

УДК 681.5

Использование биологического прототипа при проектировании древовидных исполнительных механизмов двуногих шагающих роботов

А.К. Ковальчук

Предлагается при разработке математических моделей древовидных исполнительных механизмов двуногих шагающих роботов и их проектировании в качестве биологического прототипа использовать скелет человека. Рассмотрена математическая модель древовидного исполнительного механизма.

Приведен расчет требуемых моментов и мощности, развиваемых приводами в степенях подвижности при различных нагрузках на исполнительный механизм.

Ключевые слова: шагающий робот, древовидный исполнительный механизм, уравнение динамики робота.

When developing the mathematical models of tree-actuator of bipedal walking robots and designing it is proposed to use the human skeleton as a biological prototype. The mathematical model of the three-actuator is considered. The calculation of the required moments and power developed by the actuators in the degrees of mobility for various loads on the actuator are presented.

Keywords: walking robot, tree-like actuator, dynamic equation of robot.

При создании интеллектуального двуного шагающего робота (ДШР) возникает много научных и технических проблем. Приведем некоторые из них.

1. Для осуществления сложных координированных движений ДШР должен содержать большое количество управляемых степеней подвижности (человек имеет около 330). Управлять многозвенной системой, содержащей более 300 приводов, традиционными методами теории управления не представляется возможным. Необходимы новые методы анализа и синтеза, учитывающие специфику ДШР. Одним из перспективных направлений для построения систем управления ДШР является использование нейронных сетей.

2. Исполнительный механизм ДШР имеет переменную структуру, изменяющуюся как в процессе его движения, так и при выполнении рабочих операций. При этом образуются как разомкнутые, так и замкнутые кинематические цепи, методы анализа и синтеза которых в настоящее время недостаточно развиты.



КОВАЛЬЧУК
Александр Кондратьевич
кандидат технических
наук, доцент,
директор МИПК
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

При разработке математической модели системы приводов и алгоритмов управления ДШР необходимо учитывать кинематические ограничения в степенях подвижности.

3. С неподвижной поверхностью шагания ДШР связан только за счет сил и моментов трения. Силы реакции и трения, а также моменты трения дают важную информацию о движении ДШР и играют принципиальную роль при управлении его движением. Педипуляторы (ноги) ДШР должны быть оснащены датчиками, измеряющими силы и моменты взаимодействия робота с поверхностью шагания. В ДШР существуют неуправляемые (фиктивные) степени подвижности (стопа — поверхность шагания). Имеет место своеобразное для робототехники ситуация: мы должны управлять движением ДШР по некоторым неуправляемым (фиктивным) степеням подвижности. Эта задача носит динамический характер и требует принципиально нового подхода к управлению ДШР.

4. В процессе движения, а также при выполнении рабочих операций существенно меняются массы, моменты инерции и нагрузки на ДШР. Это требует разработки алгоритмов идентификации его кинематических и динамических параметров, причем идентификация должна осуществляться в реальном времени.

5. Бортовой источник питания ДШР располагает существенно ограниченной мощностью. Большой научный и практический интерес представляет разработка экономичной адаптивной системы приводов, управляемой многопроцессорным комплексом. Перспективным является использование нетрадиционных для современной робототехники приводов (искусственные мышцы и др.).

6. Для перемещения в изменяющейся внешней среде и выполнения рабочих операций ДШР должен быть оснащен системой технического зрения (СТЗ). Разрабатываемые в настоящее время цветные СТЗ позволят получить обширную информацию об окружающей обстановке. Большой интерес представляет создание гибрида инерциальной навигационной системы и СТЗ — навигационно-информационной системы.

7. Адаптация ДШР к внешней среде возможна лишь при наличии развитой сенсорной системы. Однако имеющиеся в настоящее время датчики громоздки и мало информативны. Создание интеллектуального ДШР требует разработки принципиально новых датчиков, позволяющих ему адаптироваться к изменяющейся внешней среде и активно в ней функционировать.

8. Разработка конструкции ДШР должна осуществляться с использованием современных легких и прочных конструкционных материалов: металлопластиков, углепластиков и др.

