

### **Библиографический список**

1. Загревский, В.И. Биомеханика физических упражнений: учебное пособие / В.И. Загревский, О.И. Загревский. – Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2018. – 262 с.
2. Загревский, В.И. Оценка технического мастерства спортсменов по данным биомеханических показателей движения / В.И. Загревский, О.И. Загревский // Теория и практика физической культуры. – 2018. – № 10. – С. 76-78.
3. Теорема косинусов. – URL: [https://www.webmath.ru/poleznoe/formules\\_19\\_7.php](https://www.webmath.ru/poleznoe/formules_19_7.php)
4. Шариков, Н.В. Моделирование управляемого движения манипулятора / Н.В. Шариков // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 9. – Ч. 1. – С. 193-201.

DOI 10.51980/2021\_16\_150

*В.И. Загревский, О.И. Загревский*

### **ПРОГРАММНОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ДЛЯ ДВУХЗВЕННОЙ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СРЕДСТВАМИ MS EXCEL**

В робототехнике известны два класса задач: прямая и обратная.

В прямой задаче по известным длинам звеньев модели и их обобщенным координатам требуется найти декартовы координаты объекта движения (робототехническая система) в инерциальной системе отсчета [1-3].

Обратную задачу робототехники в механике называют обратной задачей кинематики. Эта задача в известном смысле противоположна прямой задаче [2]. В обратной задаче требуется определить обобщенные координаты объекта движения, при которых возможно совмещение целевой точки с заданными координатами и характерной точки дистального звена робототехнической системы (схват манипулятора). Опишем разработанный алгоритм решения обратной задачи для двухзвенной биосистемы на базе инструментальных средств табличного процессора MS Excel.

Пусть неподвижная опора (плечевой сустав) расположена в начале декартовой системы координат (ДСК), принятой за инерциальную систему отсчета (рис. 1).

Последовательность этапов программирования задачи от ее постановки до окончательного решения демонстрируется на рисунках 2-6. Здесь следует отметить, что в рамках настоящей статьи описывается один из способов ориентации звеньев модели: или «локтем» вверх (рис. 1-В), или локтем «вниз».

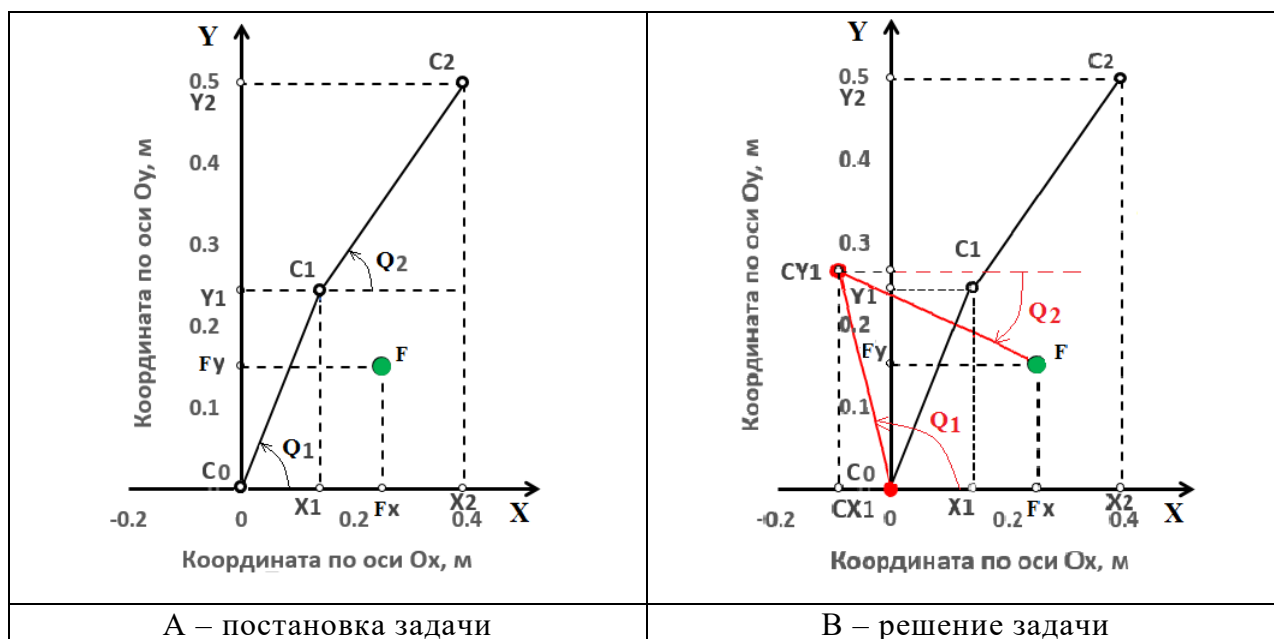


Рис. 1. Обозначения в обратной задаче биомеханики

Введем обозначения:

