Моделирование маятника в условиях наличия трения в опоре.

В предыдущей задаче моделировалась работа идеального маятника, в котором отсутствовали энергетические потери. При этом амплитуда колебаний маятника, как это было видно по результатам моделирования, оставалась постоянной. Работа реальных устройств, например, маятника механических часов, сопровождается потерями энергии при работе. Энергетические потери в таком маятнике имеют место за счет трения в его опоре. Работу опоры с трением можно воспроизвести с помощью модели шарнира “SHARN2” (см. документ “Моделирование кузнечно-штамповочного оборудования средствами программного комплекса анализа динамических систем ПА9”), которая имеет полюса, соответствующие координате угловых перемещений элементов шарнира. Фазовыми переменными в этих полюсах будут моменты трения. Модель шарнира по этой координате должна взаимодействовать со стержнем маятника. Поэтому модель, воспроизводящая свойства стержневого элемента так же должна иметь полюса, соответствующие угловым перемещениям его концов. Такой моделью является модель сжимаемого (растяжимого) и изгибаемого стержневого элемента “BALKA2” (см. документ “Моделирование кузнечно-штамповочного оборудования средствами программного комплекса анализа динамических систем ПА9”).

Для решения задачи необходимо выполнить следующие действия.

1. Создать топологию маятника в соответствии с рис. 2.1, обращаясь: “Окно” (главное меню окна графического редактора), “Механика”. На ней первые три полюса модели шарнира “SHARN2”, соответствующие неподвижному (например, внешнему) элементу шарнира, соединяются с базовым узлом, представляющим собой систему отсчета. Три остальных полюса, соответствующие линейным координатам “ $x$ ”, “ $y$ ” и вращательной координате “ $\phi$ ” движения подвижного (внутреннего) элемента шарнира, соединяются с тремя

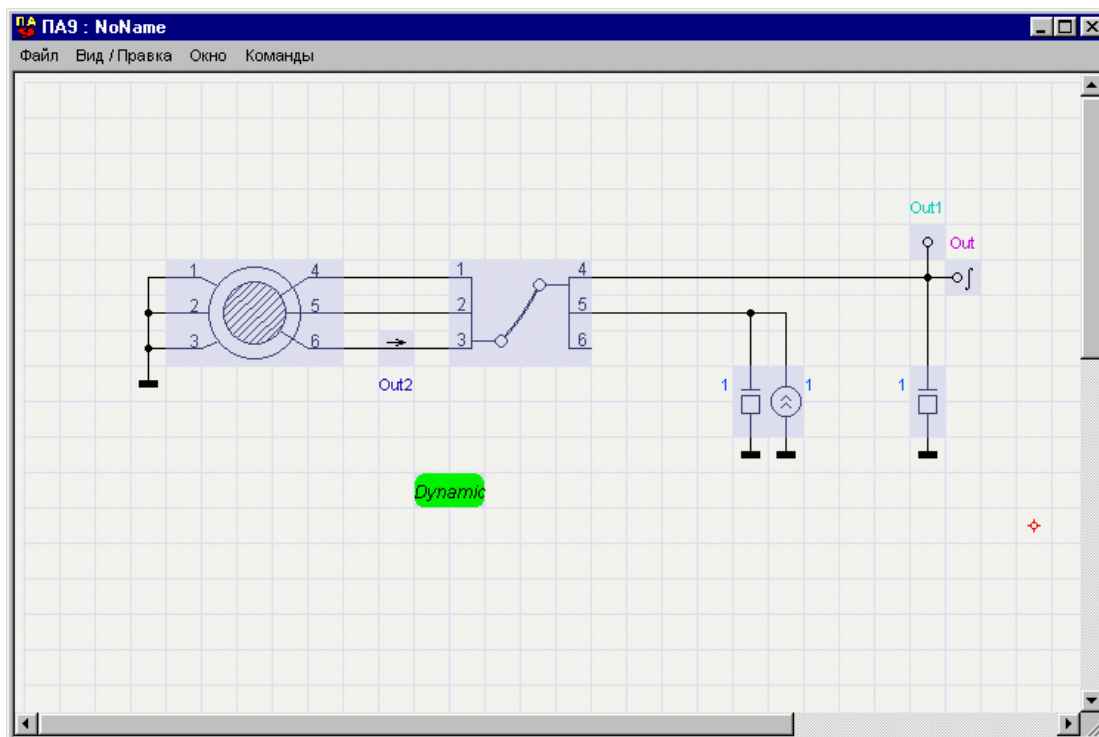


Рис. 2.1



соответствующими полюсами модели стержня "BALKA2". Эти три полюса соответствуют концу стержня маятника, прикрепленному к подвижному элементу шарнира. Два следующие полюса модели стержня (четвертый и пятый), как и в задаче №1, соединяются с моделями массы и силы тяжести. Шестой полюс, соответствующий вращательной координате движения конца стержня, к которому прикреплен груз остается свободным. Индикаторы Out, Out1 те же, что и в задаче №1. Индикатор потока, включенный в разрыв связи моделей шарнира и стержня (Out2), предназначен для вывода фазовой переменной типа потока в этой связи. Так как эта связь соответствует общей для подвижного элемента шарнира и прикрепленного к нему конца стержня вращательной координате, фазовая переменная типа потока будет представлять момент сил, в данном случае – момент сил трения.

При создании связей следует иметь в виду, что перемещение курсора при нажатой клавише Ctrl (см. п. 2.1.5) создает соединение пересекающихся связей (в месте соединения появляется точка). При этом во всех соединенных связях будет действовать общая ФП типа потенциала. Перемещение курсора при нажатой клавише Shift не создает соединения пересекающихся связей. При этом в каждой из пересекающихся связей будут действовать различные ФП типа потенциала.

2. Назначить атрибуты индикаторов, включая цвет кривых графиков. В индикаторах Out, Out1 и Out2 заменить идентификаторы на Mt, Vx и Sx, соответственно. Для индикаторов Vx и Sx пределы не указывать, установить флажки в полях "Автокорректировка пределов" и "Включен". В индикаторе Sx начальное значение установить равным 0,1. Для индикатора Mt указать пределы 2.5 и -2.5. Установить флажок в поле "Включен". В поле "Автокорректировка пределов" флажок убрать.