9. Будущее развитие робототехники неизбежно связано с достижениями в области современных нанотехнологий, позволяющих реализовать в миниатюрном объеме конструкцию, привод, всевозможные датчики и алгоритм управления.

При проектировании исполнительных механизмов (ИМ) ДШР разработчик сталкивается с проблемой выбора их кинематической схемы (КС). В работе [1] предлагается метод восстановления КС высших позвоночных животных по фотографическим изображениям их скелетов. Этот метод не всегда позволяет получить нужную разработчику КС в силу его ограниченности допущениями, которые могут не всегда выполняться на практике. Однако, полученная модель КС может явиться прототипом, обеспечивающим дальнейшую разработку модели робота. Полученная КС может использоваться для описания кинематики и динамики робота с помощью блочно-матричного представления [2, 3].

В качестве биологического прототипа для построения КС ДШР взят скелет человека, имеющий более 300 степеней подвижности. Технически воссоздать такую КС в настоящее время невозможно. Упрощенная КС человека, имеющая 114 степеней подвижности, представлена на рис. 1. В соответствии с работами [2, 3] направленный граф достижимости звеньев такой КС представлен на рис. 2. Создание шагающего робота с такой КС — интересная научная и инженерная проблема, которая ждет своих исследователей.

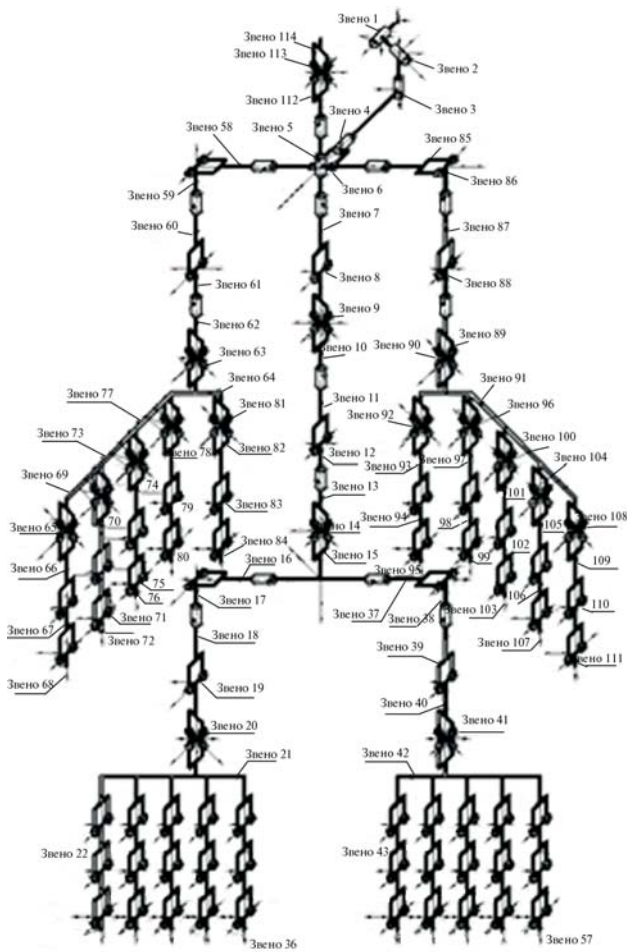


Рис. 1. Упрощенная кинематическая схема человека

Автор предлагаемой статьи ограничился рассмотрением и исследованием КС роботизированного манекена (РМ). Он должен иметь антропоморфную кинематическую структуру с массо-габаритными параметрами человека, и выполнять те же движения, которые будет выполнять человек в создаваемом защитном костюме (бег, приседания, прыжки и т. д.), с динамическими характеристиками, свойственными человеку. Это накладывает специфические требования на ИМ РМ:

- геометрические характеристики звеньев такие же, как у человека;
- ИМ должен иметь количество степеней подвижности, достаточное для обеспечения кинематического подобия с движениями человека;
- кинематические, динамические и массо-габаритные характеристики приводов должны соответствовать аналогичным характеристикам человека;

