

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Самарский государственный университет»

Механико-математический факультет

Учебное пособие

Геометрическая параметризация многозвенного механизма

К.А. Поляков

Содержание

Назначение параметризации	4
Параметризация функциями	5
Параметризация дизайн – переменными	8
Примеры параметризации частей механизмов.	14
Параметризация многозвенного механизма.	19
Приложение	27

Назначение параметризации

Параметризация многозвенного механизма заключается в определении положения и ориентации его звеньев как функций от угла наклона базового кривошипа φ . Параметризация модели позволяет избежать множества действий по изменению положения отдельных ее частей при изменении положения и (или) ориентации одного элемента. Правильно параметризованная модель при изменении угла φ меняет свое положение так, что точки, лежащие на фундаменте, остаются неподвижными и длина звеньев не изменяется.

Для примера рассмотрим следующую конструкцию (рис. 1).

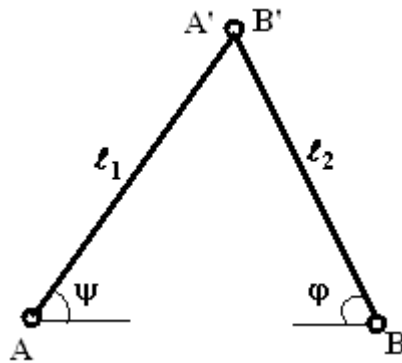


Рис. 1.

Пусть имеется конструкция, состоящая из 2х стержней, соединенных в верхней точке. По условию точки A и B могут менять свое расположение и при этом концы звеньев A' и B' должны оставаться соединенными. Для не параметризованной модели при изменении положения точки A и (или) B необходимо будет заново определить координаты точек A' и B' при условии сохранения длин отрезков, а так же изменить углы наклона звеньев, так что бы они соединились. Это достигается согласованным решением следующих уравнений

$$\sqrt{(X_{A'} - X_A)^2 + (Y_{A'} - Y_A)^2} = l_1; \sqrt{(X_{B'} - X_B)^2 + (Y_{B'} - Y_B)^2} = l_2; X_{A'} = X_{B'}; Y_{A'} = Y_{B'}. \quad (1)$$

В параметризованную модель уже заложены соотношения (1) и при изменении координат точек A и B положение точек A' и B' вычисляется автоматически.

При параметризации модели используются специальные средства: параметризирующие функции и дизайн – переменные.

Параметризация функциями

Параметризация функциями представляет собой замену статических характеристик объекта, которые определяются числами или дизайн-переменными, выражениями переменного результата, зависящими, например от координат других объектов или других параметров модели. Для использования функций параметризации необходимо в строке характеристики объекта, которую нужно параметризовать, нажать правую кнопку мыши и выбрать пункты **Parametrize – Expression Builder**. Раскроется окно конструктора функций (рис. 2)

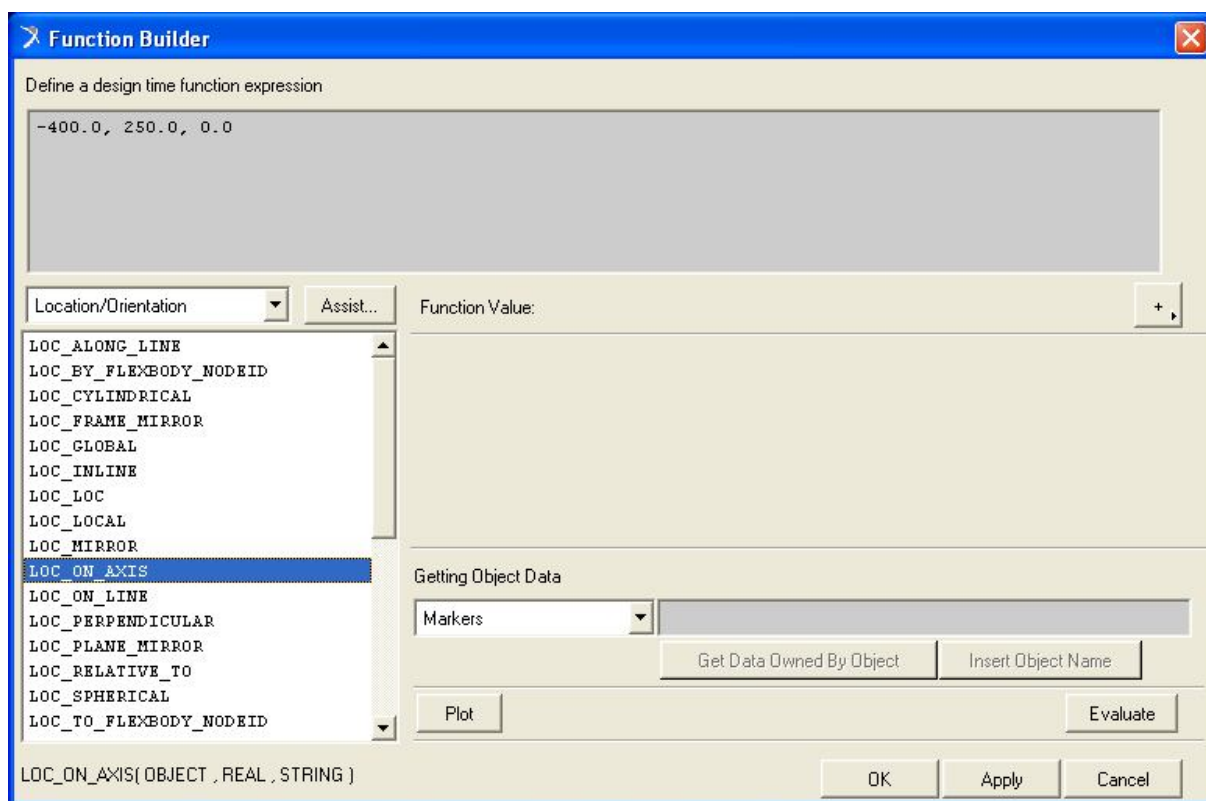


Рис. 2

В этом окне необходимо указать следующие параметры:

- группу функций, на рис. 2 выбрана группа, отвечающая за параметризацию положения и ориентации объектов (**Location/Orientation**).

- функцию из группы, на рис. 2 выбрана функция **LOC_ON_AXIS**. Полный вид выбранной функции отображается в нижней части окна. При двойном щелчке левой кнопки мыши на выбранной функции, строка с ее названием и обобщенными аргументами появляется в окне редактирования.

- аргументы функции. Их можно записать вручную или указать с помощью контекстного меню в строке **Getting Object Data**. В последнем случае нужно предварительно определить тип нужных объектов (на рисунке этот тип определен как **Markers**). Аргументы функции указываются последовательно и могут быть вставлены в тело функции с помощью кнопки **Insert Object Data**.

После того как функция задана необходимо нажать кнопку **Ok** для вставки функции в строку параметризуемой характеристики. Для некоторых функций доступна кнопка **Assist**, которая выводит дополнительное окно задания аргументов функции с их описанием. Если возможно, значение функции можно вычислить с помощью кнопки **Evaluate** или построить ее график с помощью кнопки **Plot**.

Функции из группы **Location/Orientation** отвечают за параметризацию положения и ориентации одних маркеров положением и ориентацией других маркеров. Маркер, к которому применяется функция параметризации называется параметризуемым. Маркеры, используемые в качестве аргументов в теле функции называются параметризующими.

- Функция **LOC_ALONG_LINE(Object1, Object2, Rreal)** располагает параметризуемый маркер на линии между маркерами **Object1** и **ObjectT2**, на расстоянии **REAL** от маркера **Object1**.

- Функция **LOC_ON_AXIS(Object, REAL, String)** располагает параметризуемый маркер вдоль оси **String** маркера **Object** на расстоянии **REAL** от него. Параметр **STRING** может принимать значения “x”, “y” или “z”.
- Функция **LOC_RELATIVE_TO({ARRAY}, Object)** располагает параметризуемый объект на расстоянии заданном смещениями вдоль координатных осей, связанных с маркером **Object**. Эти значения указываются вместо слова **ARRAY** через запятую.
- Функция **LOC_ON_LINE({array1},{array2}, s)** – располагает маркер на линии проходящей через точки, координаты которых указаны в массивах **array1** и **array2**, на расстоянии **s** от первой точки. Причем расстояние **s** отсчитывается от первой точки в сторону второй точки.
- Функция **ORI_RELATIVE_TO({ARRAY}, Object)** ориентирует параметризуемый маркер с помощью относительных углов поворота, указанных в массиве **ARRAY** вокруг осей **X,Y,Z** маркера **Object**. Углы при этом указываются через запятую.
- Функция **ORI_ALONG_AXIS(Object1, Object2, String)** ориентирует ось параметризуемого маркера, указанную в строке **String** вдоль линии между маркерами **Object1** и **Object2**. Ориентация остальных осей параметризуемого маркера в этом случае произвольная.
- Функция **ORI_ALLIGN_AXIS(Object, String)** ориентирует параметризуемый маркер в соответствии с выражением **String** которое имеет вид “a+b” или “a-b” где **a** – x, y или z – название оси маркера **OBJECT**, **b** - название одной из осей параметризуемого маркера. Знак «+» означает, что оси одинаково направлены, а знак «-» – противоположно направлены. Например выражение “x+z” означает, что ось **Z** параметризуемого маркера направлена вдоль оси **X** параметризирующего маркера.

Функции из группы **Modelling** позволяют получать смещения между объектами модели.