3. Ввести параметры моделей.

Для модели шарнира "SHARN2":  $D = 0.1$ ,  $B = 0.1$ ,  $Z = 0$ ,  $KTR = 0.1$ ,  $E1 = 2.e11$ ,  $E2 = 2.e11$ ,  $M1 = 0.001$ ,  $J1 = 0.0001$ ,  $M2 = 0.001$ ,  $J2 = 0.0001$ ,  $TIAG = 1$ .

Для модели стержневого элемента "BALKA2":  $DLTX = 0.1$ ,  $DLTY = -0.99$ ,  $F = 1$ ,  $JX = 1.e-5$ ,  $E = 2.e11$ ,  $M = 0$ ,  $J = 0$ ,  $LC = 0.5$ ,  $TIAG = 1$ .

Параметры массы груза и источника силы тяжести назначить такими же, как и в задаче №1.

4. Ввести параметры управления процессом моделирования. Установить Метод интегрирования - "Euler". Время интегрирования - 20с.  $Smn = 1.e-9$ ,  $Sst = 1.e-7$ ,  $Smx = 1.e-4$ .

5. Выполнить моделирование. Проанализировать полученные результаты. Убедиться в наличии затухания колебательного процесса. Результаты не удалять до выполнения задачи.

6. Изменить значение коэффициента трения в модели шарнира "SHARN2", введя  $KTR = 0.2$ , а затем –  $KTR = 0.5$ .

7. Выполнить моделирование. Проанализировать полученные результаты. Убедиться в увеличении затухания колебательного процесса с увеличением коэффициента трения.

8. Изменить значение зазора в модели шарнира "SHARN2", введя  $Z = 0.01$ , вернуть значение коэффициента трения  $KTR = 0.1$ .

9. Выполнить моделирование. Проанализировать полученные результаты. Открыть окно "Атрибуты графиков" (п. 10.1.1). Установить флажок в поле

колонки “Авто” для графика Mt, ОК. Развернуть первую во времени ячейку графика. Проанализировать полученные результаты.

### Задача 3. Моделирование шарнирного четырехзвенника.

Целями решения задачи являются дальнейшее знакомство с возможностями моделирования с помощью ПК ПА9 и их освоение. Схема четырехзвенника с необходимыми размерами показана на рис. 3.1. Частота вращения ведущего звена 1 – 1 об/с (6,28 1/с). Исходное положение задается положением шарниров ABCD. Крайние положения –  $AB'C'D$  и  $AB''C''D$ .

Для решения задачи необходимо выполнить следующие действия.

1. Запустить комплекс ПА9.

2. Создать топологию четырехзвенника. *Целесообразно перейти в полноэкранный режим. Изменять размер изображения топологии можно нажатием (возможно неоднократно) клавиши “-” и “+” в правой группе клавиш клавиатуры. Изменение размеров рабочего поля выполняется выбором: “Вид / правка” (главное меню) “Изменить размер рабочего поля...”.*

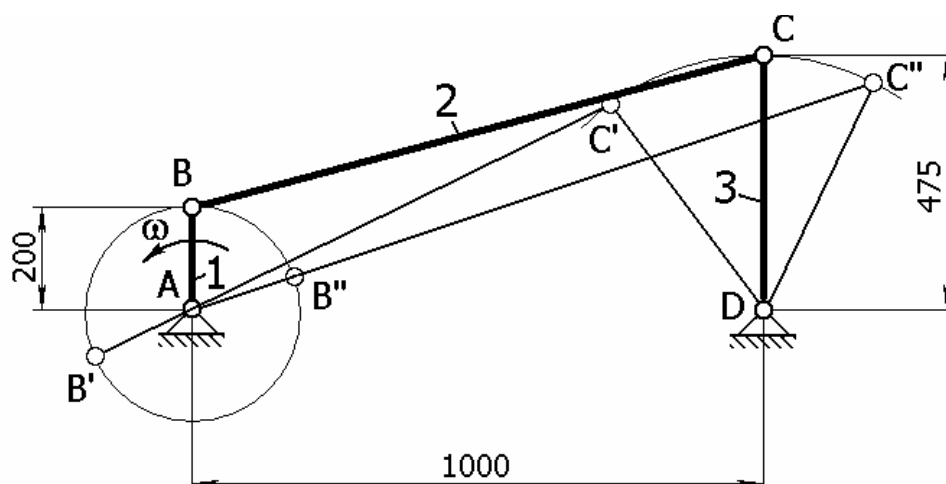


Рис. 3.1

2.1. Разместить на поле схемы изображения трех моделей сжимаемого (растяжимого) и изгибаемого стержневого элемента “BALKA2”, как показано на рис. 3.2. Моделями в составе модели четырехзвенника будут воспроизводиться свойства элементов 1, 2, 3 (рис. 3.1).

2.2. Разместить на поле схемы изображения четырех моделей шарнира “SHARN2”. Моделями в составе модели четырехзвенника будут воспроизводиться свойства элементов A, B, C, D (рис. 3.1).

2.2.1. Разместить на поле схемы графические образы модели шарнира “SHARN2”, как показано на рис. 3.3.

2.2.2. Разместить на поле схемы графические образы двух моделей шарнира “SHARN2” путем несвязного копирования. Параметры всех моделей, установленных в поле схемы путем несвязного копирования, будут одинаковыми, но впоследствии могут назначаться независимо.

