

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 519.217.8

О ДВИЖЕНИИ РОЯ К РУБЕЖУ

Е.В. Ларкин, М.А. Антонов, Д.Р. Афанасьев

Рассмотрен метод, позволяющий значительно упростить решение системы дифференциальных уравнений, описывающих объекты управления. Показано, что предложенный метод значительно упрощает задачу решения систем уравнений, описывающих объекты с множеством контуров управления, перекрёстными связями, а также может быть применён при координировании роя. Рассмотрено применение методов последовательного упрощения графов к типовым соединениям звеньев САУ, на основании чего показано общее решение для абстрактной системы управления.

Ключевые слова: рой, единица роя, продольное движение, временные характеристики достижения рубежа, сеть Петри – Маркова, метод Монте-Карло.

В настоящее время физический рой широко используется в различных сферах человеческой деятельности, таких, как промышленность, оборона, экология [1], а также для выполнения задач по нахождению объектов на земле, разведке, борьбе с терроризмом, операций по разминированию и т.д.

Изучение физического роя и моделирование его поведения – область активных научных исследований, популярная более двух десятилетий. После работы Рейнольдса [2], посвященной изучению поведения стаи птиц в полете, были проведены обширные исследования для моделирования и анализа поведения роя, а также для разработки алгоритмов управления и контроля. координация роя [3].

Наибольший интерес представляют задачи по координации роя, требующие, чтобы рубеж был достигнут всеми единицами физического роя одновременно или с минимальным разбросом времени. Такая необходимость возникает, например, когда необходимо окружить цель и не упустить ее. В реальных условиях каждая единица физического роя движется по своей уникальной траектории, определяемой рельефом и микрорельефом местности, погодных условий и т.д.

Следовательно, достижение рубежа каждой единицей физического роя происходит со случайным временем, которое, в свою очередь, определяется конструкцией робота и свойствами местности.

Известны способы моделирования поведения роя [4, 5], а также алгоритмы для координации роя на земле [6, 7] имеют существенный недостаток, который на этапе проектирования физического роя не позволяет оценить временные и вероятностные характеристики его функционирования в реальных условиях, поэтому они не позволяют решить проблему достижения рубежа всеми единицами физического роя с минимальным временным разбросом. Поэтому исследования, проводимые ниже, актуальны и важны для практики проектирования роя.

1. Динамика продольного движения единицы роя. Структура единицы роя, которая представляет собой транспортное средство, показана на рис. 1.