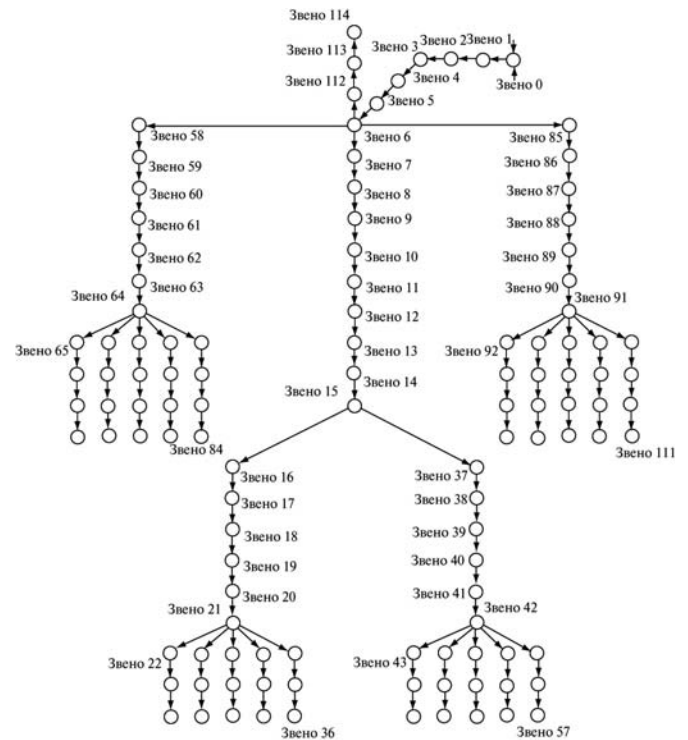


Рис. 2. Направленный граф достижимости звеньев для упрощенной КС человека

- конструкция звеньев ИМ должна обладать достаточной прочностью, быть стойкой к воздействию агрессивной среды, в которой будут проводиться испытания защитной одежды, и обеспечивать простоту монтажа в испытательных камерах;

- испытательный комплекс с манекеном должен иметь гибкую программную структуру и развитый интерфейс, обеспечивающий его быстрое перепрограммирование при изменении режимов движений и методик испытаний.

Среди работ по созданию РМ можно выделить создание манекена в исследовательском центре Battelles Applied Physics Тихоокеанских северо-западных лабораторий (США), предназначенный для испытания защитной одежды в смоделированных ситуациях, когда есть риск для жизни людей [2].

В МГТУ им. Н.Э. Баумана создан экспериментальный образец РМ (рис. 3), предназначенный для испытания защитной одежды на герметичность в специальных испытательных камерах с агрессивной средой [3]. Образец РМ представляет собой комплекс, включающий антропоморфный ИМ с электрогидравлическими приводами, насосную станцию и компьютерную систему управления. Для проведения испытаний защитной одежды ИМ с надетой на нем испытываемой одеждой помещается в испытательную камеру, в которой создается воздействие на него агрессивной среды. По командам оператора ИМ в защитной одежде выполняет запрограммированную серию требуемых движений, имитирующих движения человека. С помощью специализированных датчиков, установленных на ИМ под защитной одеждой, оценивается прочность, надежность и эффективность испытываемых средств защиты. Система управления и насосная станция, вынесенные за пределы испытательной камеры, обеспечивают управление движением ИМ с электрогидравлическими приводами. Пере-



Рис. 3. Роботизированный манекен, созданный в МГТУ им. Н.Э. Баумана

дача информативных сигналов между ИМ и системой управления осуществляется по кабелю. Гидравлическая энергия на гидроприводы передается по трубопроводам, вмонтированным в кронштейн крепления ИМ в испытательной камере.

Конструкция ИМ РМ, оснащенного электрогидравлическими следящими приводами (ЭГСП), представлена на рис. 4.

На роботизированном манекене установлены электрогидравлические приводы, замкнутые обратными связями по положению. В качестве датчиков обратной связи использованы потенциометрические датчики, расположенные внутри шарниров. В сочленениях установлены только исполнительные гидроцилиндры. Двухкаскадные электрогидравлические усилители расположены на единой плите в корпусе РМ и соединены с гидроцилиндрами гибкими шлангами. Такая компоновка элементов ЭГСП на РМ позволяет надевать на него различные костюмы, в том числе с капюшоном, а также противогаз.

