

# АДАПТИВНОЕ СИЛО-ИМПЕДАНСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРИВодОВ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ

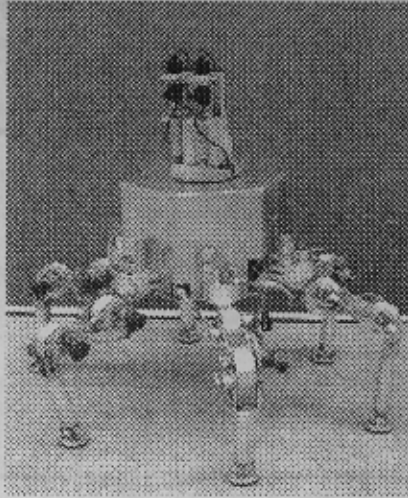
Скляренко Е.Г.

Донецкий национальный технический университет

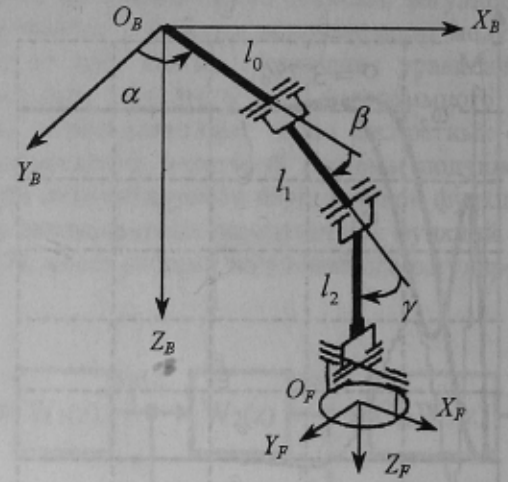
e-mail: seg@kita.dgtu.donetsk.ua

The object of this paper is an intelligent drive control of the legged robot. A combination of force control and impedance control is used. Reaction forces strictly depend on ground characteristics during the impact phase. Through information of the neural environment model parameters of the force controller could be determined. The achieved results have shown that those adjustments guarantee an acceptable system behaviour.

В рамках сотрудничества ДонНТУ и Магдебургского университета проводятся исследования по проблемам интеллектуального управления в робототехнических системах. Одним из объектов исследований служит прототип шагающего робота "Katharina", разработанного Фраунхофер-институтом (Магдебург, Германия). Особенность данного робота состоит в наличии датчиков силы контакта ног робота с поверхностью. Конструкция робота и кинематическая схема одной из шести его ног приведены на рис. 1.



а)



б)

Рисунок 1 - Шагающий робот "Katharina" (а) и кинематическая схема его ноги (б) [Fraunhofer IFF]

Кинематическая цепь ноги имеет три активные вращательные степени подвижности с электроприводами постоянного тока. В каждом приводе использован двигатель постоянного тока ( $P_{д ном} = 20$  Вт,  $U_{д ном} = 24$  В,  $n_{д ном} = 9550$  об/мин) с возбуждением от постоянных магнитов и со встроенным импульсным датчиком скорости. Положение звеньев ноги определяется вектором угловых координат  $\mathbf{q} = (\alpha, \beta, \gamma)^T$  и оценивается при помощи потенциометров на выходе редукторов. На основе этих данных может быть вычислен вектор декартовых координат положения ступни  $\mathbf{s} = (x, y, z)^T$  в системе координат ноги  $O_B X_B Y_B Z_B$ . Вектор сил контакта ноги с поверхностью  $\mathbf{F}_F = (F_F^x, F_F^y, F_F^z)^T$  в системе координат ступни  $O_F X_F Y_F Z_F$  измеряется трехкомпонентным тензорным датчиком усилия, расположенным в голени. Питание двигателей осуществляется от транзисторных мостовых широтно-импульсных преобразователей напряжения. Данные компоненты доказали на практике свою надежность и находят применение во многих системах электроприводов роботов.

Движение шагающего механизма возникает вследствие синхронного взаимодействия его ног, отрабатывающих шаговые циклы [1]. В шаговом цикле каждой ноги можно выделить три фазы:

- ❶ Фаза переноса:  
нога отрывается от грунта и свободно перемещается в следующую точку опоры.
  - ❷ Фаза контакта:  
переход от свободного перемещения ноги к контакту.
  - ❸ Фаза опоры:  
нога жестко опирается на грунт, удерживает тело робота и перемещает его вперед.
- Граф взаимных переходов между указанными фазами шагового цикла представлен на рис. 2а, траектория движения ступни – на рис. 2б.

