

УДК 621.446

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ШАГОВОГО ЦИКЛА ШЕСТИНОГО ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА.

**Антоменюк А.В., студент; Рафиков Г.Ш. доцент, к.т.н.**

*(Донецкий Национальный Технический Университет, г. Донецк, Украина)*

Организация движения живых существ по поверхности земли издавна привлекала внимание исследователей. Особенно широкое распространение среди сухопутных животных имеет способ перемещения с помощью ног.

Мощный импульс исследования в направлении создания шагающих машин учёные получили в связи с появлением малогабаритных средств автоматики и вычислительной техники, развитием теории управления и информатики. Для решения проблемы создания автоматических шагающих аппаратов с высокой степенью автономии большое значение имеют исследования, посвященные разработке передвигающихся устройств различных типов, способных самостоятельно ориентироваться в окружающей обстановке и выполнять те или иные возложенные на них функции. Необходимость появления таких устройств диктуется насущными потребностями науки и техники сегодняшнего дня, а также недалекого будущего. Исследование труднодоступных и опасных районов Земли и дна океана, космоса и поверхности планет в решении этих проблем существенный вклад может внести использование автоматических аппаратов, снабженных элементами искусственного интеллекта.

Целью данной работы является анализ походок и получение уравнений генератора шагового цикла при регулярной походке шагающего аппарата.

Походка искусственной локомоционной системы представляет собой взаимосогласованное движение ног и корпуса, в результате которого система перемещается из одной точки пространства в другую. Периодическая походка – походка, при которой одинаковые состояния любой ноги в последовательных шагах повторяются через один и тот же интервал времени, равный времени цикла  $T$ ; в противном случае походка будет непериодической. Основными периодическими походками являются волновые и равнофазные походки.

Волновые походки (рис. 1) относятся к числу наиболее устойчивых регулярных походок. При равнофазной походке события подъёма и опускания ног равномерно распределены по циклу ходьбы.

Волновые походки могут быть охарактеризованы лишь тремя параметрами: сдвигом фазы  $\varphi$  между моментами постановки задних ног относительно направления движения корпуса ног противоположных сторон, относительным временем  $\tau$  между моментами постановки соседних ног и характеристикой режима  $\lambda$ .

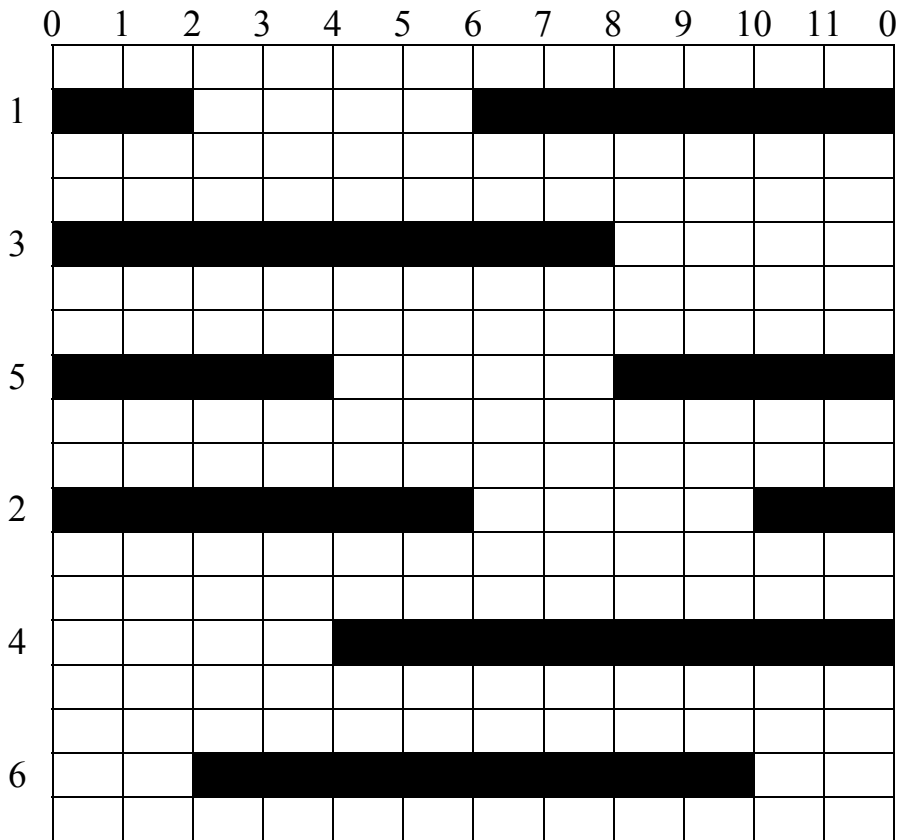


Рисунок 1 – Диаграмма волновой походки шагающего аппарата.