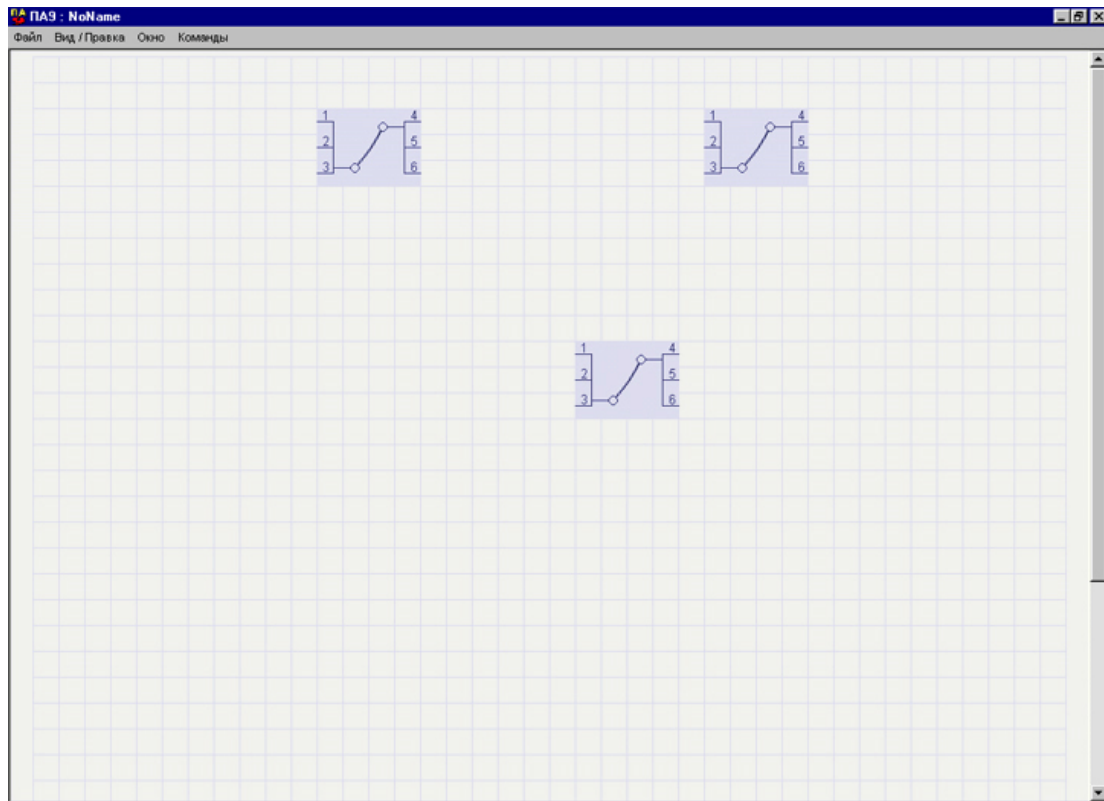


Рис. 3.2

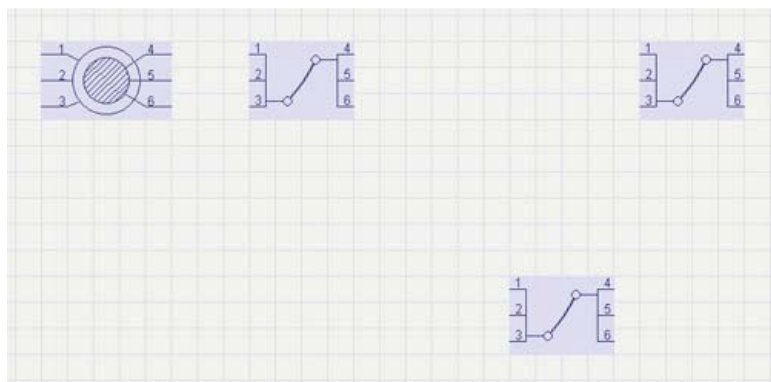


Рис. 3.3

2.2.2.1. Вызвать контекстное меню, как в п.п. 9.2.3.1, 9.2.3.2. задачи №1, для чего щелкнуть ПКМ по имеющемуся на схеме графическому образу модели шарнира “SHARN2”.

2.2.2.2. Щелкнуть по второй иконке раздела под заголовком “Клавиша:” контекстного меню.

2.2.2.3. Курсором при нажатой ЛКМ переместить связную копию модели в положение, показанное на рис. 3.4.

2.2.2.4. Щелкнуть ПКМ по перемещенной копии модели “SHARN2”. Переориентировать графический образ, щелкнув по значку “↔”. Щелкнуть по четвертой иконке раздела под заголовком “Клавиша:” контекстного меню. *Перео-*

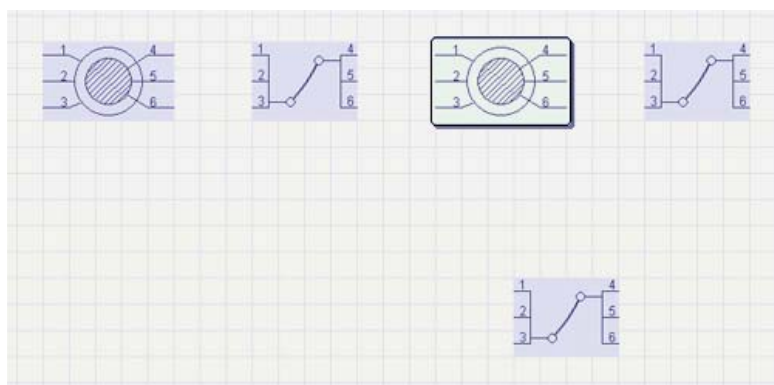


Рис. 3.4

риентация графического образа связана с необходимостью учёта того, каким элементом (внутренним или внешним) соответствующий шарнир соединен со смежными стержневыми элементами.

2.2.2.5. Повторить действия по п.п. 2.3.2.1.- 2.3.2.4. в отношении графического образа второй копируемой модели шарнира “SHARN2” (рис. 3.5).

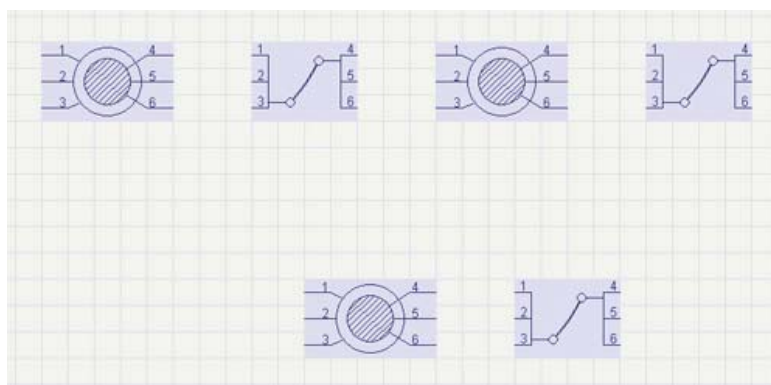


Рис. 3.5

2.2.3. Выполнить связанное копирование четвертой модели шарнира “SHARN2”. Установка моделей путем связанного копирования имеет смысл, если эти модели всегда имеют одинаковые параметры. Изменение любого параметра в любой из этих моделей приведет к соответствующему изменению этого параметра для всех остальных моделей. Назначение общих для всех этих моделей параметров может быть осуществлено в любой модели из числа моделей, установленных связным копированием.