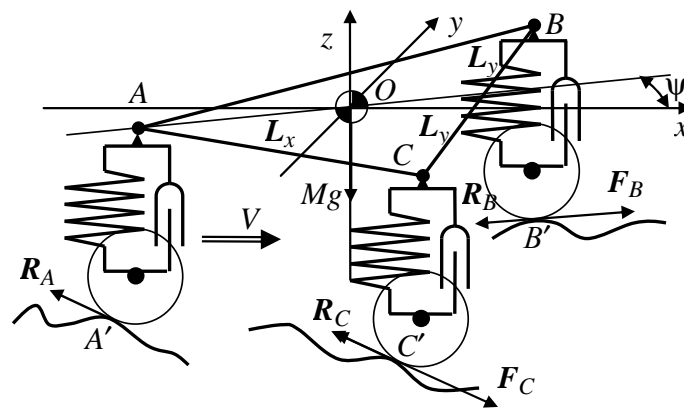


Рис. 1. Кинематика единицы роя

Единица роя представляет собой абсолютно жесткая платформа, установленная на вязко/упругих амортизаторах, размещенных в углах равнобедренного треугольника A, B, C . Единица роя движется по пересеченной местности, и каждое колесо находится в своих индивидуальных дорожных условиях. Колеса B и C приводят единицу роя в движение [8], при чём совокупный момент этих колес обеспечивает продольное движение единицы роя, а дифференциальный момент обеспечивает маневрирование на местности. Колесо A является пассивным колесом, обеспечивающим третью точку опоры и устанавливается на вязко/упругом амортизаторе, который, в свою очередь, вращается на шарнире, ось вращения которого перпендикулярна плоскости ABC . Платформа единицы роя не имеет продольных и поперечных степеней подвижности относительно опор, поэтому центры колес могут перемещаться по прямой линии только перпендикулярно плоскости ABC . Длина опор уравнивает вес Mg платформы единицы роя, где M - масса платформы; g - ускорение свободного падения. Колеса касаются местности в точках A', B', C' . В точках касания тангенциальная составляющая сил обеспечивает как силы сопротивления R_A, R_B, R_C , так и движущие силы F_B, F_C .

Для описания влияния рельефа и микрорельефа местности на время достижения рубежа единицей роя, необходимо получить систему уравнений, описывающих продольное движение единицы роя. Система дифференциальных уравнений, описывающих угловые скорости валов электрических двигателей B и C , выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} T\dot{\omega}_B + \omega_B + K_\mu\mu_B + K_\nu\nu_B = K_U U_B; \\ T\dot{\omega}_C + \omega_C + K_\mu\mu_C + K_\nu\nu_C = K_U U_C, \end{cases} \quad (1)$$

где ω_B, ω_C - угловые скорости валов электрических двигателей B и C ; T - постоянная времени электродвигателей; μ_B, μ_C - моменты полезной нагрузки, формируемые на валах электродвигателей B и C ; ν_B, ν_C - моменты сухого трения в подшипниках электродвигателей B и C и трансмиссии; U_B, U_C - управляющие воздействия для управления электродвигателями B и C ; K_μ, K_ν, K_U - коэффициенты пропорциональности.

При необходимости электродвигатели могут оснащаться редукторами с коэффициентом передачи i (если у двигателя нет редуктора, тогда $i = 1$). Поэтому моменты и скорости вращения выходных валов редукторов могут быть получены следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{{}^r\mu_{B,C}}{i} = \mu_{B,C}; \\ {}^r\omega_{B,C}i = \omega_{B,C}, \end{cases} \quad (2)$$

где ${}^r\omega_B, {}^r\omega_C$ - угловые скорости выходных валов редукторов, которыми оснащаются электродвигатели B и C , соответственно; ${}^r\mu_B, {}^r\mu_C$ - моменты полезной нагрузки на валах редукторов, которыми оснащаются электродвигатели B и C , соответственно.

Редукторы нагружены на ведущие колёса, поэтому окружные скорости привода колес, которые совпадают со скоростями V_B, V_C амортизаторов колёс B и C , следующие:

$$V_{B,C} = {}^r\omega_{B,C}q, \quad (3)$$

где q - радиус колеса.

Продольная скорость и скорость поворота по азимуту единицы роя могут быть получены как

$$\begin{cases} V = \frac{V_B + V_C}{2}; \\ \dot{\psi} = \frac{V_B - V_C}{2L_y}, \end{cases} \quad (4)$$

где $2L_y$ - расстояние между опорами колёс B и C ; $\dot{\psi} = \frac{d\psi}{dt}$.

Единица роя движется вперед и вращается вокруг оси z под действием движущих сил и сил сопротивления. Центр вращения расположен на прямой линии, проходящей через точки B и C .

Система дифференциальных уравнений, которая описывает динамику продольного движения и угол поворота по азимуту единицы роя, может быть получена как

$$\begin{cases} M\dot{V} + \eta_V V = (F_B - R_B) \cos \alpha_B + (F_C - R_C) \cos \alpha_C - R_A \cos \alpha_A; \\ J\ddot{\psi} + \eta_{\psi} \dot{\psi} = [(F_B - R_B) \cos \alpha_B - (F_C - R_C) \cos \alpha_C] L_y - R_A L_x \cos \alpha_A \sin \phi, \end{cases} \quad (5)$$

где M масса единицы роя; J – момент инерции единицы роя, относительно центра O поворота; η_V and η_{ψ} – коэффициенты, характеризующие диссипативные силы, воздействующие на устройство (например, вязкое трение); F_B, F_C – движущие силы; R_A, R_B, R_C – силы сопротивления; $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C$ углы между горизонтальной плоскостью и тангенциальными силами, расположенные в точках A', B', C' соответственно; ϕ угол поворота пассивного колеса A .