- Функция **DX(object1, object2, object3)** возвращает проекцию расстояния между маркерами **object1** и **object2** на ось X маркера **object3**. Если третий параметр функции не указан, то вместо него используется глобальная система координат.
- Функции **DY(object1, object2, object12)** и **DZ(object1, object2, object3)** аналогичны функции **DX**, но возвращают расстояние между маркерами вдоль осей Y и Z соответственно.
- Функция **DM(object1, object2)** возвращает абсолютное расстояние между маркерами **object1** и **object2** соответственно.
- Функция **AX(object1, object2)** возвращает угол поворота осей Z,Y маркера **object1** вокруг оси X маркера **object2**. При этом оси X обоих маркеров должны быть параллельны.
- Функции **AY(object1, object2, object12)** и **AZ(object1, object2, object3)** аналогичны функции **AX**, но возвращают углы поворота вокруг осей Y и Z соответственно.

Параметризация дизайн – переменными.

Дизайн – переменные могут использоваться в место чисел в характеристиках объектов. Как в процессе создания геометрии модели, так и во время симуляции значения дизайн – переменных может меняться, вызывая изменение связанных с ними характеристик. В рассмотренном выше примере можно создать дизайн – переменную Y1, которую подставить в место координаты Y для каждого маркера. При изменении дизайн – переменной координаты Y маркеров, а, следовательно, и положение звеньев, будут меняться одинаково. Для создания дизайн – переменной необходимо в верхнем меню выполнить команды **Build – Design Variables – New**.

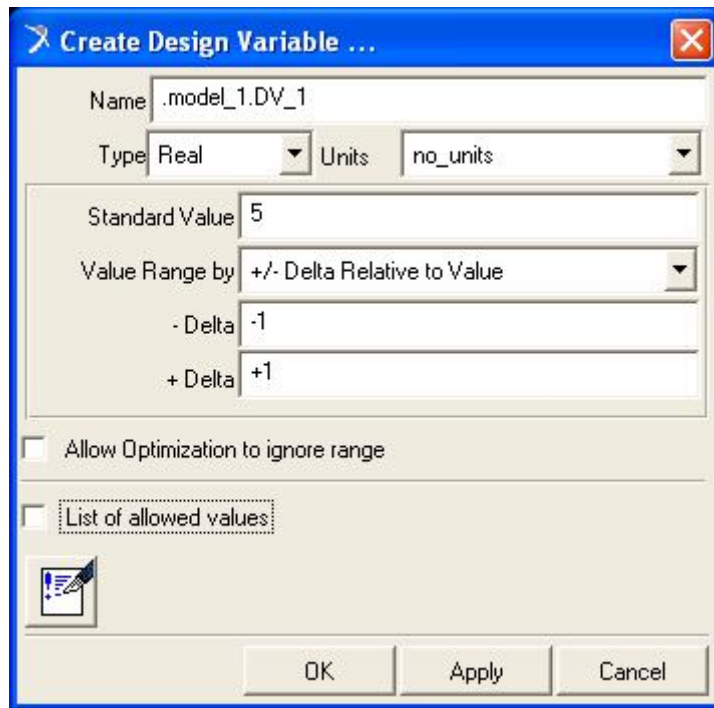


Рис. 3.

Появится окно изображенное на рис. 3. Значения пунктов этого окна следующие:

- **Name** – название дизайн – переменной по умолчанию принимается **DV_1**, **DV_2** и т.д.
- **Type** – тип переменной может быть действительным (**Real**), целым (**Integer**), строковым (**String**) и объектным (**Object**).
- Начальное или стандартное значени переменной. Оно обозначается как **Standard Value** для числовых типов, **Object Value** для объектного типа и **String Value** для строкового. Числового типа это некоторое число, для строкового типа это произвольная строка символов, а для объектного типа – название объекта модели: маркера, части, материала и т.д.
- Для переменной действительного типа можно задать размерность переменной с помощью меню **Units**.
- Для переменных числовых типов также необходимо задать границы изменения значения переменной (**+Delta** и **–Delta**). Эти границы

изменения задаются тремя возможными способами: относительными смещениями (Delta relative to Value), процентными смещениями (Percent Relative to Value) и абсолютными значениями минимальной и максимальной границ области изменения переменной (Absolute Min and Max Values).

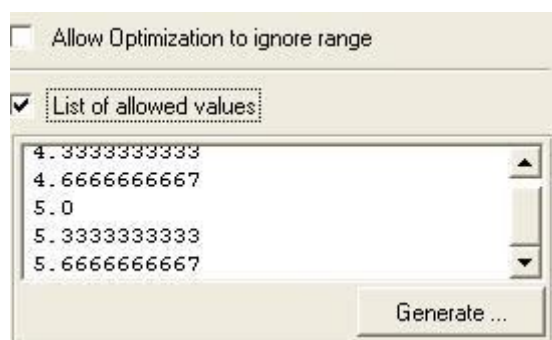


Рис. 4.

- Снятие или установка флажка **Allow Optimization to ignore range** запрещает или разрешает переменной принимать значения, выходящие за установленные границы во время процесса оптимизации.
- Для переменных действительного типа можно задать список допустимых значений, установив флажок **List of allowed values** (рис. 4). В этом случае дизайн – переменная будет изменяться дискретно, принимая только определенные значения. При установке флажка в окне появляется дополнительная область, где можно задать список значений переменной вручную, либо воспользоваться встроенным генератором чисел, нажав кнопку **Generate**. Эта кнопка раскрывает меню настройки генерации чисел (рис. 5). Способов генерации всего два:
 - 1) **Min, Std, Max** – этот способ дает три целых числа, которые расположены на границах и в центре диапазона изменения переменной.
 - 2) **Equally spaced** – способ дает список чисел, равномерно распределенных в диапазоне изменения дизайн – переменной.

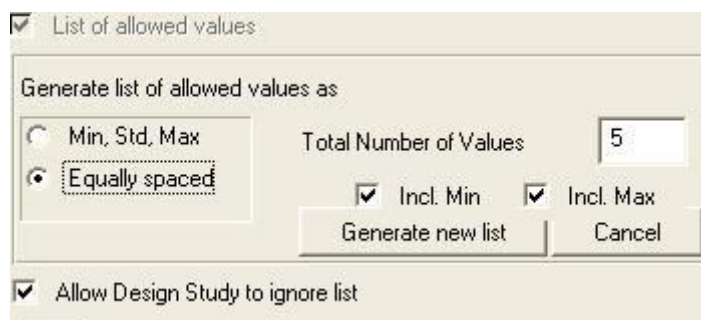


Рис. 5

Количество этих чисел определяется значением параметра **Total Number of Values**, причем как видно из рис. 5, граничные значения диапазона могут как включаться, так и не включаться в этот список.

- Флажок **Allow Design Study to ignore list** определяет, возможно ли на этапе оптимизации модели игнорировать список заданных значений дизайн – переменной.

После создания переменной ее параметры можно просмотреть и изменить, выбрав пункты верхнего меню **Build – Design Variables – Modify**, и появившемся списке указав название переменной.

При геометрической параметризации дизайн - переменные используются в строках **Location** и **Orientation** определяющих маркеров геометрических объектов. Для внесения названия переменной в строку характеристик необходимо в строке соответствующей характеристики нажать правую кнопку мыши и в появившемся контекстном меню выбрать команду **Reference Design Variable** (рис.6). Затем в раскрывшемся окне **DataBase Navigator** выбрать название необходимой переменной. При этом нужно учитывать, что название переменной заменит собой все три числа в строке ориентации или положения, поэтому пропавшие числа необходимо будет дописать вручную (рис.7). Другим способом внесения переменной в строку характеристик объекта является использование конструктора выражений. Его использование позволяет вносить название переменной без удаления всех чисел в строке ориентации или положения. Для вызова конструктора выражений необходимо после вызова контекстного меню (рис. 6) выбрать

пункт **Expression Builder**. Затем в нижней части окна конструктора в меню **Getting Object Data** выбрать пункт **Design Variables** (рис. 8), в строке редактирования вызвать контекстное меню, в котором выбрать пункты **Variable – Guesses**. После этого в списке переменных выбрать нужную (рис. 9) и нажать кнопку **Insert Object Name** (рис. 10). Название переменной появится в строке редактирования без удаления других параметров.