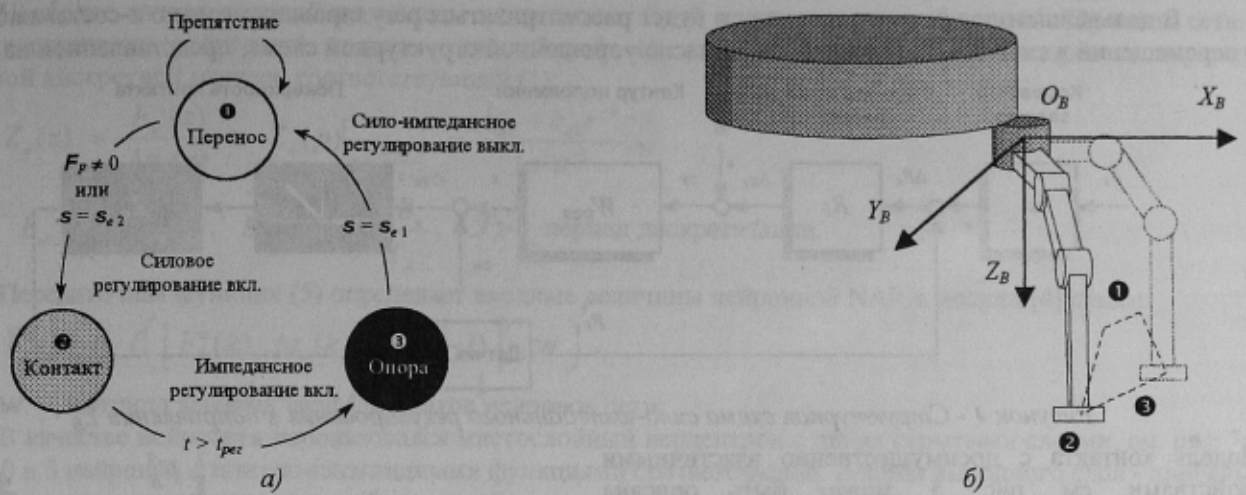


Рисунок 2 - Фазы шагового цикла (а) и движение ноги робота "Katharina" в шаговом цикле (б)

Проблема уклонения от препятствий на пути движения ноги в фазе переноса должна решаться на уровне планирования движений путем коррекции заданной траектории переноса ноги. Тогда для управления ногой в фазе переноса достаточно системы позиционирования, состоящей из классических контуров регулирования положения звеньев ноги. Каждый контур положения может быть построен, например, по принципу подчиненного регулирования. Регуляторы положения могут быть линейными, т.к. скачкообразных заданий на положение не предполагается. Вопросы построения контура регулирования скорости с нейрорегулятором тока для компенсации нелинейности характеристик силового преобразователя в режиме прерывистого тока рассмотрены в [2]. Реализация движений при силовом контакте робота со средой более проблематична. Одной системы позиционирования здесь недостаточно, и должны применяться методы сило-позиционного регулирования. Обширная классификация таких методов представлена, например, в [3]. Т.к. движение шагающего робота в общем случае происходит по неровной поверхности, то в фазе контакта кинетическая энергия движения ноги должна эффективно гаситься приводами за счет активируемого силового регулирования. Недостаточное демпфирование грозит механическими повреждениями либо потерей контакта или даже автоколебаниями. Если же в предполагаемой точке опоры (с координатами  $S_e$ ) контакт отсутствует, то действие силового контура должно вызывать движение в направлении к поверхности контакта. В фазе опоры распределение веса робота на ступни нескольких ног неопределено. Классическое регулирование сил, как отработка заданий, в данном случае невозможно. Особое значение здесь приобретают методы реализации активной податливости (импедансного регулирования) [3]. За счет поддержания заданного соотношения между силой контакта и перемещением ступни (в различных направлениях может быть различно), ноги робота будут действовать как активные пружины [1], а пластичность грунта не будет влиять на положение тела робота (его устойчивость). При реализации силового контакта шагающего робота со средой представляется целесообразным объединить силовое и импедансное регулирование в одном алгоритме, добавив в схему импедансного регулирования с вложенным контуром позиционирования элемент сравнения и силовое задание  $F_s$ , см. рис. 3.