Совместное решение уравнений (3) – (5) дает систему уравнений, которая описывает продольное перемещение и маневрирование по азимуту трехколесной единицы роя:

$$\begin{cases} \delta_V(\kappa) \cdot D_{VV}(\kappa) + \delta_{\psi}(\kappa) \cdot D_{V\psi}(\kappa) = \delta_{FV}(\kappa); \\ \delta_V(\kappa) \cdot D_{\psi V}(\kappa) + \delta_{\psi}(\kappa) \cdot D_{\psi\psi}(\kappa) = \delta_{F\psi}(\kappa), \end{cases} \quad (6)$$

где κ – оператор Лапласа; $\delta_V(\kappa)$ – приращение продольной скорости; $\delta_{\psi}(\kappa)$ – приращение скорости поворота по азимуту; δ_{FV} – приращение движущей силы, обеспечивающей продольное перемещение единицы роя; $\delta_{F\psi}$ – приращение силы, которая вращает единицу роя по углу азимута.

$$\begin{aligned} D_{VV}(\kappa) = D_{\psi V}(\kappa) &= \kappa \left(M + \frac{2Ti^2}{K_{\mu}q^2} \right) + \left(\eta_V + \frac{2i^2}{K_{\mu}q^2} \right); \\ D_{V\psi}(\kappa) = -D_{\psi\psi}(\kappa) &= \kappa \left(\frac{J_z}{L_y} + \frac{2TL_y i^2}{K_{\mu}q^2} \right) + \left(\frac{\eta_{\psi}}{L_y} + \frac{2L_y i^2}{K_{\mu}q^2} \right). \end{aligned}$$

Таким образом, решение системы (1.6) позволяет получить зависимость приращения продольной скорости

$$\delta_V(\kappa) = \frac{k_U \delta_{UB}}{T_{SU} \kappa + 1} + \frac{k_U \delta_{UC}}{T_{SU} \kappa + 1} - \frac{k_{\alpha A} \delta_{\alpha A}}{T_{SU} \kappa + 1} - \frac{k_{\alpha BC} \delta_{\alpha B}}{T_{SU} \kappa + 1} - \frac{k_{\alpha BC} \delta_{\alpha C}}{T_{SU} \kappa + 1}, \quad (7)$$

где $k_U, k_{\alpha A}, k_{\alpha BC}$ коэффициенты пропорциональности; T_{SU} – постоянная времени ускорения единицы роя; $\delta_{\alpha A}, \delta_{\alpha B}, \delta_{\alpha C}$ – приращения углов $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C$ между горизонтальной плоскостью и тангенциальными силами.

Следует признать, что зависимость (7) справедлива тогда, когда колеса не теряют механического контакта с дорогой и отсутствует поперечное скольжение колес на поверхности. Из выражения (7) видно, что динамика продольного движения трехколесной единицы роя зависит от характеристик двигателей, передаточного числа редукторов, конструкции платформы и амортизаторов и т. д. Текущая скорость блока роя зависит от

приращений δ_{UB}, δ_{UC} управляющих воздействий, подаваемых на двигатели B и C , а также от приращений $\delta_{\alpha A}, \delta_{\alpha B}, \delta_{\alpha C}$. Таким образом, отклонения углов приводят к отклонению продольной скорости единицы роя от заранее определенного уровня и увеличению времени достижения рубежа. Если известен такой параметр дороги, как корреляционная функция профиля, то может быть получена плотность распределения времени достижения рубежа трёхколёсной единицей роя.