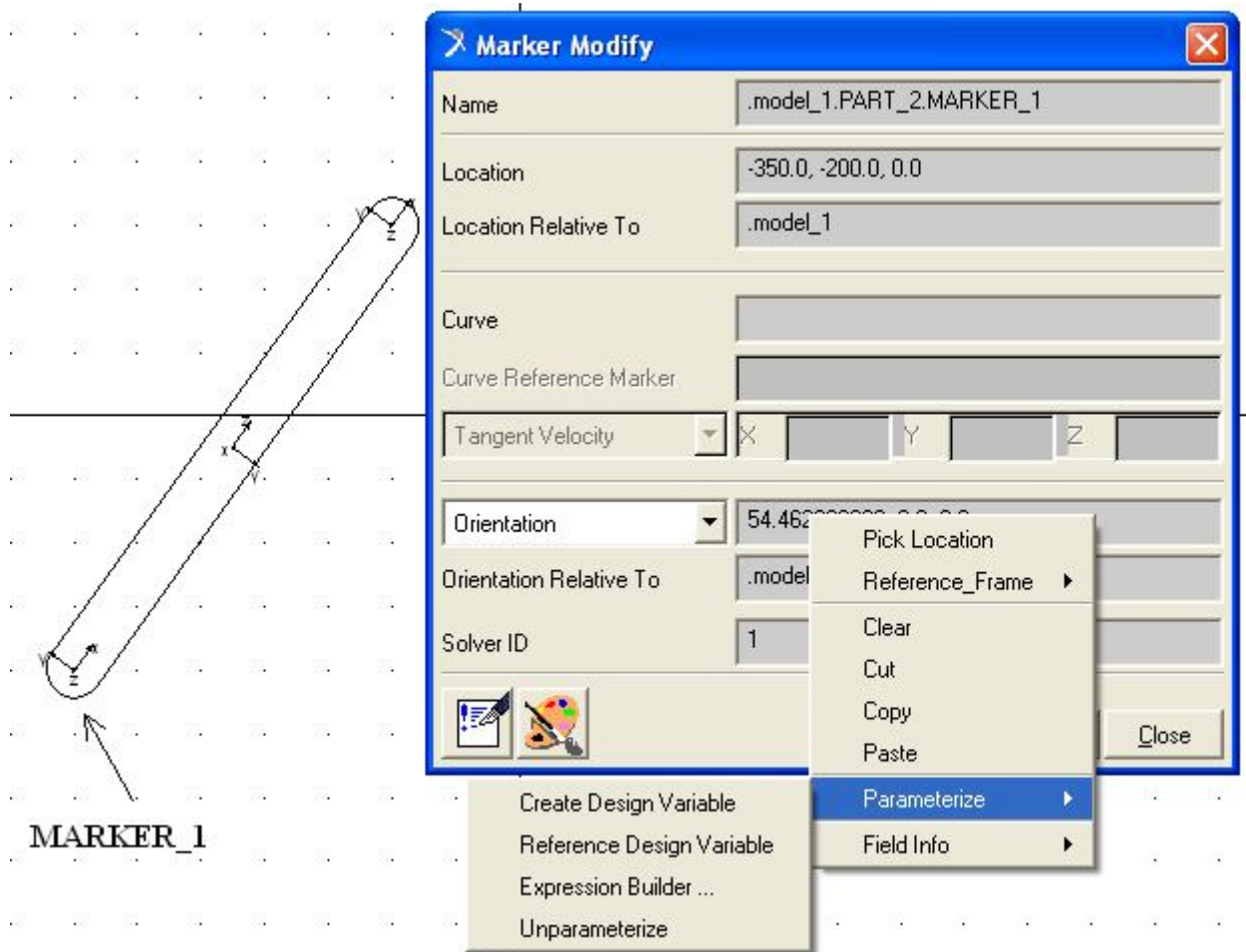


Рис. 6.

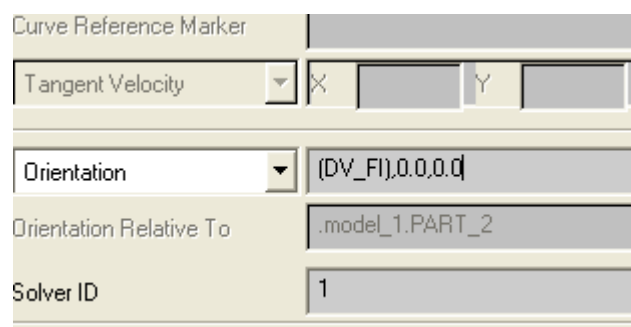


Рис. 7

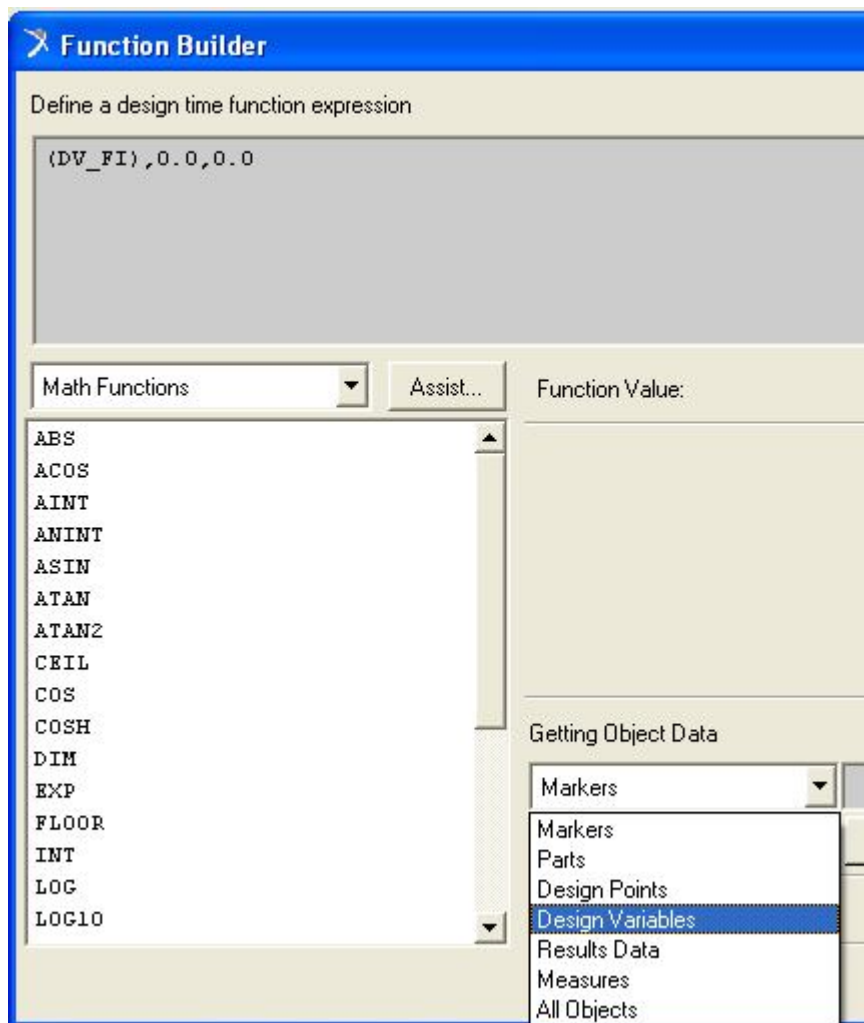


Рис. 8.

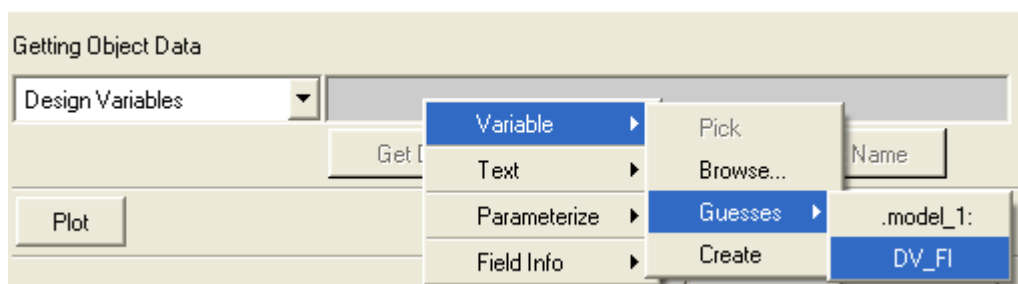


Рис. 9

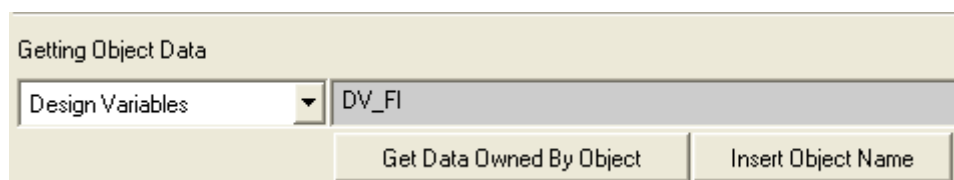


Рис. 10.

Примеры параметризации частей механизмов.

Все механизмы, представленные в лабораторной работе состоят из набора стандартных конструкций параметризация которых рассмотрена на следующих примерах.

Пример 1. Угол.

Углом будем называть два звена, соединенных в одной точке см. рис. 1. Длины звеньев l_1 и l_2 . Каждое звено имеет два маркера: m1, m2, m3, m4 (рис.11). Маркеры m1 и m3 должны быть свободными по положению.

В данном случае звенья должны быть созданы таким способом, что бы нижние маркеры были отмечены первыми, а верхние - вторыми.

Каждый маркер имеет 2 параметра: положение и ориентацию и таким образом получается 8 параметров конструкции. С учетом свободы положения маркеров m1 и m3 остается 6 параметров. Положения маркеров m2 и m4 должно быть таким, что бы длины звеньев при любых положения маркеров m1 и m3 оставались неизменными и равными l_1 и l_2 соответственно. Это достигается использованием следующих функций

Строка **Location** маркера m2: **LOC_RELATIVE_TO**($\{l_1, 0, 0\}$, m1);

Строка **Location** маркера m3: **LOC_RELATIVE_TO**($\{l_2, 0, 0\}$, m1).

Аналогичным образом может использоваться функция **LOC_ON_AXIS**. Данная параметризация положения, кроме постоянства длины звена дает еще одно полезное свойство. При поворотах маркера m1 звено будет поворачиваться вслед за маркером, поскольку марке m2 всегда будет лежать на оси X Маркера m1. Это свойство верно и для второго звена.

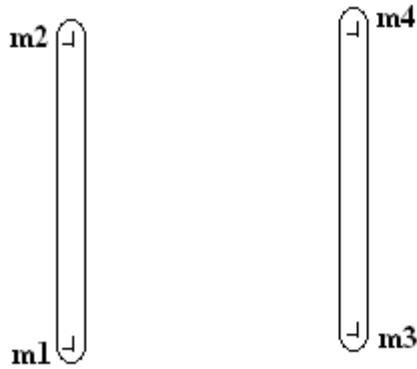


рис. 11

Второй шаг в процессе параметризации заключается в том, что бы ось X маркера m1(а, следовательно, и все левое звено) направить на маркер m4 и, аналогично ось X маркера m3 направить на маркер m2 (рис. 12). То есть ось X маркера m1 нужно ориентировать вдоль линии, проходящей через точки размещения маркеров m1 и m4(рис. 12).