2.2.3.1. Вызвать контекстное меню, для чего щелкнув ПКМ по имеющемуся на схеме графическому образу первоначально установленной модели шарнира “SHARN2”.

2.2.3.2. Щелкнуть по третьей иконке раздела под заголовком “Клавиша:” контекстного меню.

2.2.3.3. Курсором при нажатой ЛКМ переместить связанную копию графического образа модели, переориентировать ее и “опустить ” его (п. 2.2.2.4), как показано на рис. 3.6.

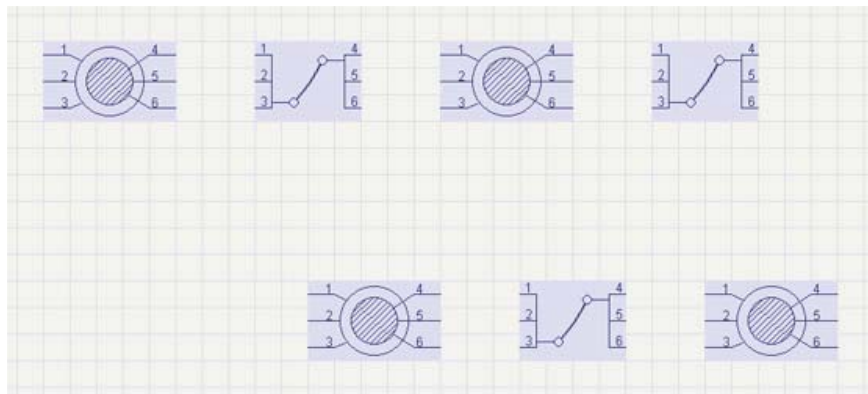


Рис. 3.6

2.3. Выполнить соединения моделей их полюсами, включая и соединения полюсов с базовым узлом, как показано на рис. 3.7. В соответствии со схемой механизма (см. рис. 3.1) три подвижных звена, неподвижное звено (система отсчета) и четыре шарнира соединены “цепочкой” (последовательно), образуя замкнутый контур. Поэтому на рис. 3.7 модели соединены также последовательно. Каждое соединение выполнено для полюсов, соответствующих одной координате пространства: верхний ряд связей – координате “ $x$ ”, средний ряд – координате “ $y$ ”, нижний ряд – координате “ $\phi$ ” (см. документ “Моделирование кузнечно-штамповочного оборудования средствами программного комплекса анализа динамических систем ПА9”, описания моделей “BALKA2” и “SHARN2”). Соединение крайних (по схеме) моделей шарниров тремя полюсами каждой из них с базовым узлом соответствует неподвижности по всем трем координатам элементов соответствующих шарниров.

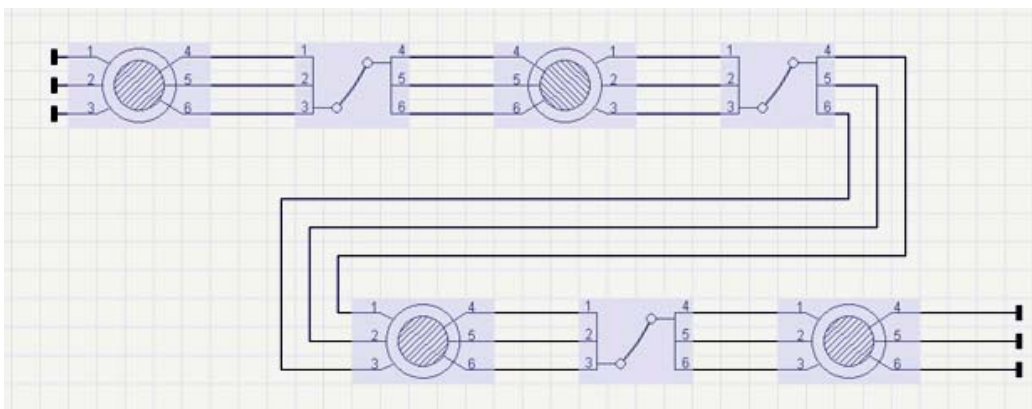


Рис. 3.7

2.4. Установить на поле схемы изображение модели источника скорости.

2.4.1. Выбрать: “Окно” (главное меню), “Образцы компонентов”, “Механика”. Щелкнуть по графическому образу модели “Управляемый источник скорости...VU”, разместить его на схеме и присоединить, как показано на рис. 3.7. Модель является источником ФП типа потенциала. Ее присоединение к узлу, соединения шестого полюса модели шарнира А и модели стержня 1 (см. рис.

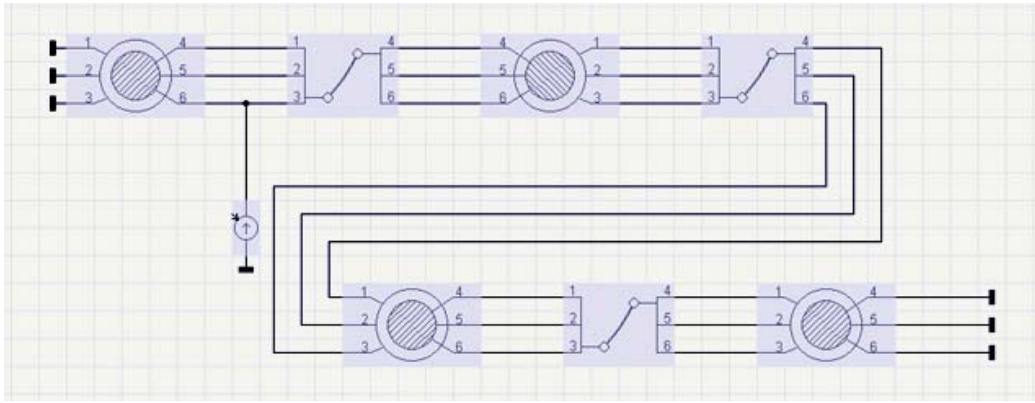


Рис. 3.8

3.1) означает сообщение скорости внутреннему элементу шарнира и присоединенного к нему конца стержневого элемента. Так как указанный узел представляет вращательную координату, сообщаемая им скорость будет угловой.