2. Достижение рубежа единицей роя. Пусть единица роя движется к рубежу, который расположен на расстоянии S от него. При движении по идеально ровной поверхности, без выбоин и/или препятствий, единица роя достигнет рубежа за временной интервал T , который определяется максимальной скоростью, развиваемой единицей роя. В то же время, как следует из (7), каждое препятствие на пути единицы роя увеличивает временной интервал T достижения рубежа единицей роя.

Для симуляции прохождения расстояния при движении транспортного средства может быть предложена концепция сетей Петри-Маркова (СПМ) [9, 10, 11, 12]. Структура СПМ показана на рис. 2.

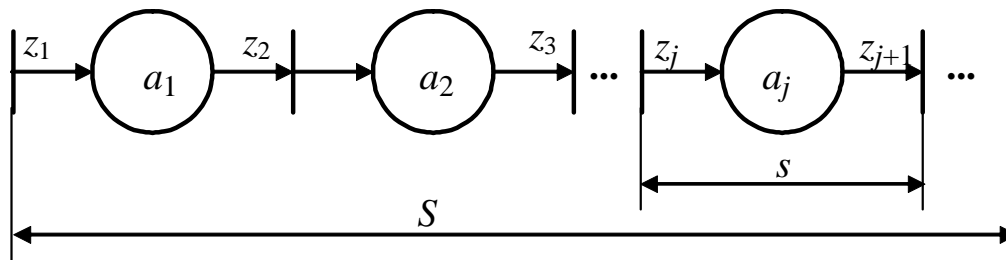


Рис. 2. Сеть Петри-Маркова, моделирующая процесс достижения рубежа

Для получения показанной структуры расстояние S от начальной точки до рубежа делится на элементарные отрезки s . После прохождения каждого отрезка, единица роя сразу начинает преодолевать следующий отрезок s .

Сеть Петри-Маркова описывается следующим набором:

$$\Pi = \{ \{a_1, a_1, a_2, \dots, a_j, \dots\}, \{z_1, z_2, \dots, z_j, \dots\}, \{I(z_1) = \emptyset, I(z_j) = a_{i-1}, i = 0, \dots, j, \dots\}, \{O(z_j) = a_j, i = 0, \dots, j, \dots\} \}, \quad (8)$$

где a_j - состояния; z_j - переходы; $I(\dots)$ входные функции переходов; $O(\dots)$ - выходные функции переходов; \emptyset - пустое множество.

Переход z_1 является стартовым и имитирует начало движения единицы роя. Переход z_j имитирует достижение конца очередного отрезка s . При $j \rightarrow \infty$ имитируется конец пути S , то есть – достижение рубежа единицей роя. Состояния имитируют генерацию временных интервалов, когда единица роя проходит очередной отрезок s .

Каждый отрезок преодолевается единицей роя с некоторой, характерной для него скоростью $V(t)$. Время, в течение которого единица роя проходит очередной отрезок s , является случайным и равно

$$t_s = \frac{s}{V(t)} = T_s + \Delta(t), \quad T_s = \frac{s}{V + \delta_V} = \bar{T}_s + \delta_{T_s} \quad (9)$$

где V средняя скорость единицы роя, сформированная в результате подачи на электродвигатели B и C управляющих воздействий U_B, U_C , в соответствии с зависимостью (7); δ_V - отклонение скорости от среднего значения, вызванное рельефом и микрорельефом местности под колёсами A, B, C ; \bar{T}_s - среднее время прохождения отрезка s единицей роя; δ_{T_s} - отклонение времени прохождения отрезка s от среднего значения.

Когда отклонение δ_V является случайной величиной, тогда и отклонение δ_{T_s} тоже является случайной величиной. Считается, что δ_{T_s} имеет нулевое среднее значение. Тогда плотность распределения времени прохождения очередного отрезка s может быть рассчитана по зависимости

$$f_s(t) = \delta(t - T_s) * f_\Delta(t), \quad f_s(t) = \delta(t - \bar{T}_s) * \bar{f}_s(t), \quad (10)$$

где $\delta(t - \bar{T}_s)$ - δ -функция Дирака; $\bar{f}_s(t)$ - отклонение плотности распределения времени от среднего значения.