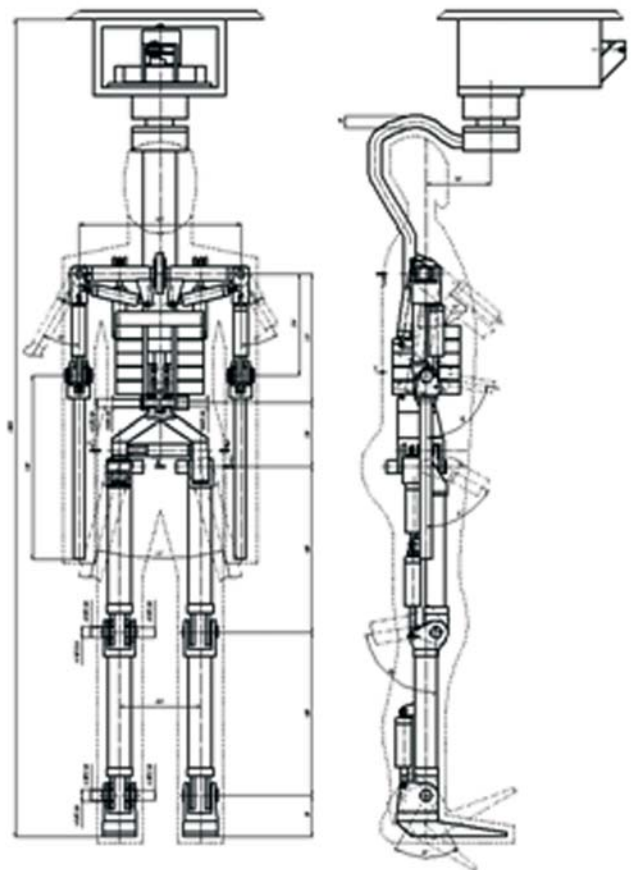


Рис. 4. Конструкция ИМ РМ

Основные технические характеристики ИМ РМ приведены ниже:

Габариты	Соответствие телу человека
Число степеней подвижности	15
Число степеней подвижности руки	3
Число степеней подвижности ноги	4
Число степеней подвижности корпуса	1
Диапазон отклонений руки от вертикали	90° вперед, 10° назад, 90° в сторону, 10° к себе
Диапазон сгибания в пояснице	45° вперед, 15° назад
Диапазон отклонения ноги в тазобедренном суставе	60° вперед и в сторону, 30° назад и 15° к себе
Диапазон сгибания руки в локтевом и ноги в коленном суставе	90°
Диапазон качания ступней	20° вверх, 60° вниз
Максимальная скорость воспроизведения испытательных движений	60 циклов в минуту
Давление питания гидроприводов	20 МПа
Рабочая жидкость в гидросистеме РМ	масло АМГ-10
Максимальная скорость воспроизведения испытательных движений	60 циклов в минуту
Число ЭГСП	15
Частота замыкания контуров ЭГСП	1000 Гц
Частота контура регулятора формирования траектории движения РМ	100 Гц
Тип управляющей ЭВМ	IBM-совместимый персональный компьютер
Разрядность ЦАП, АЦП	12
Задание траектории движения	Программное формирование на управляющей ЭВМ Воспроизведение от дополнительного внешнего задающего устройства

Разработанный РМ может работать как в режиме отработки заданной траектории движения в обобщенных координатах, так и в копирующем режиме при задании входных сигнала

лов управления движением от внешнего источника. При этом управление может осуществляться как по положению, так и по развиваемым моментам в сочленениях (при установке соответствующих гидроприводов). В связи с этим встает задача определения требуемых усилий, развиваемых приводами, необходимых для обеспечения заданного движения, как на этапе выбора устанавливаемых приводов, так и на этапе управления РМ.