2.4.2. Выбрать: “Окно”, (главное меню), “Образцы компонентов”, “Функции”. Щелкнуть по графическому образу компонента “Трапецеадальный” в разделе “Источники сигналов”, разместить его на схеме и присоединить, как показано на рис. 3.9. Установленный таким образом источник сигнала будет задавать изменение угловой скорости стержня 1 (см. рис. 3.1) по трапецеидальному закону. При этом скорость будет иметь период нарастания от нулевого до конечного значения. Последнее необходимо в связи с тем, что сообщение конечной скорости без периода нарастания (мгновенное увеличение скорости) приведет к появлению бесконечно больших ускорения и сил инерции, что может создать трудности вычислительного характера.

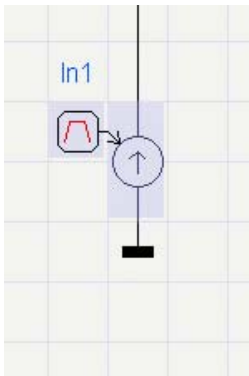


Рис. 3.9

2.5. Назначить атрибуты моделей.

2.5.1. Назначить атрибуты моделей шарниров.

2.5.1.1. Назначить идентификаторы моделей шарниров в порядке их следования (см. рис. 3.1): А, В, С, D.

2.5.1.2. Назначить параметры модели шарнира А:  $D = 0.02$ ,  $B = 0.02$ ,  $Z = 0.$ ,  $KTP = 0.1$ ,  $E1 = E2 = 2.e11$ ,  $M1 = M2 = 2.$ ,  $J1 = J2 = 0.002$ ,  $TIAG = 1$ . Ввиду того, что модель шарнира D была установлена связным копированием (см. п. 2.2.3), параметры этого шарнира оказываются заданными такими же, что и параметры шарнира А, в чем можно убедиться их просмотром.

2.5.1.3. Назначить параметры модели шарнира В:  $D = 0.012$ ,  $B = 0.01$ ,  $Z = 0.$ ,  $KTP = 0.1$ ,  $E1 = E2 = 2.e11$ ,  $M1 = M2 = 1.$ ,  $J1 = J2 = 0.001$ ,  $TIAG = 1$ ; шарнира С:  $D = 0.01$ ,  $B = 0.008$ ,  $Z = 0.$ ,  $KTP = 0.1$ ,  $E1 = E2 = 2.e11$ ,  $M1 = M2 = 1.$ ,  $J1 = J2 = 0.001$ ,  $TIAG = 1$ .

2.5.2. Назначить атрибуты моделей “BALKA2”. Для элемента 1 (рис. 3.1): Идентификатор – В1,  $DLTX = 0$ ,  $DLTY = 0.2$ ,  $F = 1.e-3$ ,  $JX = 1.e-5$ ,  $E = 1.e11$ ,  $M = 1$ ,  $J = 0.003$ ,  $LC = 0.1$ ,  $TIAG = 1$ . Для элемента 2: Идентификатор – В2,  $DLTX = 1.$ ,  $DLTY = 0.275$ ,  $F = 1.e-3$ ,  $JX = 1.e-5$ ,  $E = 1.e11$ ,  $M = 3$ ,  $J = 0.03$ ,  $LC = 0.515$ ,  $TIAG = 1$ . Для элемента 3: Идентификатор – В3,  $DLTX = 0.$ ,  $DLTY = -0.475$ ,  $F = 1.e-3$ ,  $I = 1.e-5$ ,  $E = 1.e11$ ,  $M = 1$ ,  $J = 0.003$ ,  $LC = 0.2375$ ,  $TIAG = 1$ . Назначаемые размерные параметры соответствуют положению механизма, показанному на рис. 3.1.

2.5.3. Назначить атрибуты моделей, задающих движение в четырехзвеннике.

2.5.3.1. Назначить атрибуты модели источника угловой скорости. Назначить идентификатор модели W1. Установить флажок в поле Ri. В открывшемся поле установить значение  $Ri = 0.0001$ . Остальные параметры оставить без изменения. *Назначение параметра "Ri" определяется особенностями моделируемого объекта, требует знаний особенностей применяемых в комплексе вычислительных методов [1] и здесь не обсуждается.*

2.5.3.2. Назначить атрибуты трапецеидального источника сигнала: "Начальная задержка" – 0., "Период повтора" – 0., "Пассивный уровень" – 0., "Активный уровень" – 6.28, "Длительность переднего фронта" – 0.01, "Длительность вершины" – 1000., "Длительность заднего фронта" – 0.01. Идентификатор – "Трап".

3. Установить индикаторы.

3.1. Установить индикаторы в соответствии с рис. 3.10. Назначить атрибуты индикаторов. Установить флажки-галочки в полях "Включен" и "Автокорректировка пределов". Назначить идентификаторы: для индикаторов "Интеграл потенциала" и "Потенциал", подключенных к полюсам моделей A и B1 – F11 и W1, соответственно, для индикаторов "Интеграл потенциала" и "Потенциал", подключенных к полюсам моделей B3 и D – F13 и W3, соответственно. Назначить цвета графиков.