Сдвиг фазы при волновой походке определяется равенством  $\varphi=0,5$ , так как в этой походке промежуток времени от момента постановки задней правой ноги до момента постановки задней левой, в силу периодичности, равен промежутку времени от момента постановки задней левой ноги до момента постановки задней правой и равен половине периода походки. С другой стороны, указанные интервалы между моментами постановки задних ног равны. Интервал времени между моментами постановки задней правой и задней левой ног составляет  $\varphi T$ , где  $T$  – период походки. Интервал времени между моментом постановки задней левой ноги и задней правой составляет  $(1-\varphi)T$ . Приравнявая эти интервалы, находим  $\varphi=0,5$ . Таким образом, задние симметричные ноги работают в противофазе. Значит, и все остальные симметричные ноги будут работать в противофазе, и походка будет симметричной.

Если ограничиться перемещениями шагающего аппарата по твёрдой поверхности с малыми неровностями и с большим коэффициентом трения, то построение движения может быть осуществлено сравнительно простыми средствами, поскольку любая точка такой поверхности допустима для наступания. Перемещение шагающего аппарата в этом случае может быть реализовано с помощью метода управляемых генераторов шагового цикла. Организация такого движения может происходить на основе регулярной походки, когда ноги аппарата совершают ритмические движения.

В качестве примеров рассмотрим несколько типов симметричных волновых походок для наших аппаратов, предполагая, что перенос ног осуществляется достаточно быстро:  $1-\lambda < \tau$ .

Последовательная походка. Положим  $\tau=1/6$ . Последовательные моменты начала переноса для всех ног отделены друг от друга постоянным интервалом  $T/6$ . Пройдя вдоль ног одной стороны, волна переходит на другую, потом возвращается и так далее. Количество ног, находящихся в опорной фазе опоры, попеременно составляет пять или шесть.

Будем постепенно увеличивать  $\tau$ , сохраняя неизменными  $\lambda$  и  $\varphi$ . Волны переноса каждой стороны сохраняются неизменными по своей структуре. Они будут лишь чаще повторяться. Тройки отрезков переноса сохраняют свою конфигурацию и будут приближаться друг к другу. Подъём задней левой ноги будет при этом происходить ровно на полпериода позже по отношению к подъёму задней правой ноги (симметрия походки).

Диагональная походка. Пусть  $\tau=1/4$ . Последовательные волны противоположных сторон сблизятся на величину  $1/4$ . Диагонально расположенные – задняя одной стороны и передняя другой – переносятся одновременно. В промежутке между диагональными переносами происходит перенос средней ноги поочередно с каждой стороны. Число ног, находящихся одновременно в опорной фазе, будет в течении цикла составлять последовательно четыре, шесть, пять и шесть

Походка трёшками. Сдвинем теперь волны переноса ещё теснее  $\tau=1/2$ . При таком режиме будет происходить одновременный перенос трёх ног: задней и передней одной стороны и средней ноги противоположной стороны. В следующем такте будут одновременно переноситься другие три ноги, симметричные предыдущим. Аппарат как бы идёт на двух ногах, каждая из которых имеет три точки опоры. При походке трёшками число опорных ног будет попеременно три и шесть.

Походку между последовательной и диагональной ( $1/6 < \tau < 1/4$ ) можно назвать околodiагональной. Походку между диагональной и походкой трёшками ( $1/4 < \tau < 1/2$ ) назовём задиагональной. Если принять  $\tau > 1/2$ , то получим походку, которую можно назвать затрёшечной.

Далее приведём пример асимметричных волновых походок.

Галоп. Такая походка возникает в том случае, если совместить моменты возбуждения левой и правой задних ног. Ноги переносятся парами: сначала задние: потом средние, затем передние.