Математическая модель ИМ, учитывающая особенности его кинематической структуры, получена с использованием методики составления блочно-матричных математических моделей ИМ, имеющих ветвящуюся кинематическую структуру [4, 5]. Кинематическая схема ИМ представляется в виде древовидного направленного графа (рис. 5).

Звенья в таком графе представляются вершинами, а соединяющие их сочленения — дугами. Поскольку ИМ РМ закрепляется в испытательной камере через кронштейн за туловище, то принимаем, что верхняя часть туловища неподвижна и определяем его как звено с номером 0 (корень дерева). Остальные звенья ИМ нумеруем, начиная с 1 по возрастающей без пропусков, двигаясь от корня дерева к его листьям. При этом номер обобщенной координаты ИМ, как и номер соответствующего сочленения, такой же, как и у звена, присоединяемого этим сочленением к предыдущему звену.

Уравнение движения ИМ, имеющего древовидную кинематическую структуру, относительно обобщенных координат записывается в виде

$$A(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - C(\mathbf{q}) {}^0\mathbf{f}_b - H(\mathbf{q}) {}^0\mathbf{n}_b = \boldsymbol{\tau}, \quad (1)$$

где $A(\mathbf{q})$, $B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $C(\mathbf{q})$ и $H(\mathbf{q})$ — матричные коэффициенты, вычисляемые в соответствии с приведенными ниже зависимостями; \mathbf{q} — вектор обобщенных координат исполнительного механизма; $\boldsymbol{\tau}$ — вектор сил, моментов, развиваемых приводами робота; ${}^0\mathbf{f}_b$, ${}^0\mathbf{n}_b$ — блочные матрицы внешних сил и моментов, приложенных к звеньям со стороны окружающей среды.