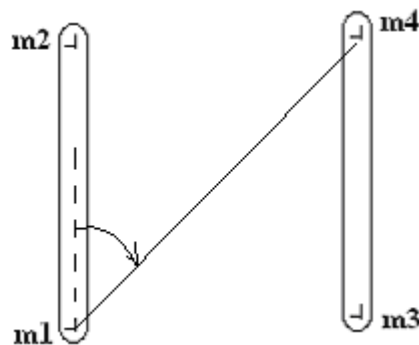


Рис. 12.

Это достигается заданием в строке **Orientation** маркера m1 следующей функции:

ORI_ALONG_AXIS(m1, m4,"x").

Аналогично в строке Orientation маркера m3 необходимо указать

ORI_ALONG_AXIS(m3, m2,"x").

Полный список функций, используемых для решения данной задачи, приведен в таблице 1.

Таблица 1

m1 Location	-
-------------	---

m1 Orientation	ORI_ALONG_AXIS(m1, m4,"x")
m2 Location	LOC_RELATVE_TO({ $l_1, 0, 0$ }, m1)
m2 Orientation	-
m3 Location	-
m3 Orientation	ORI_ALONG_AXIS(m3, m2,"x")
m4 Location	LOC_RELATVE_TO({ $l_2, 0, 0$ }, m3)
m4 Orientation	-

При параметризации этой конструкции необходимо помнить, что существует два положения механизма удовлетворяющих исходным условиям. Поэтому изначально звенья необходимо создавать так, что бы они были как можно ближе к необходимой конфигурации.

Пример 2. Кривошипно-ползунный механизм (рис. 13) у которого заданы длины звеньев l_1, l_2 и эксцентриситет ε

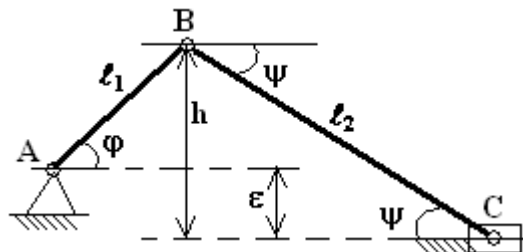


Рис. 13.

Пусть звено АВ характеризуется маркерами m1 и m2, а звено ВС – маркерами m3 и m4. Конструкцию необходимо создать таким образом, что бы маркер m1 располагался в точке А, маркеры m2, m3 находились в точке В, а маркер m4 располагался в точке С.

При параметризации указанного механизма требуется, что бы при любом углу φ точка С всегда оставалась на одинаковой высоте, то есть, что бы величина ε была постоянной. Это достигается определением и заданием в модели угла ψ как некоторой функции угла φ .

На первом шаге параметризации необходимо обеспечить постоянную длину звеньев. Для этого в строке **Location** маркеров m2 и m4 необходимо записать следующие функции:

Для маркера m2: **LOC_RELATIVE_TO**($\{\ell_1, 0, 0\}$, m1).

Для маркера m4: **LOC_RELATIVE_TO**($\{\ell_2, 0, 0\}$, m3).

На втором шаге необходимо ориентировать звено АВ под углом φ к горизонтали. Для этого необходимо создать дизайн переменную **DV_FI** со значением, указанным в исходных данных к работе и в строке **Orientation** маркера m1 записать **(DV_FI),0,0**.

Далее необходимо обеспечить совпадение положения маркеров m2 и m3. Для этого в строке **Location** маркера m3 необходимо записать **LOC_RELATIVE_TO**($\{0, 0, 0\}$, m2).

Четвертый шаг параметризации – определение и задание такого угла ψ , который обеспечивает постоянную высоту точки С. Значение этого угла можно определить из следующего условия (см. рис. 13)

$$h = \ell_1 \sin \varphi + \varepsilon = \ell_2 \sin \psi . \quad (2)$$

Откуда

$$\psi = \arcsin\left(\frac{\ell_1 \sin \varphi + \varepsilon}{\ell_2}\right). \quad (3)$$

Если кривошип АВ является базовым в модели, то вместо угла φ можно использовать название переменной **DV_FI**. Если же угол наклона отрезка АВ заранее неизвестен, то необходимо в точке А создать маркер m5, расположенный на фундаменте и в место φ использовать функцию **AZ(m1,m5)**. При этом оси маркера m5 должны совпадать с осями глобальной системы координат.

Таким образом, для задания угла наклона шатуна необходимо создать дизайн-переменную **DV_PSI** в строке значения которой записать выражение (3). После этого в строке **Orientation** маркера m3 нужно записать (-

$DV_{PSI}, 0, 0$. Знак «-» связан с тем, что положительное значение угла поворота соответствует вращению против часовой стрелки, а в рассматриваемом примере угол наклона шатуна отсчитывается по часовой стрелке от горизонтали.

Возможен случай, когда ось движения ползуна наклонена под некоторым углом к горизонтали (рис. 14).

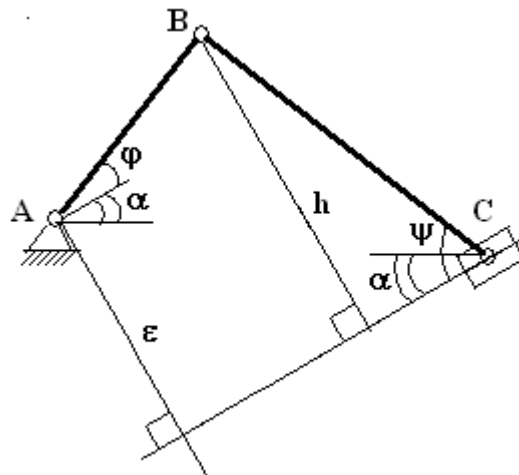


Рис. 14.

Тогда величины h и ϵ определяются по нормали от направления движения ползуна, а выражении (3) угол φ необходимо заменить на $\varphi + \alpha$, а ψ на $\psi - \alpha$. После чего выразить ψ .

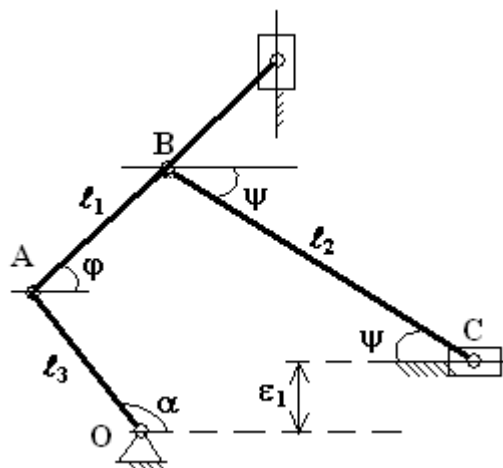


Рис.15

В более общем случае тока А может быть подвижной, например, она может располагаться на шатуне другого кривошипно-шатунного механизма. Тогда соотношение (2) принимает вид см. рис. 15.

$$l_3 \sin \alpha + l_1 \sin \varphi - l_2 \sin \psi = \varepsilon_1, \quad (4)$$

То есть сумма вертикальных проекций всех звеньев механизма должна быть равна вертикальному расстоянию между крайними точками. При этом в (4) расстояние l_1 , как и раньше, обозначает длину отрезка АВ. Углы α и φ могут быть получены с помощью функции **AZ** и, следовательно, угол ψ определится однозначно.

Пример 3. Трехзвенник (рис. 16).

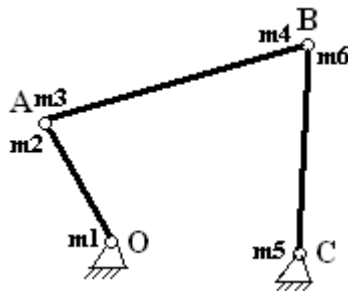


Рис. 16.

Пусть положение звена ОА характеризуется маркерами $m1, m2$, положение звена АВ – маркерами $m3, m4$, положение звена ВС – маркерами $m5, m6$. Необходимо отметить, что маркеры звеньев ОА и ВС с наименьшими номерами должны лежать на свободных концах звеньев. В данном примере считается, что ориентация звена ОА известна, то есть оно является базовым. Если базовым является звено ВС, то маркеры $m3$ и $m4$ меняются местами.

На первом шаге параметризации необходимо обеспечить постоянство длин звеньев.

Строка **Location** для маркера $m2$: **LOC_RELATIVE_TO**($\{l_1, 0, 0\}, m1$),

строка **Location** для маркера $m4$: **LOC_RELATIVE_TO**($\{l_2, 0, 0\}, m3$),

строка **Location** для маркера m6: **LOC_RELATIVE_TO**($\{\ell_3, 0, 0\}$, m5),

где ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3 - длины звеньев OA, AB, BC соответственно.

На втором шаге звено AB прикрепляется к звену OA в точке A. В строку **Location** маркера m3 необходимо вставить функцию **LOC_RELATIVE_TO**($\{0, 0, 0\}$, m2).

На третьем шаге звенья AB и BC соединяются в точке B так же как в примере 1.

Строка **Orientation** для маркера m3: **ORI_ALONG_AXIS**(m3, m6, "x"),

Строка **Orientation** для маркера m5: **ORI_ALONG_AXIS**(m5, m4, "x").

Теперь при любом повороте звена OA на некоторый угол вся конструкция будет двигаться согласованно.

В общем случае возможна конструкция с бóльшим количеством звеньев, при условии, что крайние точки граничных звеньев должны быть неподвижны (рис.17).