Рисунок 3 - Структурная схема сило-импедансного регулирования

Пропорциональный сило-импедансный регулятор  $R_F$  (диагональная матрица) с силовым датчиком и матрицей преобразования сил (матрица Якоби)  $J_{BF}^T$  образуют внешний контур. Ему подчинены контуры регулирования положения звеньев ноги (контуры скорости и тока на рис.3 условно не показаны). Регулирование положения ведется в угловых координатах датчиков  $q$ , а регулирование силы – в декартовой системе координат ноги. Сигнал сило-импедансного регулятора  $\Delta s_F$  является коррекцией задания на положение ступни  $s_s$ . Скорректированное таким образом задание  $s_F$  преобразуется с помощью инверсной кинематики  $T_{qB}^{-1}$  в задание на угловые координаты  $q_s$ , которое обрабатывается контурами регулирования положения звеньев ноги.

В дальнейшем для упрощения анализа будет рассматриваться регулирование только z-составляющей сил и перемещений в системе координат ноги согласно упрощенной структурной схеме, представленной на рис 4.

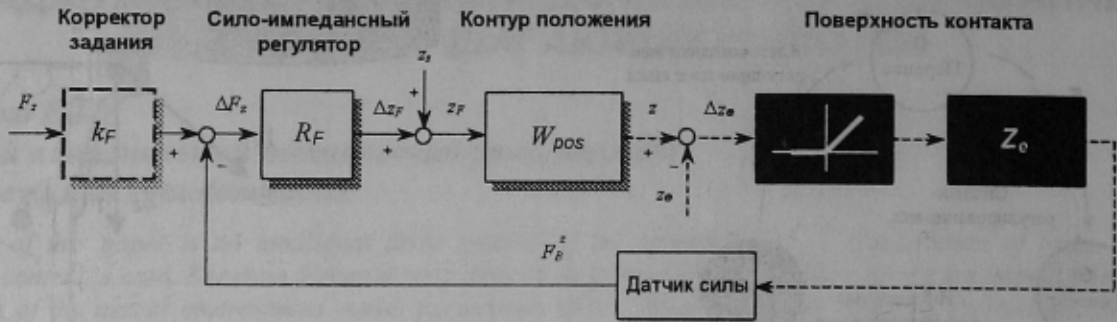


Рисунок 4 - Структурная схема сило-импедансного регулирования в направлении  $Z_B$

Модель контакта с преимущественно эластичными свойствами, см. рис. 5, может быть описана следующей передаточной функцией, называемой импедансом среды:

$$Z_e(p) = \frac{F_B^z(p)}{\Delta z_e(p)} = B_e p + K_e, \quad (1)$$

где  $B_e, K_e$  - коэффициент демпфирования и коэффициент жесткости среды;

$\Delta z_e$  - глубина проникновения в среду.

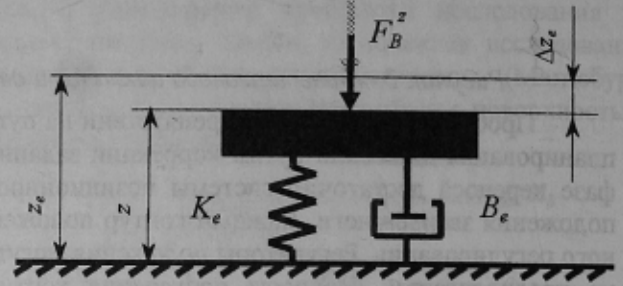


Рисунок 5 - Модель контакта

На основе упрощенной структурной схемы могут быть получены передаточная функция замкнутого контура регулирования силы и импеданс системы (в данном случае податливость). Если принять, что контуры регулирования положения оптимизированы по модульному оптимуму, то в стационарном режиме при  $F_s = \text{const}$  будут выполняться следующие соотношения:

$$\left. \frac{F_B^z}{F_s} \right|_{t \rightarrow \infty} = \frac{R_F K_e}{1 + R_F K_e}, \quad \left. \frac{\Delta F_z}{\Delta z_F} \right|_{t \rightarrow \infty} = \frac{K_e}{1 + R_F K_e}. \quad (2)$$