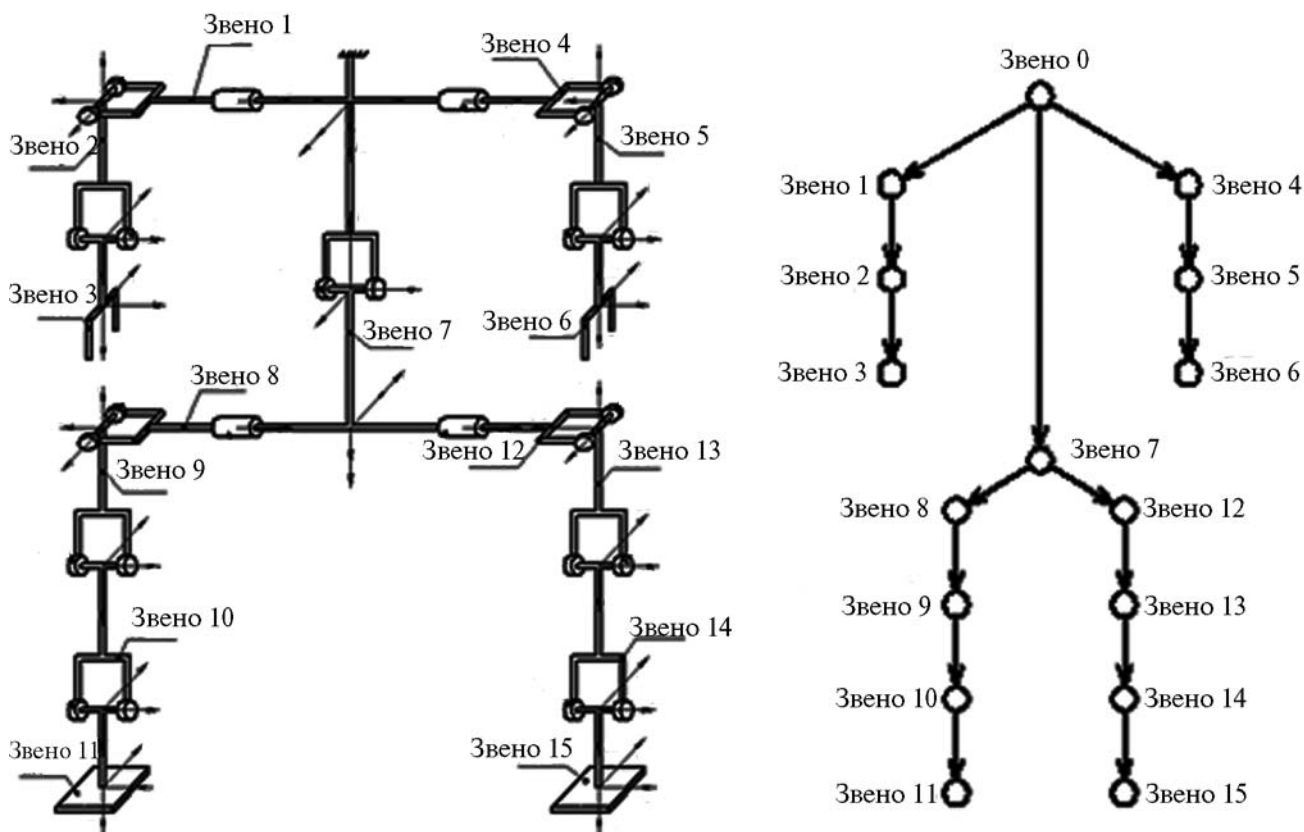


Рис. 5. Кинематическая схема РМ и описывающий ее древовидный граф

$$\begin{aligned}
 A(\mathbf{q}) &= \sigma \left({}^0\mathbf{z}^d \right)^m \left(-\left(\Lambda \left({}^0\mathbf{c}_{f_d}^p \right) \right)^m \mathbf{m}^d \left(D {}^0\mathbf{z}^d (E - \sigma) + \Lambda^m \left({}^0\mathbf{c}_{f_d} \right) {}^0\mathbf{z}^d \sigma \right) + \right. \\
 &+ D^m {}^0\mathbf{J}_C^d D {}^0\mathbf{z}^d \sigma \left. \right) + (E - \sigma) \left({}^0\mathbf{z}^d \right)^m D^m \mathbf{m}^d \left(D {}^0\mathbf{z}^d (E - \sigma) + \Lambda^m \left({}^0\mathbf{c}_{f_d} \right) {}^0\mathbf{z}^d \sigma \right); \\
 B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= \sigma \left({}^0\mathbf{z}^d \right)^m \left\{ -\left(\Lambda \left({}^0\mathbf{c}_{f_d}^p \right) \right)^m \mathbf{m}^d \left[\Lambda^m \left({}^0\mathbf{c}_{f_d} \right) \Lambda^m \left({}^0\mathbf{z}^d \sigma \dot{\mathbf{q}}^d \right) (D - E) + \right. \right. \\
 &+ \Lambda^m \left(\Lambda^m \left({}^0\mathbf{c}_{f_d} \right) \sigma \dot{\mathbf{q}}^d {}^0\mathbf{z}^d D + \Lambda^m \left({}^0\mathbf{c}_{f_d} \right) \left((D - E) \sigma {}^0\mathbf{z}^d \dot{\mathbf{q}}^d \right)^d \right) + \\
 &+ 2D \Lambda^m \left({}^0\mathbf{z}^d (E - \sigma) \dot{\mathbf{q}}^d \right) (D - E) \left. \right] + \\
 &+ D^m {}^0\mathbf{J}_C^d D \sigma \dot{\mathbf{q}}^d \Lambda^m \left({}^0\mathbf{z}^d \right) (D - E) + D^m \Lambda \left(D {}^0\mathbf{z}^d \sigma \dot{\mathbf{q}}^d \right) {}^0\mathbf{J}_C^d D \left. \right\} {}^0\mathbf{z}^d \sigma \dot{\mathbf{q}} + \\
 &+ (E - \sigma) \left({}^0\mathbf{z}^d \right)^m D^m \mathbf{m}^d \left[\Lambda^m \left({}^0\mathbf{c}_{f_d} \right) \Lambda^m \left({}^0\mathbf{z}^d \sigma \dot{\mathbf{q}}^d \right) (D - E) + 2D \Lambda^m \left({}^0\mathbf{z}^d (E - \sigma) \dot{\mathbf{q}}^d \right) (D - E) + \right. \\
 &+ \Lambda^m \left(\Lambda^m \left({}^0\mathbf{c}_{f_d} \right) \sigma \dot{\mathbf{q}}^d {}^0\mathbf{z}^d D + \Lambda^m \left({}^0\mathbf{c}_{f_d} \right) \left((D - E) \sigma {}^0\mathbf{z}^d \dot{\mathbf{q}}^d \right)^d \left. \right] {}^0\mathbf{z}^d \sigma \dot{\mathbf{q}}; \\
 C(\mathbf{q}) &= \sigma \left({}^0\mathbf{z}^d \right)^m \left((D^m - E) \Lambda \left({}^0\mathbf{s}^d \right) D^m + D^m \Lambda \left({}^0\mathbf{t}^d \right) \right) + (E - \sigma) \left({}^0\mathbf{z}^d \right)^m D^m; \\
 H(\mathbf{q}) &= \sigma \left({}^0\mathbf{z}^d \right)^m D^m.
 \end{aligned}$$