L1 – длина первого звена;

L2 – длина второго звена;

Q1 – обобщенная координата первого звена (угол наклона первого звена к оси Ox ДСК);

Q2 – обобщенная координата второго звена (угол наклона второго звена к оси Ox ДСК);

C0 – первый шарнир с координатами X0, Y0 (плечевой сустав);

C1 – второй шарнир с координатами X1, Y1 (локтевой сустав);

C2 – дистальная точка второго звена с координатами X2, Y2 (центр кисти, сжатой в кулак);

F – целевая точка с координатами Fx, Fy.

Первый этап – ввод исходных данных (рис. 2).

В ячейки B6, C6 вводятся численные значения длин звеньев модели (размерность – м).

В ячейки D6, E6 вводятся численные значения обобщенных координат звеньев модели (размерность – град).

В ячейки F6, G6 вводятся численные значения линейных координат целевой точки по осям ДСК (размерность – м).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Прямая и обратная задача робототехники - двухзвенная модель на плоскости						
2		Исходные данные задачи						
3		Длина звеньев БС		Обобщенные координаты звеньев БС		Декартовы координаты целевой точки F		
4		Звено 1	Звено2	Звено 1	Звено 2	Ось Ox	Ось Oy	
5		L1	L2	Q1	Q2	Fx	Fy	
6		0.280	0.360	60.000	45.000	0.25	0.15	

Рис. 2. Исходные данные задачи

Второй этап – решение прямой задачи биомеханики: определение координат шарниров (рис. 3).

Алгоритм решения записывается в строке формул.

Ячейка B12 (формула): =D6\*ПИ()/180

Ячейка B13 (формула): =E6\*ПИ()/180

Ячейка C12 (формула): =D6

Ячейка C13 (формула): =E6

Ячейка D12 (формула): =\$B\$6\*COS(B12)

Ячейка D13 (формула): =\$B\$6\*COS(B12)+\$C\$6\*COS(B13)

Ячейка E12 (формула): =\$B\$6\*SIN(B12)

Ячейка E13 (формула): =\$B\$6\*SIN(B12)+\$C\$6\*SIN(B13)

	A	B	C	D	E
8		Прямая задача робототехники по исходным данным			
9	№ звена, шарнира	Звено		Шарнир	
10		Q(i), рад	Q(i), град	X(i), м	Y(i), м
11	0			0	0
12	1	1.047	60.000	0.140	0.242
13	2	0.785	45.000	0.395	0.497

Рис. 3. Прямая задачи биомеханики

Третий этап – расчет промежуточных элементов (рис. 4): R (расстояние от начала ДСК до целевой точки F);  $\beta$  (угол между линией, образованной R и осью Ox ДСК);  $\varphi$  (угол между первым звеном модели и линией, образованной R); Q1 (угол между первым звеном модели и осью Ox ДСК).

Алгоритм решения записывается в строке формул.

Ячейка A18 (формула): =(F6^2+G6^2)^0.5

Ячейка B18 (формула): =(B6^2+A18^2-C6^2)/(2\*B6\*A18)

Ячейка C18 (формула): =ЕСЛИ(И(A18>ABS(C6-B6);A18<(C6+B6)); ACOS(B18);«вне раб.зоны»)

Ячейка D18 (формула): =ATAN2(F6;G6)

Ячейка E18 (формула): =D18

Ячейка F18 (формула): =ЕСЛИ(И(A18>ABS(C6-B6);A18<(C6+B6)); C18+E18;«вне раб.зоны»)

	A	B	C	D	E	F
17	1) R↓	2) cos(β)↓	2) β↓	3) atan2(φ)↓	3) φ↓	4) Q1↓
18	0.292	0.207	1.362	0.540	0.540	1.903

Рис. 4. Дополнительные элементы решения задачи

Результат вычислений для ячеек C18, E18, F18 выводится в радианах.

Четвертый этап (рис. 5) – расчет координат первого шарнира (X1, Y1), расчет промежуточных элементов (Fх-X1, Fу-Y1) и расчет обобщенной координаты второго звена (Q2), расчет координат второго шарнира (X2, Y2).