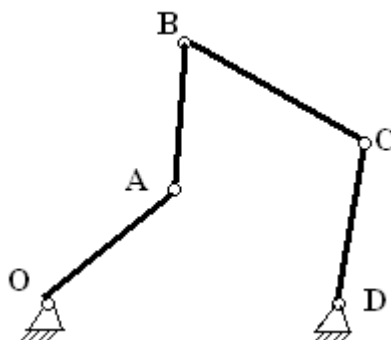


Рис. 17.

Алгоритм действий при параметризации такой конструкции аналогичен параметризации трехзвенника. В данном случае после обеспечения постоянства длин звеньев необходимо звено AB прикрепить к звену OA в точке A, звено BC прикрепить к звену AB в точке B и звенья BC и DC соединить в точке C, как указано в примере 1.

Пример 4. Коромысло (рис18.).

Требуется параметризовать отрезок BCD так, что бы при перемещении механизма центральная точка C оставалась неподвижна и длины отрезков BC и CD были постоянны.

Несмотря на то что на рисунке коромысло BD изображено как единый отрезок, его нужно создать как два отдельных звена CB и CD так, что бы маркеры с наименьшими номерами находились в точке C.

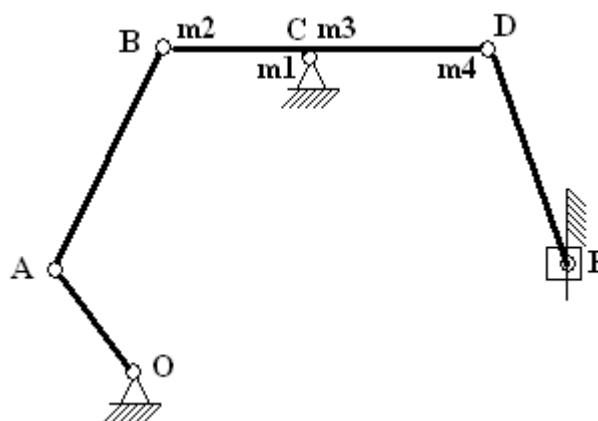


Рис. 18.

Левая часть OABC механизма, изображенного на рис. Представляет собой трехзвенник, параметризация которого рассмотрена в предыдущем примере. Следовательно, ориентация звена BC уже задана и определяется положением трехзвенника. Для корректной работы коромысла необходимо, что бы угол между звеньями BC и CD все время был равен 180° . Это достигается использованием в строке Orientation маркера m3 следующей функции

ORI_RELATIVE_TO({180,0,0},m1).

Для того, что бы звено BD всегда оставалось единым целым маркер m3 нужно расположить в той же точке, что и маркер m1. Для этого в строке Location маркера m3 необходимо записать функцию **LOC_RELATIVE_TO({0,0,0},m1).**

Правая часть конструкции представляет собой кривошипно-ползунный механизм, параметризация которого рассматривалась во втором примере.

Таким образом, при повороте кривошипа ОА точка закрепления коромысла (m1) будет оставаться неподвижной, а само коромысло будет поворачиваться из-за перемещения точки В.

Параметризация многозвенного механизма.

В качестве примера рассмотрим порядок параметризации механизма, изображенного на рис. 19. Положение механизма определяется углом наклона φ кривошипа ОА, отсчитываемого от горизонтали.

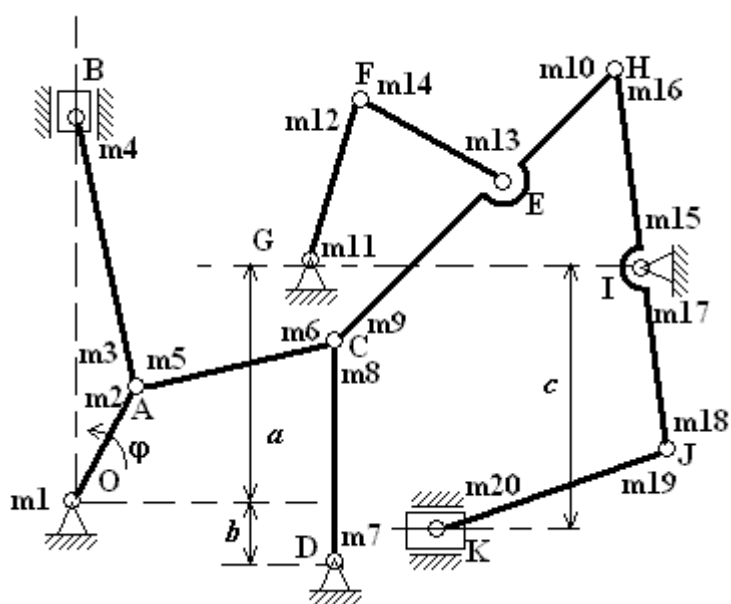


Рис. 19

Данный механизм состоит из следующих частей:

- звенья ОА и АВ образуют кривошипно-ползунный механизм,
- звенья ОА, АС и DC образуют трехзвенник с базовым звеном ОА,
- звенья EF и GF образуют угол,
- звенья DC, CH и IH образуют трехзвенник с базовым звеном DC,
- звенья IH и IJ образуют коромысло,
- звенья IJ и JK образуют кривошипно-ползунный механизм.

При параметризации в свойствах маркеров необходимо использовать следующие функции:

1) Параметризация звеньев OA и AB: для обеспечения постоянства длин в строке Location необходимо записать

для маркера m2: **LOC_RELATIVE_TO**({ ℓ_{OA} ,0,0},m1),

для маркера m4: **LOC_RELATIVE_TO**({ ℓ_{AB} ,0,0},m3).

Для обеспечения правильного угла наклона звена OA создать дизайн-переменную **DV_FI** и в строке **Orientation** маркера m1 записать (**DV_FI**),0,0. Для обеспечения правильного угла наклона звена AB необходимо создать дизайн-переменную **DV_PSI**, значение которой будет вычисляться с учетом того, что ползун механизма движется вдоль вертикальной прямой. Согласно (2) можно записать

$$\ell_{OA} \sin \varphi' = \ell_{AB} \sin \psi'. \quad (5)$$

Здесь углы φ' и ψ' имеют тот же смысл, что и углы φ и ψ в (1), то есть углы между звеньями механизма и прямой, по которой движется ползун. Однако в ADAMS используются истинные углы наклона, отсчитываемые от положительного направления оси X. Следовательно для данного механизма будем иметь $\psi' = \psi - 90^\circ$; $\varphi' = 90^\circ - \varphi$ см. рис. 20.

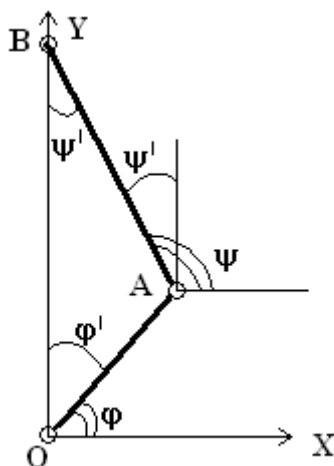


Рис. 20.

Подставляя выражение для φ' и ψ' в (2) получаем

$$\ell_{OA} \sin(90^\circ - \varphi) = \ell_{AB} \sin(\psi - 90^\circ),$$

или

$$\ell_{OA} \cos(\varphi) = \ell_{AB} \sin(\psi - 90^\circ).$$

Выражая отсюда угол ψ получаем, что значение дизайн - переменной **DV_PSI** будет следующим:

$$DV_PSI = 90 + \arcsin\left(\frac{\ell_{OA}}{\ell_{AB}} \cos(DV_FI)\right).$$

После того, как переменная **DV_PSI** будет создана, ее название необходимо записать в строке **ORIENTATION** маркера m3: **(DV_PSI),0,0**. После этого необходимо, изменяя значение переменной DV_FI убедиться, что механизм работает правильно.

- 2) Параметризация трехзвенника OACD. В трехзвеннике OACD звено OA уже параметризовано, поэтому необходимо параметризовать оставшиеся звенья с учетом того, что они образуют конструкцию «угол». Для этого необходимо использовать функции параметризации согласно таблице 2.

Таблица 2

Маркер	Параметр	Функция
m5	Location	LOC_RELATIVE_TO({0,0,0}, m2)
m5	Orientation	ORI_ALONG_AXIS(m5, m8, "x")
m6	Location	LOC_RELATIVE_TO({ℓ_{AC},0,0}, m5)
m7	Orientation	ORI_ALONG_AXIS(m7, m6, "x").
m8	Location	LOC_RELATIVE_TO({ℓ_{DC},0,0}, m7)

- 3) Параметризация угла EFG происходит следующим образом. Звено EF создается от точки E к точке F, а не наоборот. При этом положение маркера l3 может быть произвольным. Звено GF создается от точки G к точке F. При этом положение маркера m11 должно соответствовать исходным данным задачи. Используемые функции параметризации приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Маркер	Параметр	Функция
m13	Location	LOC_ALONG_AXIS(m9, m10, ℓ_{CE})
m13	Orientation	ORI_ALONG_AXIS(m13, m12, "x")
m14	Location	LOC_RELATIVE_TO($\{\ell_{EF}, 0, 0\}$, m13)
m11	Orientation	ORI_ALONG_AXIS(m11, m14, "x").
m12	Location	LOC_RELATIVE_TO($\{\ell_{GF}, 0, 0\}$, m12)

4) Параметризация трехзвенника CDHI происходит аналогично параметризации трехзвенника OACD. При этом звено HJ разбивается на два звена IH и IJ. Используемые функции параметризации показаны в таблице 4.

Таблица 4.