Для того чтобы блочно-матричное уравнение (1) динамики ИМ, имеющего древовидную кинематическую структуру, описывало движение рассматриваемого в данной статье манекена, используем обозначения, приведенные в работе [5], и представим требуемые параметры ИМ в блочно-матричном виде.

Составим матрицу достижимости звеньев исполнительного механизма D , описывающую взаимное расположение звеньев исполнительного механизма РМ (см. рис. 5):

$$D_{15 \times 15} = \begin{pmatrix} U_{3 \times 3} & \Theta_{3 \times 3} & \Theta_{3 \times 1} & \Theta_{3 \times 4} & \Theta_{3 \times 4} \\ \Theta_{3 \times 3} & U_{3 \times 3} & \Theta_{3 \times 1} & \Theta_{3 \times 4} & \Theta_{3 \times 4} \\ \Theta_{1 \times 3} & \Theta_{1 \times 3} & I_{1 \times 1} & \Theta_{1 \times 4} & \Theta_{1 \times 4} \\ \Theta_{4 \times 3} & \Theta_{4 \times 3} & \Theta_{4 \times 1} & U_{4 \times 4} & \Theta_{4 \times 4} \\ \Theta_{4 \times 3} & \Theta_{4 \times 3} & \Theta_{4 \times 1} & \Theta_{4 \times 4} & U_{4 \times 4} \end{pmatrix},$$

где $U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}$; I — матрица, все эле-

менты которой равны 1; Θ — нулевая матрица.

Матрица z , определяющая направление осей связанных систем координат РМ и их взаимное расположение, имеет вид

$${}^0 z = ({}^0 \bar{z}_{0,1}, {}^0 \bar{z}_1, {}^0 \bar{z}_2, {}^0 \bar{z}_{0,2}, {}^0 \bar{z}_4, {}^0 \bar{z}_5, {}^0 \bar{z}_{0,3}, {}^0 \bar{z}_7, {}^0 \bar{z}_8, {}^0 \bar{z}_9, {}^0 \bar{z}_{10}, {}^0 \bar{z}_{0,4}, {}^0 \bar{z}_{12}, {}^0 \bar{z}_{13}, {}^0 \bar{z}_{14})^m.$$

Матрица $\sigma^d = \text{diag}(\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_N)$ коэффициентов, определяющих типы сочленений звеньев РМ становится единичной матрицей.

Так же определяются:

$m = (m_1, m_2, \dots, m_{15})^m$ — матрица масс звеньев ИМ РМ;

$J_C = (J_{C_1}, J_{C_2}, \dots, J_{C_{15}})^m$ — блочная матрица тензоров инерции звеньев;

${}^0 t^d = \text{diag}({}^0 \bar{t}_1^m, {}^0 \bar{t}_2^m, \dots, {}^0 \bar{t}_{15}^m)$ — блочная диагональная матрица векторов, соединяющих начала соответствующих систем координат звеньев-отцов с точками, через которые прохо-

дят равнодействующие внешних сил, приложенных к звеньям.