Пусть теперь интервал времени между возбуждением левой задней и правой задней ног равен  $2/3$ . Запаздывание возбуждения для ног одной стороны пусть равно  $1/3$ . Интервал между возбуждением правой задней и левой задней ног равен  $1/3$ . Одновременно переносятся левая передняя и правая средняя, левая задняя и правая передняя, правая задняя и левая средняя ноги. При обратном соотношении длин интервалов получим походку, симметричную по отношению к описанной.

Для формирования шагового цикла [1] выберем вспомогательную плоскость с декартовыми координатами  $\sigma_1, \sigma_2$ . Замкнутую кривую, задающую

шаговый цикл, определим в этой плоскости с помощью системы дифференциальных уравнений:

$$\dot{\sigma}_1 = \kappa_1 \Phi_1 - \kappa_2 \Phi_2, \quad \dot{\sigma}_2 = \kappa_3 \Phi_3 - \kappa_4 \Phi_4, \quad (1)$$

где  $\sigma_1$  – абсцисса,  $\sigma_2$  – ордината;

$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4$  – положительные постоянные, являющиеся параметрами шагового цикла и отвечающие за его форму и размеры;

$\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  – функции, принимающие значения 0 и 1 на отдельных участках интегральной кривой. Движение изображающей точки на этих участках описывается следующими системами дифференциальных уравнений.

I. Фаза опоры ( $\Phi_2=1, \Phi_1=\Phi_3=\Phi_4=0$ ):

$$\dot{\sigma}_1 = -\kappa_2, \quad \dot{\sigma}_2 = 0. \quad (2)$$

II. Фаза переноса, участок подъёма ноги ( $\Phi_2=\Phi_3=1, \Phi_1=\Phi_4=0$ ):

$$\dot{\sigma}_1 = -\kappa_2, \quad \dot{\sigma}_2 = \kappa_3. \quad (3)$$

III. Фаза переноса, участок выведения стопы на заданную высоту ( $\Phi_1=\Phi_3=1, \Phi_2=\Phi_4=0$ ):

$$\dot{\sigma}_1 = \kappa_1, \quad \dot{\sigma}_2 = \kappa_3. \quad (4)$$

IV. Фаза переноса, участок постоянной высоты ( $\Phi_1=1, \Phi_2=\Phi_3=\Phi_4=0$ ):

$$\dot{\sigma}_1 = \kappa_1, \quad \dot{\sigma}_2 = 0. \quad (5)$$

V. Фаза переноса, участок опускания ноги ( $\Phi_1=\Phi_4=1, \Phi_2=\Phi_3=0$ ):

$$\dot{\sigma}_1 = \kappa_1, \quad \dot{\sigma}_2 = -\kappa_4. \quad (6)$$

VI. Фаза переноса, участок наступания (адаптация к неровной поверхности  $\Phi_1=\Phi_3=0, \Phi_2=\Phi_4=1$ ):

$$\dot{\sigma}_1 = -\kappa_2, \quad \dot{\sigma}_2 = -\kappa_4. \quad (7)$$

Десятью параметрами  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4, \sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{14}, \sigma_{22}, \sigma_{21}$ , смысл которых ясен из рис. 2, задаются расположение цикла на плоскости  $\sigma_1, \sigma_2$ , его размеры и период, наклоны и отношение времен отдельных участков.

Полные уравнения рассматриваемого генератора шагового цикла имеют дополнительные переменные  $u_1-u_5$  и  $F_1$ . Кроме того, в системе присутствуют постоянные переменные  $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{14}, \sigma_{22}, \sigma_{21}$ , имеющие смысл абсцисс и ординат характерных точек шагового цикла, отмеченных на рис. 2.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \kappa_1 \Phi_1 - \kappa_2 \Phi_2; \quad \sigma_2 = \kappa_3 \Phi_3 - \kappa_4 \Phi_4; \\ \Phi_1 = \frac{1}{2}(1 + \operatorname{sgn} u_1); \quad \Phi_2 = \frac{1}{2}(1 - \operatorname{sgn} u_1); \\ \Phi_3 = \frac{1}{2} u_5 (1 + \operatorname{sgn} u_2); \quad \Phi_4 = \frac{1}{2} u_4 (1 - \operatorname{sgn} u_2)(1 - \operatorname{sgn} u_3); \\ u_1 = \frac{1}{2} \sigma_{13} (1 + \operatorname{sgn} u_1) - \frac{1}{2} \sigma_{11} (1 - \operatorname{sgn} u_1) - \sigma_1; \\ u_2 = \frac{1}{2} \sigma_{21} (1 + \operatorname{sgn} u_2) - \frac{1}{2} \sigma_{22} (1 - \operatorname{sgn} u_2) + \frac{1}{2} \sigma_{21} u_5 (1 - \operatorname{sgn} u_1) - \sigma_2; \\ u_3 = \frac{1}{2} \sigma_{14} (1 + \operatorname{sgn} u_3) \sigma_1; \\ u_4 = \frac{1}{2} [(1 + u_5) + (1 - u_5) \operatorname{sgn} F_1]; \\ u_5 = \frac{1}{2} [1 + \operatorname{sgn}(u_1 + \sigma_{12})]; \\ F_1 = F + (1 - \operatorname{sgn} F_1) \operatorname{sgn} u_1. \end{array} \right. \quad (8)$$