Маркер	Параметр	Функция
m9	Location	LOC_RELATIVE_TO($\{0, 0, 0\}$, m8)
m9	Orientation	ORI_ALONG_AXIS(m9, m15, "x")
m10	Location	LOC_RELATIVE_TO($\{\ell_{CH}, 0, 0\}$, m9)
m15	Orientation	ORI_ALONG_AXIS(m16, m10, "x").
m16	Location	LOC_RELATIVE_TO($\{\ell_{IH}, 0, 0\}$, m7)

5) Параметризация коромысла HJ. В коромысле HJ звено IH уже параметризовано, поэтому необходимо использовать функции параметризации только для маркеров звена IJ согласно таблицы 5.

Таблица 5.

Маркер	Параметр	Функция
m17	Location	LOC_RELATIVE_TO($\{0, 0, 0\}$, m15)
m17	Orientation	ORI_RELATIVE_TO($\{180, 0, 0\}$, m15)
m18	Location	LOC_RELATIVE_TO($\{\ell_{IJ}, 0, 0\}$, m17)

- 6) Параметризация кривошипно-ползунного механизма, образованного звеньями ИJ и JK. Данный кривошипно-ползунный механизм имеет ненулевой эксцентриситет c . Углы φ' и ψ' показаны на рис. 21.

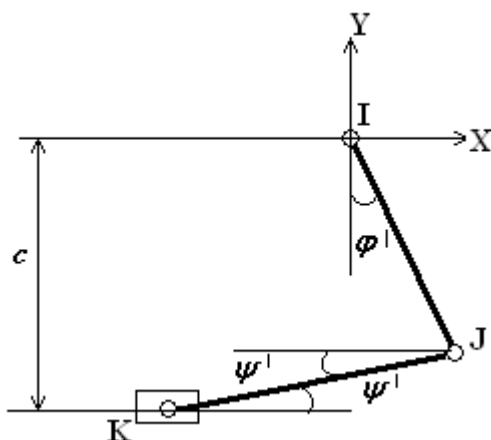


Рис. 21.

Поскольку угол наклона звена ИJ заранее неизвестен, для его определения нужно использовать функцию **AZ**. Для этого необходимо добавить к фундаменту маркер m_gr в точке I и ориентировать его таким образом, чтобы его ось X была направлена вниз. Теперь угол φ' будет вычисляться как

$$\varphi' = PSI(m17, m_gr), \quad (4)$$

его можно использовать для вычисления угла ψ . Для непосредственного использования угла φ' необходимо создать дизайн – переменную **DV_1**, в строке выражения которой записать функцию **PSI** из (4).

Выражение для истинного угла наклона звена JK будет иметь вид

$$\psi = 180 + \psi'.$$

Выражая ψ' и подставляя его в (1) с учетом эксцентриситета получаем

$$\ell_{IJ} \cos(\varphi') + \ell_{JK} \sin(\psi - 180) = c,$$

откуда

$$\psi = \arcsin\left(\frac{c - \ell_{IJ} \sin(\varphi)}{\ell_{JK}}\right) + 180 \quad (6)$$

Для использования угла ψ в ADAMS необходимо создать дизайн – переменную **DV_PSI1**, в строке выражения которой необходимо записать правую часть (6). После этого переменную **DV_PSI1** необходимо вставить в строку **Orientation** маркера m19.

Таким образом, механизм будет полностью параметризован углом поворота базового кривошипа. В приложении приведен полный листинг пакетного файла с данной моделью.

Приложение

```
!
!----- Default Units for Model -----!
!
!
defaults units &
  length = mm &
  angle = deg &
  force = newton &
  mass = kg &
  time = sec
!
defaults units &
  coordinate_system_type = cartesian &
  orientation_type = body313
!
!----- Default Attributes for Model -----!
!
!
defaults attributes &
  inheritance = bottom_up &
  icon_visibility = on &
  grid_visibility = off &
  size_of_icons = 25.0 &
  spacing_for_grid = 1000.0
!
!----- Adams/View Model -----!
!
!
model create &
  model_name = model_1
!
view erase
!
!----- Materials -----!
!
!
material create &
  material_name = .model_1.steel &
  youngs_modulus = 2.07E+005 &
  poissons_ratio = 0.29 &
  density = 7.801E-006
!
!----- Rigid Parts -----!
!
! Create parts and their dependent markers and graphics
!
!----- ground -----!
!
! ***** Ground Part *****
!
defaults model &
  part_name = ground
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.ground
!
```

```

! ***** Markers for current part *****
!
marker create &
  marker_name = .model_1.ground.MARKER_21 &
  adams_id = 21 &
  location = 600.0, 400.0, 0.0 &
  orientation = 270.0d, 0.0d, 0.0d
!
part create rigid_body mass_properties &
  part_name = .model_1.ground &
  material_type = .model_1.steel
!
part attributes &
  part_name = .model_1.ground &
  name_visibility = off
!
!----- PART_2 -----!
!
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.ground
!
part create rigid_body name_and_position &
  part_name = .model_1.PART_2 &
  adams_id = 2 &
  location = 0.0, 0.0, 0.0 &
  orientation = 0.0d, 0.0d, 0.0d
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.PART_2
!
! ***** Markers for current part *****
!
marker create &
  marker_name = .model_1.PART_2.MARKER_1 &
  adams_id = 1 &
  location = 0.0, 0.0, 0.0 &
  orientation = 60.0d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
  marker_name = .model_1.PART_2.MARKER_2 &
  adams_id = 2 &
  location = 100.0, 173.2050807569, 0.0 &
  orientation = 135.0d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
  marker_name = .model_1.PART_2.cm &
  location = 50.0, 86.6025403784, 0.0 &
  orientation = 330.0d, 90.0000000229d, 359.9999765869d
!
part create rigid_body mass_properties &
  part_name = .model_1.PART_2 &
  material_type = .model_1.steel
!
! ***** Graphics for current part *****
!
geometry create shape link &
  link_name = .model_1.PART_2.LINK_1 &
  i_marker = .model_1.PART_2.MARKER_1 &
  j_marker = .model_1.PART_2.MARKER_2 &
  width = 10.0 &

```

```

    depth = 10.0
!
part attributes &
    part_name = .model_1.PART_2 &
    color = MAIZE &
    name_visibility = off
!
!----- PART_3 -----!
!
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
part create rigid_body name_and_position &
    part_name = .model_1.PART_3 &
    adams_id = 3 &
    location = 0.0, 0.0, 0.0 &
    orientation = 0.0d, 0.0d, 0.0d
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.PART_3
!
! ***** Markers for current part *****
!
marker create &
    marker_name = .model_1.PART_3.MARKER_3 &
    adams_id = 3 &
    location = 100.0, 173.2050807569, 0.0 &
    orientation = 105.0d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
    marker_name = .model_1.PART_3.MARKER_4 &
    adams_id = 4 &
    location = -3.527618041, 559.5754112725, 0.0 &
    orientation = 69.1187903196d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
    marker_name = .model_1.PART_3.cm &
    location = 48.2361909795, 366.3902460147, 0.0 &
    orientation = 15.0d, 90.0000000266d, 359.9998700542d
!
part create rigid_body mass_properties &
    part_name = .model_1.PART_3 &
    material_type = .model_1.steel
!
! ***** Graphics for current part *****
!
geometry create shape link &
    link_name = .model_1.PART_3.LINK_2 &
    i_marker = .model_1.PART_3.MARKER_3 &
    j_marker = .model_1.PART_3.MARKER_4 &
    width = 10.0 &
    depth = 10.0
!
part attributes &
    part_name = .model_1.PART_3 &
    color = CYAN &
    name_visibility = off
!
!----- PART_4 -----!
!

```

```

!
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.ground
!
part create rigid_body name_and_position &
  part_name = .model_1.PART_4 &
  adams_id = 4 &
  location = 0.0, 0.0, 0.0 &
  orientation = 0.0d, 0.0d, 0.0d
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.PART_4
!
! ***** Markers for current part *****
!
marker create &
  marker_name = .model_1.PART_4.MARKER_7 &
  adams_id = 5 &
  location = 200.0, -150.0, 0.0 &
  orientation = 77.2198348731d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
  marker_name = .model_1.PART_4.MARKER_8 &
  adams_id = 6 &
  location = 288.4843613603, 240.0903969526, 0.0 &
  orientation = 90.0d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
  marker_name = .model_1.PART_4.cm &
  location = 244.2421806801, 45.0451984763, 0.0 &
  orientation = 347.2198348731d, 90.0000000214d, 359.9999036234d
!
part create rigid_body mass_properties &
  part_name = .model_1.PART_4 &
  material_type = .model_1.steel
!
! ***** Graphics for current part *****
!
geometry create shape link &
  link_name = .model_1.PART_4.LINK_3 &
  i_marker = .model_1.PART_4.MARKER_7 &
  j_marker = .model_1.PART_4.MARKER_8 &
  width = 10.0 &
  depth = 10.0
!
part attributes &
  part_name = .model_1.PART_4 &
  color = MAGENTA &
  name_visibility = off
!
!----- PART_5 -----!
!
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.ground
!
part create rigid_body name_and_position &
  part_name = .model_1.PART_5 &
  adams_id = 5 &
  location = 0.0, 0.0, 0.0 &