В соответствии с [13]

$$f_s(t) = \lim_{\substack{J \rightarrow \infty, \\ s \rightarrow 0}} L^{-1} \left[\prod_{j=1}^J L[\delta(t - \bar{T}_s) * \bar{f}_s(t)] \right] = \delta(t - \bar{T}_s) * \lim_{\substack{J \rightarrow \infty, \\ s \rightarrow 0}} L^{-1} \left[\prod_{j=1}^J L[\bar{f}_s(t)] \right] \quad (11)$$

где $L[...]$ и $L^{-1}[...]$ прямое и обратное преобразования Лапласа соответственно; \bar{T}_s - среднее время, которое затрачивает единица роя на преодоления расстояния S с заранее известной скоростью V ;

$$\bar{T}_s = \frac{S}{V}. \quad (12)$$

Надо признать, что

$$\bar{f}_s(t) = \lim_{\substack{J \rightarrow \infty, \\ s \rightarrow 0}} L^{-1} \left[\prod_{j=1}^J L[\bar{f}_s(t)] \right] \quad (13)$$

является сверткой, описывающей сумму большого числа малых случайных значений, которые в равной степени способствуют получению случайного значения. Согласно центральной предельной теореме [14, 15] $\bar{f}_s(t)$ - нормальное распределение. Также, стоит учитывать, что единица роя не может достигнуть рубежа за время, меньшее, чем τ , когда единица роя преодолевает всю дистанцию с максимально возможной скоростью V_{max} ;

$$\tau = \frac{S}{V_{max}} \quad (14)$$

Наконец, с учетом вышеизложенных обстоятельств, временная плотность достижения рубежа единицей роя принимает следующий вид:

$$f_s(t) = \begin{cases} \frac{\exp\left[-\frac{(t-T_s)^2}{2D_\Delta}\right] \cdot \eta(t-\tau)}{\int_{\tau}^{\infty} \exp\left[-\frac{(t-T_s)^2}{2D_\Delta}\right] dt}, & \text{when } t \geq \tau; \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

где T_s математическое ожидание несмещённого нормального распределения; D_s дисперсия плотности распределения $\bar{f}_s(t)$; $\eta(t-\tau)$ - ступенчатая функция Хэвисайда.

3. Достижение рубежа роем. Положим, что рой движется к рубежу. Процесс функционирования роя, при движении к рубежу, может быть представлен СПМ[14, 15, 16], структура которой показана на рис. 3.

$$\begin{aligned} \Pi = \{ & \{a_1, \dots, a_k, \dots, a_K\}, \{z_b, z_e\}, \\ & \{O(z_b) = \{a_1, \dots, a_k, \dots, a_K\}, O(z_e) = \emptyset\}, \\ & \{I(z_b) = \emptyset; I(z_e) = \{a_1, \dots, a_k, \dots, a_K\}\} \}. \end{aligned} \quad (16)$$

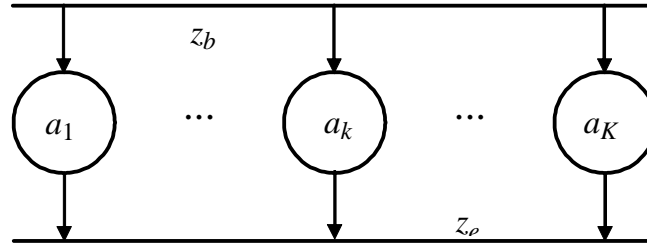


Рис. 3. Сеть Петри-Маркова, которая симулирует функционирование роя

На рис. 3, переход z_b симулирует старт движения роя к рубежу; переход z_e симулирует достижение рубежа роем, в целом или каждой единицей роя по отдельности; вершины $a_1, \dots, a_k, \dots, a_K$ симулируют процесс движения единиц роя к рубежу.