Алгоритм решения записывается в строке формул.

Ячейка A23 (формула): =ЕСЛИ(И(A18>ABS(C6-B6);A18<(C6+B6)); B6\*COS(F18); «вне раб.зоны»)

Ячейка B23 (формула): =ЕСЛИ(И(A18>ABS(C6-B6);A18<(C6+B6)); B6\*SIN(F18); «вне раб.зоны»)

Ячейка C23 (формула): =ЕСЛИ(И(A18>ABS(C6-B6);A18<(C6+B6)); F6-A23; «вне раб.зоны»)

Ячейка D23 (формула): =ЕСЛИ(И(A18>ABS(C6-B6);A18<(C6+B6)); G6-B23; «вне раб.зоны»)

Ячейка E23 (формула): =ЕСЛИ(И(A18>ABS(C6-B6);A18<(C6+B6)); ATAN2(C23;D23); «вне раб.зоны»)

Ячейка F23 (формула): =ЕСЛИ(И(A18>ABS(C6-B6);A18<(C6+B6)); E23; «вне раб.зоны»)

Ячейка G23 (формула): =ЕСЛИ(И(A18>ABS(C6-B6);A18<(C6+B6)); B6\*COS(F18)+C6\*COS(E23); «вне раб.зоны»)

Ячейка H23 (формула): =ЕСЛИ(И(A18>ABS(C6-B6);A18<(C6+B6)); B6\*SIN(F18)+C6\*SIN(E23); «вне раб.зоны»)

	A	B	C	D	E	F	G	H
21	Обратная задача робототехники							
22	X1↓	Y1↓	Fх-X1	Fу-Y1	atan2(Q2)	6) Q2↓	X2↓	Y2↓
23	-0.091	0.265	0.341	-0.115	-0.324	-0.324	0.250	0.150

Рис. 5. Процесс решения обратной задачи

Результат вычислений для ячейки F23 выводится в радианах.

Пятый этап программирования обратной задачи биомеханики – вывод результатов вычислений (рис. 6).

Алгоритм решения записывается в строке формул.

Ячейка B29 (формула): =F18

Ячейка B30 (формула): =E23

Ячейка C29 (формула): =B29\*180/ПИ()

Ячейка C30 (формула): =B30\*180/ПИ()

Ячейка D29 (формула): =A23

Ячейка D30 (формула): =G23

Ячейка E29 (формула): =B23

Ячейка E30 (формула): =H23

Ячейка F28 (формула): =F6

Ячейка G28 (формула): =G6

Ячейка H28 (формула): =G23

Ячейка I28 (формула): =H23

Ячейка F30 (формула): =ЕСЛИ(И(F28=H28;G28=I28);«подвижная точка совмещена с целевой точкой»;«задача не имеет решения»)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
25	Обратная задача биомеханики								
26	№ звена, шарнира	Звено		Шарнир		Целевая точка		Подвижная точка	
27		$Q(i), \text{ рад}$	$Q(i), \text{ град}$	$X(i), \text{ м}$	$Y(i), \text{ м}$	$F_x$	$F_y$	$X2$	$Y2$
28	0			0	0	0.250	0.150	0.250	0.150
29	1	1.903	109.016	-0.091	0.265				
30	2	-0.324	-18.582	0.250	0.150	подвижная точка совмещена с целевой точкой			

Рис. 6. Вывод результатов решения обратной задачи биомеханики

Тестирование программного обеспечения показало работоспособность и корректность функционирования программы.

### Библиографический список

1. Загrevский, В.И. Адаптивное управление как инструмент устранения двигательной ошибки спортсмена / В.И. Загrevский О.И. Загrevский // Теория и практика физической культуры. – 2020. – № 10. – С. 21-23.

2. Загrevский, В.И. Обратная задача робототехники в биомеханике физических упражнений / В.И. Загrevский, О.И. Загrevский // Олимпийский спорт и спорт для всех : материалы XX Международного конгресса (16-18 декабря 2016 г.) : в 2 ч. – СПб.: Издательско-полиграфический центр Политехнического университета, 2016. – Ч. 2. – С. 442-446.

3. Околов, А.Р. Математическое обеспечение промышленных роботов : учебно-методический комплекс для студентов специальности 1-53 01 06 «Промышленные роботы и робототехнические комплексы» : в 2 ч. / А.Р. Околов [и др.]. – Минск: БНТУ, 2012-2013. – Ч. 2: Курсовая работа. – 2013. – 60 с.