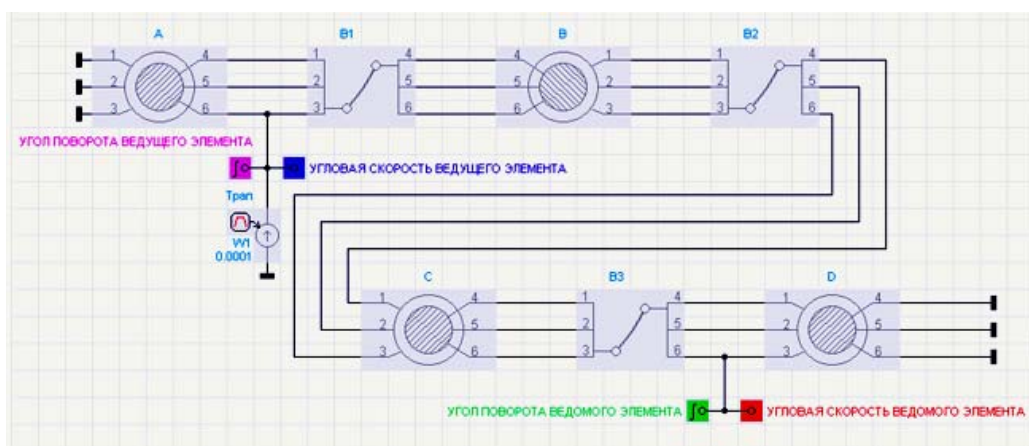


Рис. 3.10

4. Выполнить моделирование шарнирного четырехзвенника (см. п. 4 задачи №1). Метод интегрирования - "Euler", время интегрирования - 2 (с),  $S_{mn} = 1.e-9$ ,  $S_{st} = 1.e-5$ ,  $S_{mx} = 1.e-3$ ,  $Dli = 1.$ ,  $Dlu = 0.1$ .

5. Проанализировать полученные результаты. *Получаемые результаты моделирования показаны на рис. 3.11.*

6. Сделать копию составленной схемы.

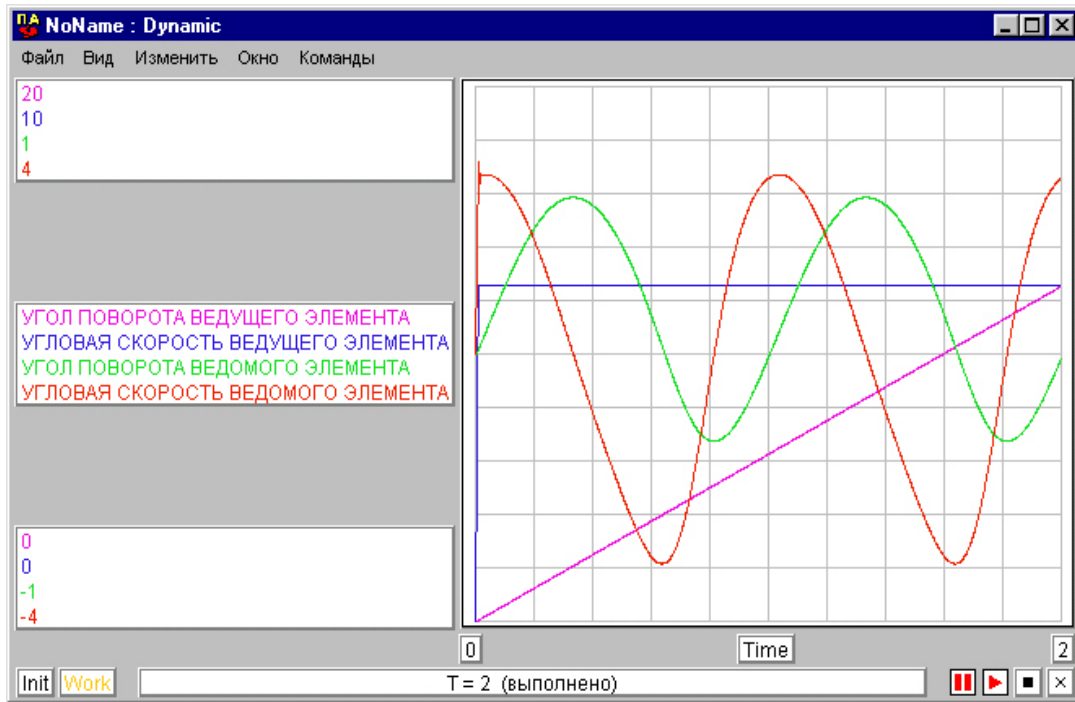


Рис. 3.11

7. В копии схемы внести изменения: параметр DLTX модели В2, установить равным 1.375; параметр DLTX модели В3, установить равным  $-0.375$ . Измененная модель соответствует четырехзвеннику, показанному на рис. 3.12. Его особенностью является близость крайнего его положения ( $AB''C''D$ ) к предельному, за которым ведущее звено не может совершить полный оборот. В этом случае работа механизма характеризуется наличием периодов, когда переменные (скорость, перемещение) имеют изменения с повышенной интенсивностью.

8. Выполнить моделирование.

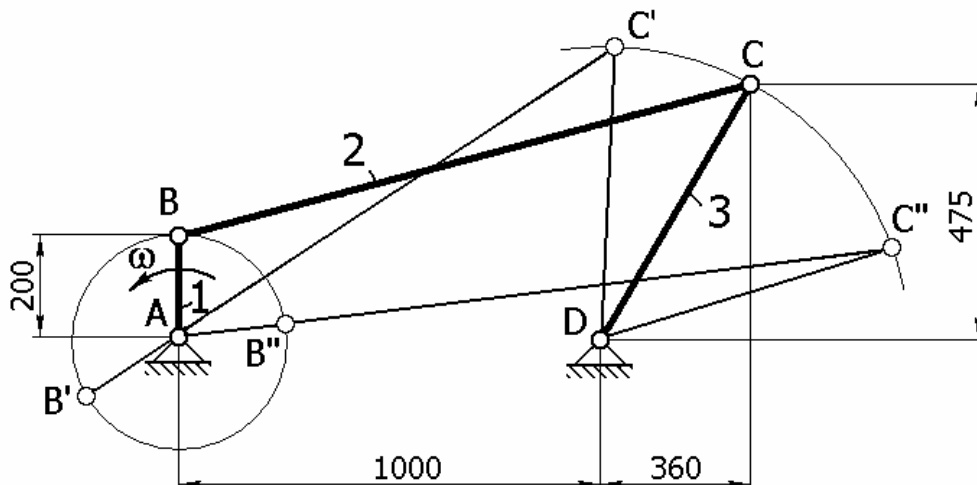


Рис. 3.12

9. Проанализировать полученные результаты. Получаемые результаты моделирования показаны на рис. 3.13. Следует обратить внимание на харак-



терные отличия полученных результатов от приведенных на рис. 3.10, заключающиеся в наличии участков графиков с повышенной интенсивностью изменения перемещения и скорости звена 3, в наличии заметных динамических процессов. Это является следствием близости крайнего положения механизма АВ"С"D к предельному, что определяется принятыми размерами четырехзвенника (см. рис. 3.12).