Между единицами роя происходит соревнование за скорейшее преодоление дистанции до рубежа. [17]. Плотность распределения времени достижения рубежа всем роем может быть представлена следующим образом:

$$f_g(t) = \frac{d \prod_{k=1}^K F_k(t)}{dt} = \sum_{k=1}^K f_k(t) \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^K F_i(t), \quad (17)$$

где $f_k(t)$ - плотность распределения времени достижения рубежа k -й

единицей роя, определяемая формулой (15); $F_k(t) = \int_0^t f_k(\theta) d\theta$; θ - вспомогательная переменная.

Когда $f_k(t)$ будет определена с помощью формулы (15), тогда

$$F_S(t) = \begin{cases} \frac{\int_{\tau}^t \exp\left[-\frac{(\theta - T_S)^2}{2D_{\Delta}}\right] d\theta}{\int_{\tau}^{\infty} \exp\left[-\frac{(t - T_S)^2}{2D_{\Delta}}\right] dt} & \text{when } t \geq \tau; \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (18)$$

Вероятность и чистая плотность распределения времени, того что именно k -я единица роя завершает дистанцию последней, выглядит следующим образом [13]:

$$\tilde{p}_k = \int_0^{\infty} f_k(t) \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^K F_i(t) dt; \quad (19)$$

$$\tilde{f}_k(t) = \frac{f_k(t) \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^K F_i(t) dt}{\tilde{p}_k}. \quad (20)$$

Вероятность и чистая плотность распределения времени, того что именно k -я единица роя завершает дистанцию первой, выглядит следующим образом [13]:

$$\hat{p}_k = \int_0^{\infty} f_k(t) \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^K [1 - F_i(t)] dt; \quad (21)$$

$$\hat{f}_k(t) = \frac{f_k(t) \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^K [1 - F_i(t)] dt}{\hat{p}_k}. \quad (22)$$

Введём K -разрядной двоичное число $N(K) = \langle n_1, \dots, n_k, \dots, n_K \rangle$ и выберем из N^K те номера, которые содержат l нулей и $K - l$ единиц. Тогда, количество возможных комбинаций составит

$$C(K, l) = \frac{K!}{(K-l)! l!}. \quad (23)$$

Введём функцию

$$\Phi_k[t, c(K, l)] = \begin{cases} F_k(t), & \text{when } n_k[c(K, l)] = 0; \\ 1 - F_k(t), & \text{when } n_k[c(K, l)] = 1, \end{cases} \quad (24)$$

где $c(K, l)$ - номер комбинации бинарного числа, состоящей из, l нулей и $(K - l)$ единиц; $n_k[c(K, l)]$ - k - разрядный номер $c(K, l)$ -й комбинации.

Тогда плотность распределения времени события, при котором из K единиц роя рубежа достигнут l единиц роя, выглядит следующим образом

$$\tilde{f}_{K,l}(t) = \sum_{c(K,l)=1}^{C(K,l)} \sum_{k \in c(K,l)} f_k(t) \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^K \Phi_i[t, c(K,L)], \quad (25)$$

где $k \in c(K,l)$ означает, что суммирование должно происходить только по всем k -м, единицам роя, включающим комбинации $\langle n_1, \dots, n_k, \dots, n_K \rangle$, содержащие l нулей.

4. Компьютерный эксперимент. Для проверки предложенного метода был проведен прямой компьютерный эксперимент, который проводился для единиц роя, перемещающихся по пересечённой местности со случайной скоростью $V + \delta_v$, где $V = 5$ м/с, δ_v - случайное значение, лежащее в пределах интервала $-0,5 \leq \delta_v \leq 0,5$ м/с. Дистанция до рубежа, длиной 1 км поделена на 100 отрезков, длиной 10 м. Гистограмма времени достижения рубежа роём получена с помощью метода Монте-Карло, показана на рис. 4. Ошибка математического ожидания времени (200 с) составляет 1,3%, ошибка СКО (0,9 с) составила 3,4%.