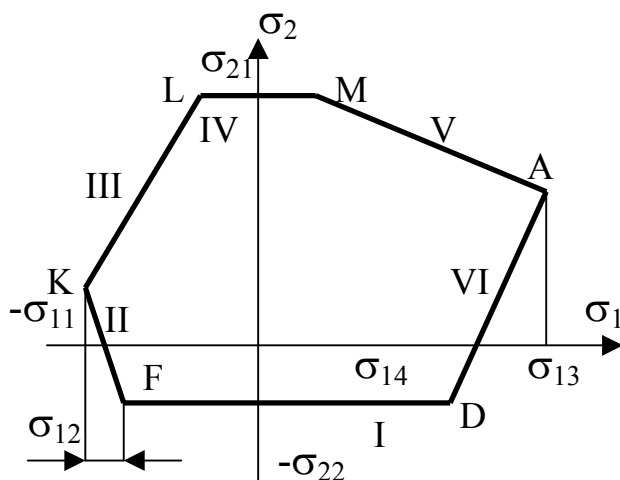


Рисунок 2 – Шаговый цикл на плоскости  $\sigma_1, \sigma_2$ .

Участок VI шагового цикла является участком адаптации к неровностям поверхности. Высота шагового цикла  $\Delta$ , как можно показать [5], связана с его параметрами следующим образом:

$$\Delta = \sigma_{21} - \frac{\kappa_4}{\kappa_1} \cdot (\sigma_{13} - \sigma_{14}) + \sigma_{22}. \quad (9)$$

Остановимся подробнее на системе адаптации. На участке VI появление логического сигнала  $F$  – сигнала контакта ноги с поверхностью – приводит к переходу к участку I:

$$F = q - 1, \quad (10)$$

где  $q$  – характеристика состояния ноги,

$$F = \begin{cases} -1, & \text{если нога находится в контакте с поверхностью;} \\ 0, & \text{если нога поднята над поверхностью.} \end{cases} \quad (11)$$

Участок I является фазой опоры, на нём  $\dot{\sigma} = 0$  и конец ноги движется горизонтально. Очевиден смысл введения этой логической операции: при встрече с поверхностью конца ноги её дальнейшее программное опускание привело бы к соответствующему подъёму корпуса, отрыву от поверхности других ног, находящихся в опорной фазе, что дало бы в итоге «скачки» в движении корпуса. К таким же результатам привёл бы переход ноги в фазу опоры до контакта с поверхностью, с той разницей, что «скачок» в движении корпуса возникает здесь при подъёме других ног.

Таким образом на шаговый цикл влияет логический сигнал контакта ноги с поверхностью, который вызывает определённую деформацию цикла. Как это следует из уравнений (8), неизменным при деформации остаётся участок V шагового цикла (опускание ноги). Соответствующая траектория этого участка неподвижна в плоскости  $\sigma_1, \sigma_2$ . Вид шаговых циклов при различной высоте опорной фазы приведён на рис. 3.

Как следует из изложенного, генератор шагового цикла представляет собой нелинейную систему второго порядка, содержащую значительное количество логических функций. Эта система имеет периодическое решение, которое и является шаговым циклом. Сигнал  $F$  контакта с поверхностью деформирует это решение на фазах наступания, опоры и подъёма ноги, но не меняет периода цикла.