```

```

orientation = 0.0d, 0.0d, 0.0d
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.PART_5
!
! ***** Markers for current part *****
!
marker create &
  marker_name = .model_1.PART_5.MARKER_5 &
  adams_id = 7 &
  location = 100.0, 173.2050807569, 0.0 &
  orientation = 19.5376724105d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
  marker_name = .model_1.PART_5.MARKER_6 &
  adams_id = 8 &
  location = 288.4843613603, 240.0903969526, 0.0 &
  orientation = 28.186785432d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
  marker_name = .model_1.PART_5.cm &
  location = 194.2421806801, 206.6477388548, 0.0 &
  orientation = 109.5376724105d, 89.9999999771d, 2.3413105657E-005d
!
part create rigid_body mass_properties &
  part_name = .model_1.PART_5 &
  material_type = .model_1.steel
!
! ***** Graphics for current part *****
!
geometry create shape link &
  link_name = .model_1.PART_5.LINK_4 &
  i_marker = .model_1.PART_5.MARKER_5 &
  j_marker = .model_1.PART_5.MARKER_6 &
  width = 10.0 &
  depth = 10.0
!
part attributes &
  part_name = .model_1.PART_5 &
  color = RED &
  name_visibility = off
!
!----- PART_6 -----
!
!
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.ground
!
part create rigid_body name_and_position &
  part_name = .model_1.PART_6 &
  adams_id = 6 &
  location = 0.0, 0.0, 0.0 &
  orientation = 0.0d, 0.0d, 0.0d
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.PART_6
!
! ***** Markers for current part *****
!
marker create &

```

```

marker_name = .model_1.PART_6.MARKER_9 &
adams_id = 9 &
location = 288.4843613603, 240.0903969526, 0.0 &
orientation = 57.1669281191d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
marker_name = .model_1.PART_6.MARKER_10 &
adams_id = 10 &
location = 505.3616838251, 576.1919098925, 0.0 &
orientation = 57.0072171843d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
marker_name = .model_1.PART_6.cm &
location = 396.9230225927, 408.1411534226, 0.0 &
orientation = 327.1669281191d, 90.0000000166d, 359.9999433622d
!
part create rigid_body mass_properties &
part_name = .model_1.PART_6 &
material_type = .model_1.steel
!
! ***** Graphics for current part *****
!
geometry create shape link &
link_name = .model_1.PART_6.LINK_5 &
i_marker = .model_1.PART_6.MARKER_9 &
j_marker = .model_1.PART_6.MARKER_10 &
width = 10.0 &
depth = 10.0
!
part attributes &
part_name = .model_1.PART_6 &
color = GREEN &
name_visibility = off
!
!----- PART_7 -----!
!
!
defaults coordinate_system &
default_coordinate_system = .model_1.ground
!
part create rigid_body name_and_position &
part_name = .model_1.PART_7 &
adams_id = 7 &
location = 0.0, 0.0, 0.0 &
orientation = 0.0d, 0.0d, 0.0d
!
defaults coordinate_system &
default_coordinate_system = .model_1.PART_7
!
! ***** Markers for current part *****
!
marker create &
marker_name = .model_1.PART_7.MARKER_13 &
adams_id = 11 &
location = 424.0326879008, 450.1538425401, 0.0 &
orientation = 152.4822564739d, 180.0d, 0.0d
!
marker create &
marker_name = .model_1.PART_7.MARKER_14 &
adams_id = 12 &

```



```

    location = 246.6591289061, 542.5584991844, 0.0 &
    orientation = 117.8897326863d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
    marker_name = .model_1.PART_7.cm &
    location = 335.3459084035, 496.3561708623, 0.0 &
    orientation = 62.4822564739d, 89.9999999821d, 359.9999772905d
!
part create rigid_body mass_properties &
    part_name = .model_1.PART_7 &
    material_type = .model_1.steel
!
! ***** Graphics for current part *****
!
geometry create shape link &
    link_name = .model_1.PART_7.LINK_6 &
    i_marker = .model_1.PART_7.MARKER_13 &
    j_marker = .model_1.PART_7.MARKER_14 &
    width = 10.0 &
    depth = 10.0
!
part attributes &
    part_name = .model_1.PART_7 &
    color = MAIZE &
    name_visibility = off
!
!----- PART_8 -----!
!
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
part create rigid_body name_and_position &
    part_name = .model_1.PART_8 &
    adams_id = 8 &
    location = 0.0, 0.0, 0.0 &
    orientation = 0.0d, 0.0d, 0.0d
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.PART_8
!
! ***** Markers for current part *****
!
marker create &
    marker_name = .model_1.PART_8.MARKER_11 &
    adams_id = 13 &
    location = 200.0, 400.0, 0.0 &
    orientation = 71.8768255719d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
    marker_name = .model_1.PART_8.MARKER_12 &
    adams_id = 14 &
    location = 246.6591289061, 542.5584991844, 0.0 &
    orientation = 63.4349488229d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
    marker_name = .model_1.PART_8.cm &
    location = 223.3295644531, 471.2792495922, 0.0 &
    orientation = 341.8768255719d, 90.000000009d, 359.9999937392d
!
part create rigid_body mass_properties &

```

```

    part_name = .model_1.PART_8 &
    material_type = .model_1.steel
!
! ***** Graphics for current part *****
!
geometry create shape link &
    link_name = .model_1.PART_8.LINK_7 &
    i_marker = .model_1.PART_8.MARKER_11 &
    j_marker = .model_1.PART_8.MARKER_12 &
    width = 10.0 &
    depth = 10.0
!
part attributes &
    part_name = .model_1.PART_8 &
    color = CYAN &
    name_visibility = off
!
!----- PART_9 -----!
!
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
part create rigid_body name_and_position &
    part_name = .model_1.PART_9 &
    adams_id = 9 &

    location = 0.0, 0.0, 0.0 &
    orientation = 0.0d, 0.0d, 0.0d
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.PART_9
!
! ***** Markers for current part *****
!
marker create &
    marker_name = .model_1.PART_9.MARKER_15 &
    adams_id = 15 &
    location = 600.0, 400.0, 0.0 &
    orientation = 118.241669207d, 180.0d, 0.0d
!
marker create &
    marker_name = .model_1.PART_9.MARKER_16 &
    adams_id = 16 &
    location = 505.3616838251, 576.1919098925, 0.0 &
    orientation = 90.0d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
    marker_name = .model_1.PART_9.cm &
    location = 552.6808419126, 488.0959549463, 0.0 &
    orientation = 28.241669207d, 89.9999999987d, 0.0d
!
part create rigid_body mass_properties &
    part_name = .model_1.PART_9 &
    material_type = .model_1.steel
!
! ***** Graphics for current part *****
!
geometry create shape link &
    link_name = .model_1.PART_9.LINK_8 &
    i_marker = .model_1.PART_9.MARKER_15 &

```

```

    j_marker = .model_1.PART_9.MARKER_16 &
    width = 10.0 &
    depth = 10.0
!
part attributes &
    part_name = .model_1.PART_9 &
    color = MAGENTA &
    name_visibility = off
!
!----- PART_10 -----!
!
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
part create rigid_body name_and_position &
    part_name = .model_1.PART_10 &
    adams_id = 10 &
    location = 0.0, 0.0, 0.0 &
    orientation = 0.0d, 0.0d, 0.0d
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.PART_10
!
! ***** Markers for current part *****
!
marker create &
    marker_name = .model_1.PART_10.MARKER_17 &
    adams_id = 17 &
    location = 600.0, 400.0, 0.0 &
    orientation = 298.241669207d, 180.0d, 0.0d
!
marker create &
    marker_name = .model_1.PART_10.MARKER_18 &
    adams_id = 18 &
    location = 647.3191580874, 311.9040450537, 0.0 &
    orientation = 270.0d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
    marker_name = .model_1.PART_10.cm &
    location = 623.6595790437, 355.9520225269, 0.0 &
    orientation = 28.241669207d, 90.0000000063d, 1.3943203924E-006d
!
part create rigid_body mass_properties &
    part_name = .model_1.PART_10 &
    material_type = .model_1.steel
!
! ***** Graphics for current part *****
!
geometry create shape link &
    link_name = .model_1.PART_10.LINK_9 &
    i_marker = .model_1.PART_10.MARKER_17 &
    j_marker = .model_1.PART_10.MARKER_18 &
    width = 10.0 &
    depth = 10.0
!
part attributes &
    part_name = .model_1.PART_10 &
    color = RED &
    name_visibility = off
!

```

```

!----- PART_11 -----!
!
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.ground
!
part create rigid_body name_and_position &
  part_name = .model_1.PART_11 &
  adams_id = 11 &
  location = 0.0, 0.0, 0.0 &
  orientation = 0.0d, 0.0d, 0.0d
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.PART_11
!
! ***** Markers for current part *****
!
marker create &
  marker_name = .model_1.PART_11.MARKER_19 &
  adams_id = 19 &
  location = 647.3191580874, 311.9040450537, 0.0 &
  orientation = 198.6463458473d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
  marker_name = .model_1.PART_11.MARKER_20 &
  adams_id = 20 &
  location = 315.69062388, 200.0, 0.0 &
  orientation = 209.3639981373d, 0.0d, 0.0d
!
marker create &
  marker_name = .model_1.PART_11.cm &
  location = 481.5048909837, 255.9520225269, 0.0 &
  orientation = 108.6463458473d, 90.0000000158d, 359.9999252306d
!
part create rigid_body mass_properties &
  part_name = .model_1.PART_11 &
  material_type = .model_1.steel
!
! ***** Graphics for current part *****
!
geometry create shape link &
  link_name = .model_1.PART_11.LINK_10 &
  i_marker = .model_1.PART_11.MARKER_19 &
  j_marker = .model_1.PART_11.MARKER_20 &
  width = 10.0 &
  depth = 10.0
!
part attributes &
  part_name = .model_1.PART_11 &
  color = GREEN &
  name_visibility = off
!
!----- Forces -----!
!
!----- Accgrav -----!
!
!
force create body gravitational &
  gravity_field_name = gravity &
  x_component_gravity = 0.0 &