Гистограмма достижения рубежа роём, состоящим из 5 единиц, представлена на рис.5. Эта гистограмма иллюстрирует зависимость (17). Как следует из названной формулы, мода гистограммы сдвинута по сравнению с гистограммой, изображенной на рис. 4. Этот факт следует учитывать при планировании операций, проводимых роём.

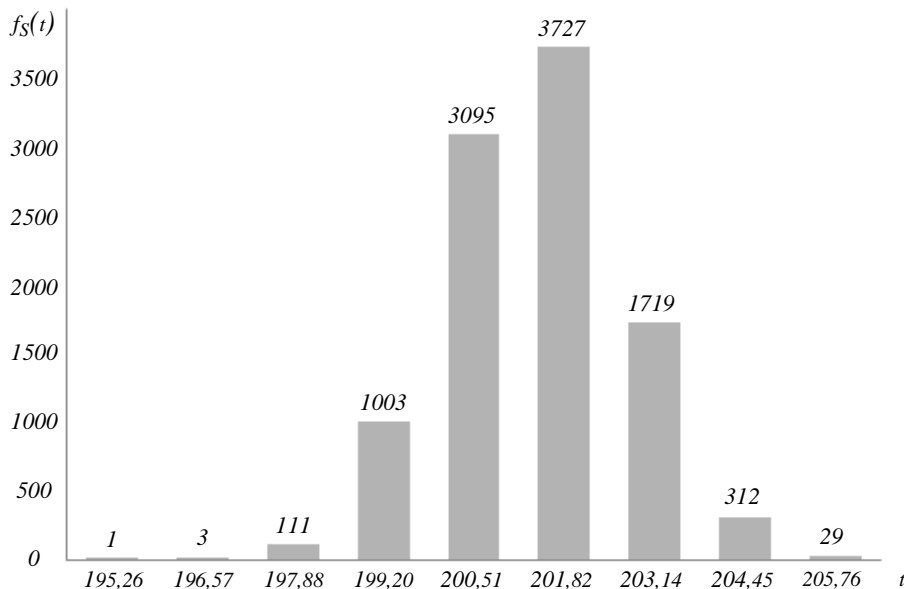


Рис. 4. Гистограмма достижения рубежа единицей роя

Результаты компьютерного эксперимента, представленные на рис. 4 и рис. 5, подтверждает справедливость гипотезы о плотности распределения времени достижения рубежа роём.