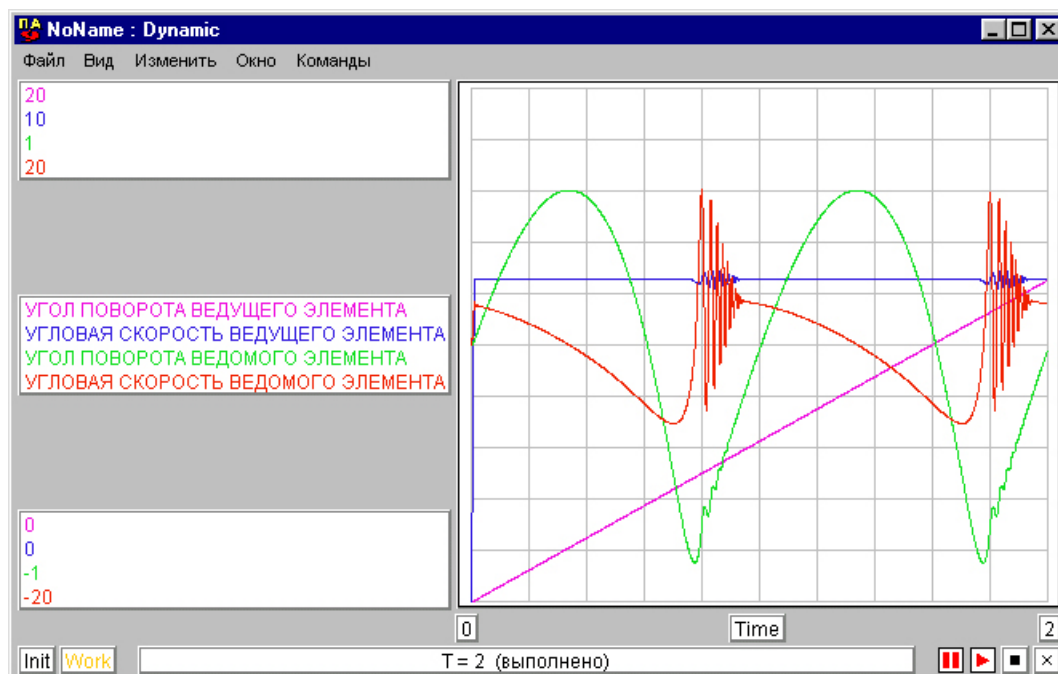


Рис. 3.13

10. В первоначальном варианте схемы (п. 4) установить дополнительные индикаторы в соответствии с рис. 3.14.

10.1 Установить индикатор потока. С помощью индикатора будет выводиться момент трения в шарнире D.

10.2. Назначить атрибуты индикатора потока. Установить флажок в поле “Включен”. Ввести идентификатор индикатора “МОМЕНТ ТРЕНИЯ В ШАРНИРЕ ‘D’”. Удалить флажок в поле “Автоматическая корректировка пределов”. Назначить значения верхнего и нижнего пределов “1.” И “-1.0”. Назначить цвет графика. Удалить флажок в поле “Идеальный”, сохранив значение параметра “Rint” в открывшемся окне. Назначение параметра “Rint” определяется особенностями моделируемого объекта, требует знаний применяемых в комплексе вычислительных методов [1] и здесь не обсуждается.

10.3. Установить универсальный индикатор как показано на рис. 3.14, для чего выбрать: С помощью универсального индикатора могут быть выведены не только ФП, но и так называемые расчетные переменные моделей. Последние не являются фазовыми переменными, но вычисляются через них в моделях и могут представлять интерес для пользователя. В нашем случае с помощью универсального индикатора предлагается осуществить вывод радиальной силы в первом шарнире. Оно может быть определено через проекции радиальной силы в шарнире на координатные оси, которые являются ФП типа потока в 1 и 2 (3 и 4) полюсах модели шарнира, путем извлечения квадратного