```

```

    y_component_gravity = -9806.65 &
    z_component_gravity = 0.0
!
!----- Analysis settings -----!
!
!----- ADAMS/View Variables -----!
!
variable create &
    variable_name = .model_1.DV_FI &
    units = "no_units" &
    range = -1.0, 1.0 &
    use_allowed_values = no &
    delta_type = relative &
    real_value = 60.0
!
variable create &
    variable_name = .model_1.DV_L_OA &
    units = "no_units" &
    range = -1.0, 1.0 &
    use_allowed_values = no &
    delta_type = relative &
    real_value = 200.0
!
variable create &
    variable_name = .model_1.DV_L_AB &
    units = "no_units" &
    range = -1.0, 1.0 &
    use_allowed_values = no &
    delta_type = relative &
    real_value = 400.0
!
variable create &
    variable_name = .model_1.DV_PSI &
    units = "no_units" &
    range = -1.0, 1.0 &
    use_allowed_values = no &
    real_value = 105.0
!
variable create &
    variable_name = .model_1.DV_1 &
    units = "no_units" &
    range = -1.0, 1.0 &
    use_allowed_values = no &
    delta_type = relative &
    real_value = 28.241669207
!
variable create &
    variable_name = .model_1.DV_PSI1 &
    units = "no_units" &
    range = -1.0, 1.0 &
    real_value = 198.6463458473
!
!----- Expression definitions -----!
!
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = ground
!
material modify &

```

```

material_name = .model_1.steel &
youngs_modulus = (2.07E+011(Newton/meter**2)) &
density = (7801.0(kg/meter**3))
!
marker modify &
marker_name = .model_1.PART_2.MARKER_1 &
orientation = &
(.model_1.DV_FI), &
0.0, &
0.0 &
relative_to = .model_1.PART_2
!
defaults coordinate_system &
default_coordinate_system = .model_1.ground
!
marker modify &
marker_name = .model_1.PART_2.MARKER_2 &
location = &
(LOC_RELATIVE_TO({20.0cm, 0.0, 0.0}, .model_1.PART_2.MARKER_1)) &
relative_to = .model_1.PART_2
!
defaults coordinate_system &
default_coordinate_system = .model_1.ground
!
geometry modify shape link &
link_name = .model_1.PART_2.LINK_1 &
width = (10mm) &
depth = (10mm)
!
marker modify &
marker_name = .model_1.PART_3.MARKER_3 &
location = &
(LOC_RELATIVE_TO({0, 0, 0}, .model_1.PART_2.MARKER_2)) &
orientation = &
(.model_1.DV_PSI), &
0.0, &
0.0 &
relative_to = .model_1.PART_3
!
defaults coordinate_system &
default_coordinate_system = .model_1.ground
!
marker modify &
marker_name = .model_1.PART_3.MARKER_4 &
location = &
(LOC_RELATIVE_TO({40.0cm, 0.0, 0.0}, .model_1.PART_3.MARKER_3)) &
relative_to = .model_1.PART_3
!
defaults coordinate_system &
default_coordinate_system = .model_1.ground
!
geometry modify shape link &
link_name = .model_1.PART_3.LINK_2 &
width = (10mm) &
depth = (10mm)
!
marker modify &
marker_name = .model_1.PART_4.MARKER_7 &
orientation = &
(ORI_ALONG_AXIS(.model_1.PART_4.MARKER_7, .model_1.PART_5.MARKER_6,
"x")) &

```

```

    relative_to = .model_1.PART_4
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
marker modify &
    marker_name = .model_1.PART_4.MARKER_8 &
    location = &
        (LOC_RELATIVE_TO({40.0cm, 0.0, 0.0}, .model_1.PART_4.MARKER_7)) &
    relative_to = .model_1.PART_4
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
geometry modify shape link &
    link_name = .model_1.PART_4.LINK_3 &
    width = (1.0cm) &
    depth = (1.0cm)
!
marker modify &
    marker_name = .model_1.PART_5.MARKER_5 &
    location = &
        (LOC_RELATIVE_TO({0, 0, 0}, .model_1.PART_2.MARKER_2)) &
    orientation = &
        (ORI_ALONG_AXIS(.model_1.PART_5.MARKER_5, .model_1.PART_4.MARKER_8,
"x")) &
    relative_to = .model_1.PART_5
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
marker modify &
    marker_name = .model_1.PART_5.MARKER_6 &
    location = &
        (LOC_RELATIVE_TO({20.0cm, 0.0, 0.0}, .model_1.PART_5.MARKER_5)) &
    relative_to = .model_1.PART_5
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
geometry modify shape link &
    link_name = .model_1.PART_5.LINK_4 &
    width = (1.0cm) &
    depth = (1.0cm)
!
marker modify &
    marker_name = .model_1.PART_6.MARKER_9 &
    location = &
        (LOC_RELATIVE_TO({0, 0, 0}, .model_1.PART_4.MARKER_8)) &
    orientation = &
        (ORI_ALONG_AXIS(.model_1.PART_6.MARKER_9, .model_1.PART_9.MARKER_16,
"x")) &
    relative_to = .model_1.PART_6
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
marker modify &
    marker_name = .model_1.PART_6.MARKER_10 &
    location = &
        (LOC_RELATIVE_TO({40.0cm, 0.0, 0.0}, .model_1.PART_6.MARKER_9)) &

```

```

    relative_to = .model_1.PART_6
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
geometry modify shape link &
    link_name = .model_1.PART_6.LINK_5 &
    width = (1.0cm) &
    depth = (1.0cm)
!
marker modify &
    marker_name = .model_1.PART_7.MARKER_13 &
    location = &
        (LOC_ALONG_LINE(.model_1.PART_6.MARKER_9, .model_1.PART_6.MARKER_10,
250)) &
    orientation = &
        (ORI_ALONG_AXIS(.model_1.PART_7.MARKER_13, .model_1.PART_8.MARKER_12,
"x")) &
    relative_to = .model_1.PART_7
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
marker modify &
    marker_name = .model_1.PART_7.MARKER_14 &
    location = &
        (LOC_RELATIVE_TO({20.0cm, 0.0, 0.0}, .model_1.PART_7.MARKER_13)) &
    relative_to = .model_1.PART_7
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
geometry modify shape link &
    link_name = .model_1.PART_7.LINK_6 &
    width = (1.0cm) &
    depth = (1.0cm)
!
marker modify &
    marker_name = .model_1.PART_8.MARKER_11 &
    orientation = &
        (ORI_ALONG_AXIS(.model_1.PART_8.MARKER_11, .model_1.PART_7.MARKER_14,
"x")) &
    relative_to = .model_1.PART_8
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
marker modify &
    marker_name = .model_1.PART_8.MARKER_12 &
    location = &
        (LOC_RELATIVE_TO({15.0cm, 0.0, 0.0}, .model_1.PART_8.MARKER_11)) &
    relative_to = .model_1.PART_8
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
geometry modify shape link &
    link_name = .model_1.PART_8.LINK_7 &
    width = (1.0cm) &
    depth = (1.0cm)
!

```



```

marker modify &
  marker_name = .model_1.PART_9.MARKER_15 &
  orientation = &
    (ORI_ALONG_AXIS(.model_1.PART_9.MARKER_15, .model_1.PART_6.MARKER_10,
"x")) &
  relative_to = .model_1.PART_9
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.ground
!
marker modify &
  marker_name = .model_1.PART_9.MARKER_16 &
  location = &
    (LOC_RELATIVE_TO({20.0cm, 0.0, 0.0}, .model_1.PART_9.MARKER_15)) &
  relative_to = .model_1.PART_9
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.ground
!
geometry modify shape link &
  link_name = .model_1.PART_9.LINK_8 &
  width = (1.0cm) &
  depth = (1.0cm)
!
marker modify &
  marker_name = .model_1.PART_10.MARKER_17 &
  orientation = &
    (ORI_RELATIVE_TO({180, 0, 0}, .model_1.PART_9.MARKER_15)) &
  relative_to = .model_1.PART_10
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.ground
!
marker modify &
  marker_name = .model_1.PART_10.MARKER_18 &
  location = &
    (LOC_RELATIVE_TO({10.0cm, 0.0, 0.0}, .model_1.PART_10.MARKER_17)) &
  relative_to = .model_1.PART_10
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.ground
!
geometry modify shape link &
  link_name = .model_1.PART_10.LINK_9 &
  width = (1.0cm) &
  depth = (1.0cm)
!
marker modify &
  marker_name = .model_1.PART_11.MARKER_19 &
  location = &
    (LOC_RELATIVE_TO({0, 0, 0}, .model_1.PART_10.MARKER_18)) &
  orientation = &
    (.model_1.DV_PSI1), &
    0.0, &
    0.0 &
  relative_to = .model_1.PART_11
!
defaults coordinate_system &
  default_coordinate_system = .model_1.ground
!
marker modify &

```

```

marker_name = .model_1.PART_11.MARKER_20 &
location = &
    (LOC_RELATIVE_TO({35.0cm, 0.0, 0.0}, .model_1.PART_11.MARKER_19)) &
relative_to = .model_1.PART_11
!
defaults coordinate_system &
    default_coordinate_system = .model_1.ground
!
geometry modify shape link &
    link_name = .model_1.PART_11.LINK_10 &
    width = (1.0cm) &
    depth = (1.0cm)
!
variable modify &
    variable_name = .model_1.DV_PSI &
    real_value = (90 + ASIN(.model_1.DV_L_OA / .model_1.DV_L_AB) *
COS(.model_1.DV_FI))
!
variable modify &
    variable_name = .model_1.DV_1 &
    real_value = (AZ(.model_1.ground.MARKER_21, .model_1.PART_10.MARKER_17))
!
variable modify &
    variable_name = .model_1.DV_PSI1 &
    real_value = (ASIN((200 - 100 * COS(.model_1.DV_1)) / 350) + 180)
!
model display &
    model_name = model_1

```