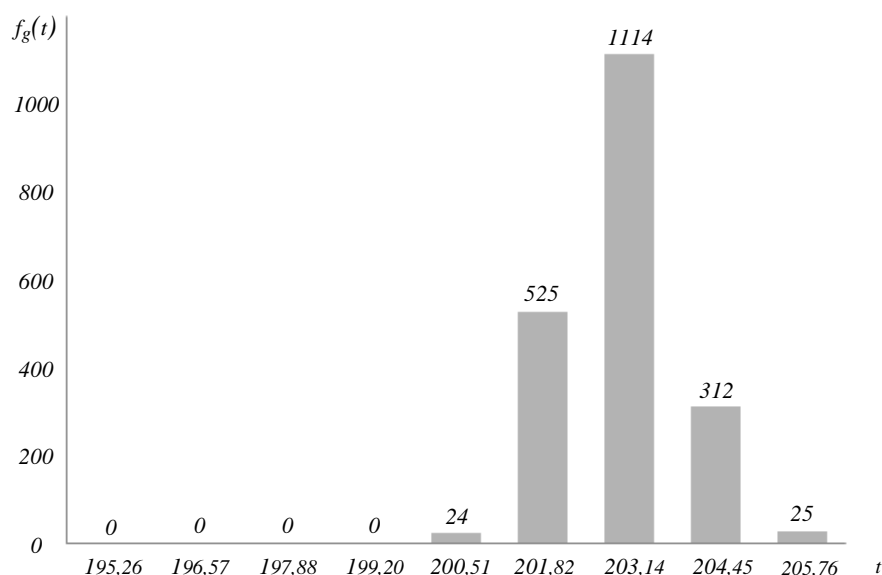


Рис. 5. Гистограмма достижения рубежа роем в целом

Заключение. Итак, в статье отмечается, что важной задачей при планировании функционирования роя является оценка времени достижения рубежа, как единицы роя, так и роя в целом. В случае физического роя, движущегося по пересеченной местности, это может быть сделано посредством аналитического моделирования продольного движения транспортного средства. Предлагаемый подход позволяет увязать конструктивные и физические параметры объекта с характеристиками местности, дороги с плотностью времени достижения контрольной точки как одной единицы, так и 1 из K единиц. Верность предложенного метода подтверждена прямым компьютерным экспериментом.

Список литературы

1. Brambilla M., Ferrante E., Birattari M., Dorigo, M.: Swarm robotics: A review from the swarm engineering perspective // *Swarm Intelligence*. 2013. 7 (1). P. 1 – 41.
2. Reynolds C.W. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model // *Computer graphics*. 1987. 21(4). P. 25 – 34.
3. Kececi E.F., Ceccarelli M. Robot Swarms: dynamics and control. 1st edn. ASME Press, New York City, U.S., 2015.
4. Balch T., Arkin R.C. Behavior-based formation control for multirobot teams // *IEEE Trans on Robotics and Automation*. 1998. 14(6). P. 926 – 939.
5. Beard R.W., Lawton J., Hadaegh F.Y. A coordination architecture for spacecraft formation control. *IEEE Tr. Control Systems Technology*, 2001. 9(6). P. 777–790.
6. Saaj C.M., Lappas V., Gazi V. Spacecraft swarm navigation and control using artificial potential field and sliding mode control // *IEEE International Conference on Industrial Technology*. IEEE, Mumbai, India, 2006. P. 2646 – 2652.

7. Akat S.B., Gazi V., Marques L. Asynchronous particle swarm optimization based search with a multi-robot system: Simulation and implementation on a real robotic system // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences (ELEKTRIK). 2010. 8(5). P. 749 – 764.

8. Morin P., Samson C. Motion Control of Wheeled Mobile Robots. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. P. 799 – 826.

9. Ivutin A.N., Larkin E.V., Kotov V.V. Established Routine of Swarm Monitoring Systems Functioning // Advances in Swarm and Computational Intelligence. Ying Tan, Yuhui Shi (eds.) 6TH International conference on swarm intelligence (ICSI 2015), LNCS. Springer, Heidelberg, 2015. Vol. 9141. P. 415 – 422.

Ларкин Евгений Васильевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, elarkin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Антонов Максим Александрович, аспирант, младший научный сотрудник, max0504@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Афанасьев Дмитрий Русланович, студент, max0504@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ON THE MOVEMENT OF THE SWARM TO THE MILESTONE

E.V. Larkin, M.A. Antonov, D.R. Afanasyev

The physical swarm operation is investigated. Swarm units are considered as three-wheeled mobile robots, moving through rough terrain. For the longitudinal movement of such type vehicle the dynamic model is obtained. The article discusses the issue of forecasting the time a physical swarm reaches a milestone and proposes a hypothesis on the form of the law of the distribution of time during which a swarm unit reaches a milestone. Obtaining this time distribution is carried out with use the Petri-Markov net fundamental apparatus. With use Petri-Markov nets time densities of reaching the milestone both one unit and swarm as a whole are obtained. More common formula of distribution of time of milestone reaching by l units of K is obtained too. To confirm the hypothesis about the type of theoretical time distribution a computer experiment was carried out using the Monte Carlo method.

Key words: swarm, swarm unit, longitudinal movement, milestone temporal characteristics, Petri-Markov Net, Monte Carlo method.

Larkin Evgeniy Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, elarkin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Antonov Maxim Aleksandrovich, postgraduate, junior researcher, max0594@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Afanasyev Dmitry Ruslanovich, student, max0594@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University