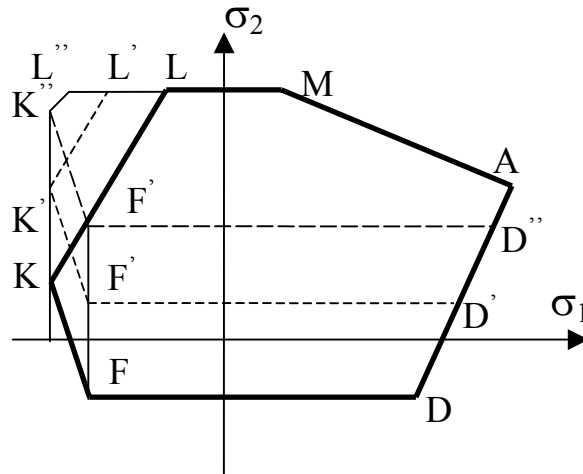


Рисунок 3. – Вид шаговых циклов при различной высоте опорной фазы.

Шаговый цикл может быть преобразован, важными являются лишь его характеристики, инвариантные к дальнейшим преобразованиям:  $T$  – период цикла,  $\tau$  - отношение времени контакта с поверхностью  $T_0$  к  $T$ , относительный размер  $\Delta_0$  зоны адаптации. Легко получить следующие выражения для этих величин через параметры системы (8):

$$T = (\sigma_{11} + \sigma_{13}) \cdot \left( \frac{1}{\kappa_1} + \frac{1}{\kappa_2} \right); \quad T_0 = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{13}}{\kappa_2}; \quad (12)$$

$$\tau = \frac{T_0}{T} = \frac{\kappa_1}{\kappa_1 + \kappa_2}; \quad \Delta_0 = \frac{\Delta}{\sigma_{21}} = 1 - \frac{\kappa_1}{\kappa_4} \cdot \frac{(\sigma_{13} - \sigma_{14})}{\sigma_{21}} + \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{21}}.$$

Можно показать[1], что при любых начальных условиях  $\sigma_{10}$  и  $\sigma_{20}$  из прямоугольника в области, в которой шаговый цикл деформируется сигналом  $F$ , выход на стационарную кривую происходит менее, чем за время  $T$ .

Если вышеперечисленные десять параметров для всех ног одинаковы, то с точностью до деформаций сигналами  $F^{(i)}$  шаговые циклы отличаются друг от друга лишь сдвигом по времени, что позволяет записать выходы  $\sigma^{(i)}(t)$  ( $i=1, \dots, 6$ ) блока генераторов следующим образом:

$$\sigma^{(i)}(t) = \sigma^{(0)}(t - \varphi_i T), \quad (13)$$

где закон  $\sigma^{(0)}(t) = (\sigma_1(t), \sigma_2(t))$  задан так, что при  $t=0$  выполняется  $\sigma_1^{(0)}(0) = -\sigma_{11}$ . Фазовые сдвиги  $\varphi_i$  определяют тип походки.

Перечислим входы, выходы и параметры блока генераторов:  $K_1, K_2, K_3, K_4, \sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{14}, \sigma_{22}, \sigma_{21}$  – настраиваемые параметры;  $T$  – оперативный параметр, изменение которого обеспечивает пропорциональное изменение параметров  $K_1, K_2, K_3, K_4$ ;  $\sigma_{10}$  – оперативные параметры;  $F^{(i)}$  – сигналы датчиков контакта с поверхностью;  $\tilde{\Phi}^{(i)} \{ \Phi_2^{(i)}, \Phi_3^{(i)}, \Phi_4^{(i)} \}$  – логические выходы;  $\sigma^{(i)} \{ \sigma_1^{(i)}, \sigma_2^{(i)} \}$  – выходы блока.

Выводы.

Таким образом, в данной работе:

1. Исследованы заданные походки шагающего аппарата.
2. Выведены уравнения генератора шагового цикла при регулярной походке шагающего аппарата.
3. Полученные логические функции дают возможность охарактеризовать вид походки в зависимости от определённого сочетания параметров шагового цикла.

Перечень ссылок:

1. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата.- М.: Наука, 1984, - 312с.
2. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К. Моделирование на ЦВМ движение шагающего аппарата 1972 №3.
3. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф., Алексеева Л.А. Алгоритм стабилизации движения автоматического шагающего аппарата. 1974.
4. Гурфинкель В.С., Гурфинкель Е.В. и др. Макет шестиногого шагающего аппарата с супервизорным управлением. М. 1982.