Для компенсации статической ошибки по силе может быть применен корректор задания:

$$k_F = 1 + \mu, \quad (3)$$

при настройке регулятора силы:

$$R_F = \frac{1}{\mu K_e}. \quad (4)$$

Применение интегральной части в регуляторе силы нецелесообразно, т.к. этот же регулятор используется и для импедансного регулирования. Интегратор привел бы к нулевому импедансу системы (исчезновению активной податливости). Следует отметить, что при бесконечной жесткости среды ( $K_e \rightarrow \infty$ ) установившееся значение силы и без использования корректора задания становится равно заданию, а импеданс системы -  $1/R_F$ . Если же исходить из того, что поверхность контакта реальная, то для обеспечения точности регулирования силы и, соответственно, достижения заданного импеданса системы, должна идентифицироваться, как минимум, жесткость среды. Это подтверждается экспериментальными исследованиями контакта с жесткой поверхностью (металл,  $K_{e1} \approx 8500$  Н/м), см. рис. 6а, и мягкой поверхностью (пенопласт,  $K_{e2} \approx 2000$  Н/м), см. рис. 6б. При ошибочной оценке жесткости среды, наличии существенного демпфирования среды и нелинейном характере этих параметров в системе возникают автоколебания.

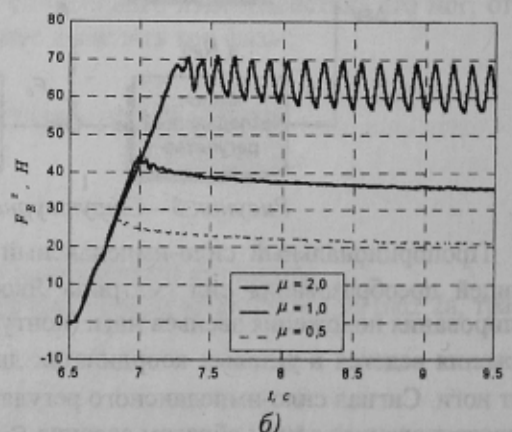
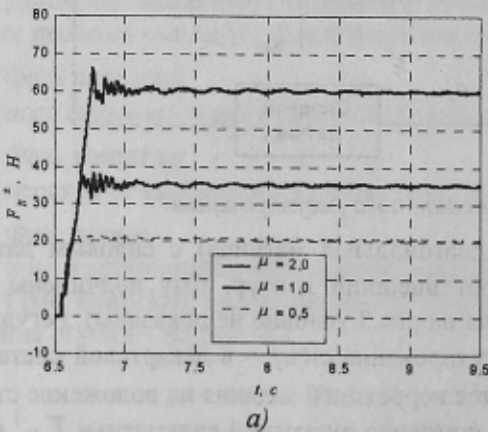


Рисунок 6 - Контакт с жесткой (а) и мягкой (б) поверхностью

Наиболее точная нелинейная модель среды может быть получена путем обучения нейронной сети. За счет линеаризации нейронной модели в каждой рабочей точке [4] можно идентифицировать параметры линейной дискретной модели, соответствующей (1):

$$Z_e(z) = \frac{F_B^z(z)}{\Delta z_e(z)} \approx Z_e(p) \Big|_{p=\frac{2z-1}{T_A z+1}} = \frac{b_{e0} + b_{e1}z^{-1}}{1 + z^{-1}}, \quad (5)$$

где  $b_{e0} = K_e + \frac{2B_e}{T_A}$ ,  $b_{e1} = K_e - \frac{2B_e}{T_A}$ ,  $T_A$  - период дискретизации.

Передаточная функция (5) определяет входные величины нейронной NARX модели [4] среды:

$$\hat{F}_B^z(k) = f \left( \left[ F_B^z(k), \Delta z_e(k), \Delta z_e(k-1) \right]^T, \mathbf{w} \right). \quad (6)$$

где  $\mathbf{w}$  - матрица весовых коэффициентов нейронов сети.

В качестве нейросети использовался многослойный перцептрон с двумя скрытыми слоями, см. рис. 7а. В них - 10 и 5 нейронов с тангенс-сигмоидными функциями соответственно. Нейрон выходного слоя - линейный.

Эксперимент по проверке работоспособности адаптивного регулирования предполагал приближение к точке контакта, контакт с желаемым усилием 35Н, подъем ноги и повторение цикла. В каждом цикле производилась тренировка нейромодели в режиме offline и определение параметров линейного сило-импедансного регулятора при  $\mu = 2$ . Период дискретности регуляторов системы - 1 мс. При старте была задана заведомо неправильная жесткость среды 4000 Н/м. Результаты тренировки нейромодели для двух поверхностей представлены на рис. 7б и 7с, а переходные процессы регулирования силы контакта (три цикла) – на рис. 8.