Моделирование древовидного ИМ РМ проведено в среде Matlab с помощью специально разработанного программного комплекса, состоящего из набора процедур, записанных в виде m -файлов. Достоинством комплекса является то, что он применим для исследования ИМ с произвольной древовидной КС.

Особенность конкретной КС отражается в содержании пускового файла, в котором находится информация о структуре КС, массах, моментах инерции, координатах центров масс и других параметрах ИМ.

Уравнение (1) с определенными выше матричными коэффициентами позволяет рассчитывать моменты и мощности, развиваемые приводами, необходимые для обеспечения заданных программных движений РМ. Три типовые схемы движения ИМ РМ приведены на рис. 6.

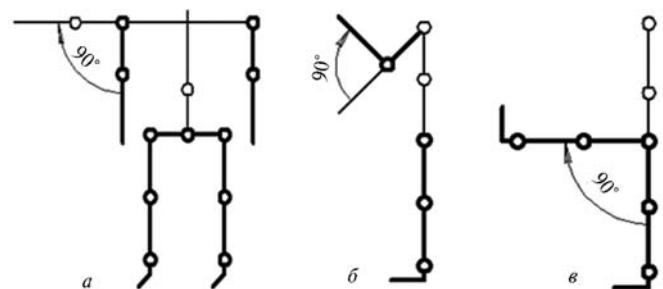


Рис. 6. Схемы движения РМ при исследовании моментов и мощностей в сочленениях ИМ:

a — подъем руки вбок; b — сгиб руки в локте; v — маховое движение ноги вперед

Во всех этих схемах принимается, что движение осуществляется при изменении углов в соответствующих сочленениях по гармоническому закону. Исследования проводились при различных массах грузов, перемещаемых РМ. Максимальные моменты и мощности, развиваемые приводами, необходимые для обеспечения заданных движений звеньев исполнительного механизма РМ, приведены в таблице.

Максимальные моменты и мощности, развиваемые приводами РМ при рассматриваемых типовых движениях звеньев

Масса груза, кг	Подъем руки вбок (рис. 6, а)		Сгиб руки в локте (рис. 6, б)		Маховое движение ноги вперед (рис. 6, в)	
	M_{2max} , Н·м	N_{2max} , Вт	M_{3max} , Н·м	N_{3max} , Вт	M_{9max} , Н·м	N_{9max} , Вт
0	10,4	25,3	1,8	2,16	16,8	20,7
2	28,4	69,3	5	6,2	24	29,7
5	55,5	135,2	9,9	12,2	34,9	43
10	100,6	245,2	17,98	22,2	53,12	65,53
15	145,72	355,1	26,1	32,2	71,3	87,98
20	190,83	465,1	34,2	42,2	89,5	110,4

Выводы

При разработке математических моделей древовидных ИМ ДШР в качестве биологического прототипа предлагается использовать скелет человека.

Предложена математическая модель древовидного ИМ РМ. Моделирование РМ проведено в среде Matlab с помощью специально разработанного программного комплекса, позволяющего исследовать ИМ с произвольной древовидной КС.

Рассчитанные при различных внешних нагрузках на звенья ИМ РМ требуемые моменты и мощности, развиваемые приводами в степенях подвижности РМ, могут стать основой для проектирования его системы приводов.

Литература

1. Пупков К.А., Ковальчук А.К., Кулаков Б.Б. Использование биологических прототипов при построении кинематических схем современных шагающих роботов // Вестник РУДН. Инженерные исследования. М., 2009. № 4. С. 44–54.
2. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Математическое описание кинематики и динамики исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой // Изв. вузов. Машиностроение. М., 2008. № 11. С. 13–25.
3. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Блоч-но-матричные уравнения движения исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой // Изв. вузов. Машиностроение. М., 2008. № 12. С. 5–21.
4. Human-like robotics mannequin works up a sweat // Industrial Engineering (USA). 1988. Vol. 20. № 8.
5. Лобачев В.И., Ковальчук А.К. Расчет параметров и характеристик гидропривода автоматического манипулятора // Методические указания к выполнению домашнего задания по курсу «Гидравлические устройства автоматических манипуляторов». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 21 с.

Статья поступила в редакцию 01.09.2011 г.