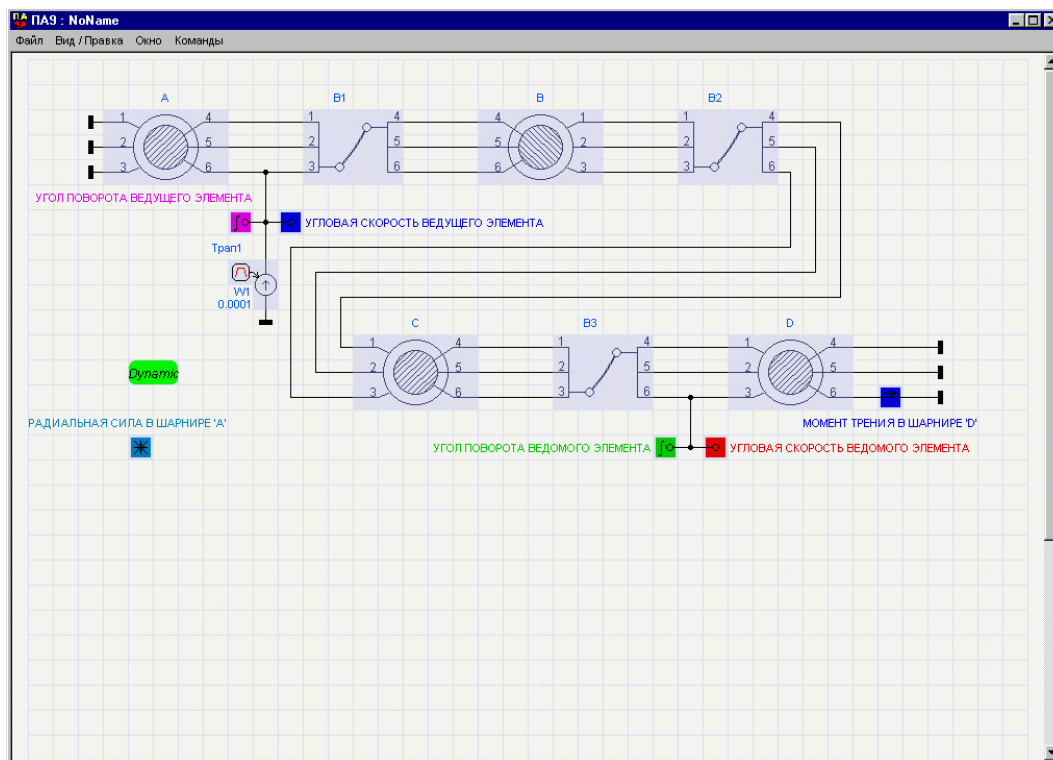


Рис. 3.14

корня из суммы квадратов этих ФП. Величина радиальной силы представляет интерес, поскольку используется при расчете шарниров на прочность и износ. Определение его вручную по результатам вывода проекций радиальной силы трудоемко, поскольку момент максимума ее во времени неизвестен, а, потому, требует вычислений большого числа ее значений.

10.4. Назначить атрибуты универсального индикатора. Установить флажок в поле “Включен”. Ввести идентификатор индикатора “РАДИАЛЬНАЯ СИЛА В ШАРНИРЕ ‘А’”. Удалить флажок в поле “Автоматическая коррекция пределов”. Назначить верхний и нижний пределы  $1.e3$  и  $-1.e3$ . Выбрать цвет графика. В поле “Элемент” указать введенный идентификатор первого шарнира – А. В качестве типа переменной выбрать “Расчетная переменная”. Указать номер переменной – 2.

10.5. Выполнить моделирование. Метод интегрирования - “Euler”, время интегрирования - 2 (с),  $S_{mn} = 1.e-9$ ,  $S_{st} = 1.e-5$ ,  $S_{mx} = 1.e-4$ ,  $D_{li} = 1.$ ,  $D_{lu} = 0.1$ . Проанализировать полученные результаты. Полученные результаты сохранить для сравнения с последующими.

10.6. Выполнять моделирование, изменяя параметр КТР коэффициента трения в шарнирах и вводя значения 0.2, 0.5 и 0. Проанализировать полученные результаты. Сравнить полученные результаты с предыдущими.

10.7. Восстановить значение коэффициента трения  $KTR = 0.1$ . В любой модели шарнира, например, шарнире А ввести значение параметра зазора в шарнире  $Z = 0.006$ . Выполнить моделирование (рис. 3.15). Проанализировать

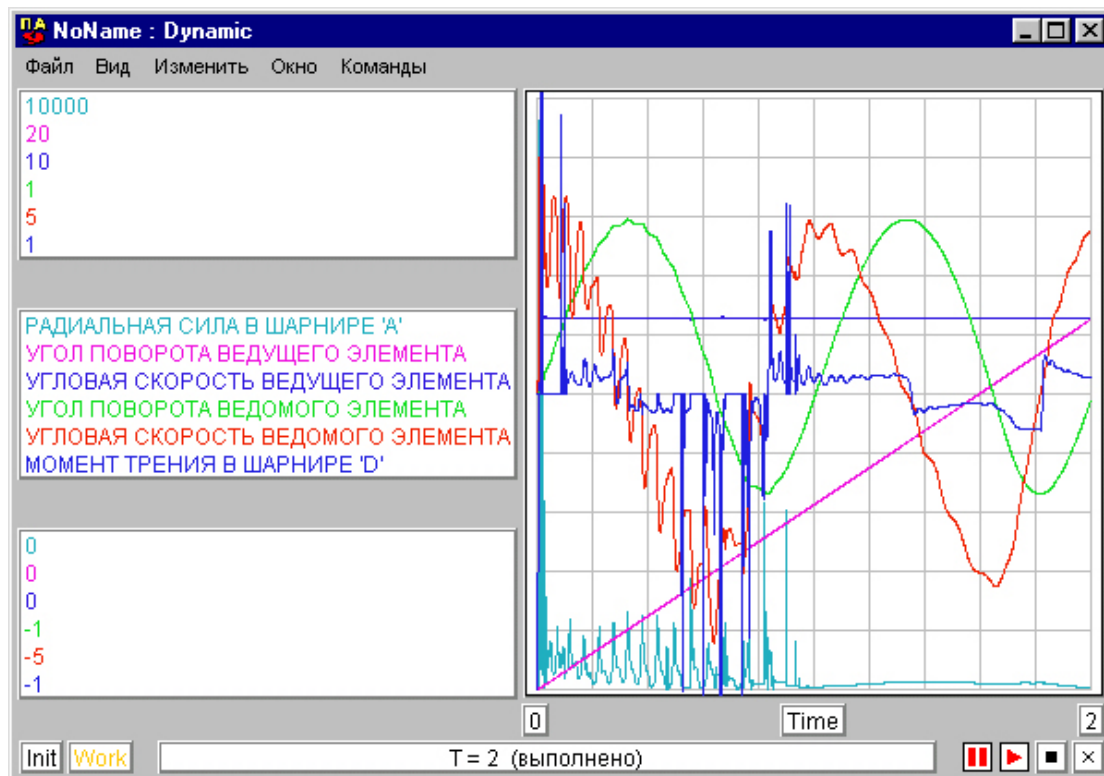


Рис. 3.15

полученные результаты. Сравнить полученные результаты с полученными в п. 10.5.

10.8. Установить нулевые зазоры в шарнирах. Устанавливать другие индикаторы потока в разрывы соединений моделей, выбирая места установки по своему усмотрению. Устанавливать другие индикаторы потенциала и интеграла потенциала, выбирая места установки по своему усмотрению. *Индикаторами потока будут выводиться горизонтальные, вертикальные силы или моменты в элементах механизма в зависимости от места установки индикатора. Индикаторами потенциала и интеграла потенциала будут выводиться горизонтальные, вертикальные или угловые скорости и перемещения элементов механизма в зависимости от места установки индикатора.*

#### Литература.

1. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем.- М.: Высшая школа, 1966. -504 с