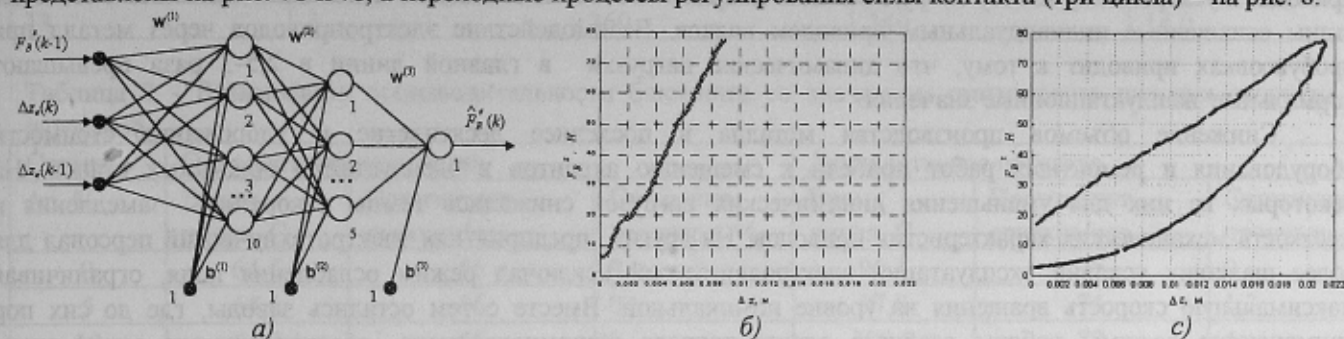


Рисунок 7 - Нейромодель среды (а) и выученные характеристики жесткой (б) и мягкой (с) поверхностей

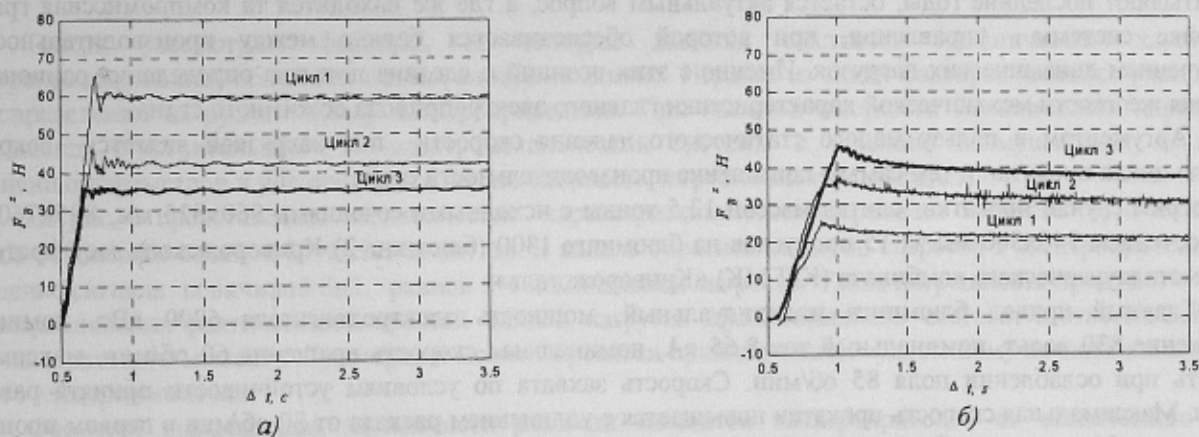


Рисунок 8 - Контакт с жесткой (а) и мягкой (б) поверхностью (адаптивное регулирование)

Разработанная система сило-импедансного регулирования обеспечивает формирование надежного контакта с поверхностью с неизвестными нелинейными параметрами, смягчение жесткого импеданса системы позиционирования ноги шагающего робота (активную подагливость) и, как следствие, удержание веса робота без существенного изменения положения тела робота.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Schmucker, U.; Schneider, A.; Ihme, Th.: Force control for legged robots. SYROCO '97, France, 1997.
2. Скляренко, Е.Г.; Старостин, С.С.: Нейрорегулятор тока силового преобразователя в системе электропривода с цифровым управлением. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика // Вестник НТУ "ХПИ". Специальный выпуск 10. - Харьков: НТУ "ХПИ". - 2001. - С.438-440.
3. Vukobratovic, M.K.; Surdilovic, D.T.: Control of robotic systems in contact tasks: an overview // Известия академии наук. Теория и системы управления. - № 5. - 1997. - С.173-192.
4. Nørgaard, M.: Neural networks for modelling and control of dynamic systems: a practitioner's handbook. London: Springer, 2000.