

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ КОРНЕВОЙ СИСТЕМЫ ПЛОДОВЫХ РАСТЕНИЙ

А. С. Гордеев, Б. С. Мишин

*Кафедра «Агроинженерия, электроэнергетика и информационные технологии»,  
ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»,  
г. Мичуринск, Россия; boris.sergeewitch@yandex.ru*

**Ключевые слова:** моделирование; позиционирование; растения; рабочие органы; сельское хозяйство; системы управления.

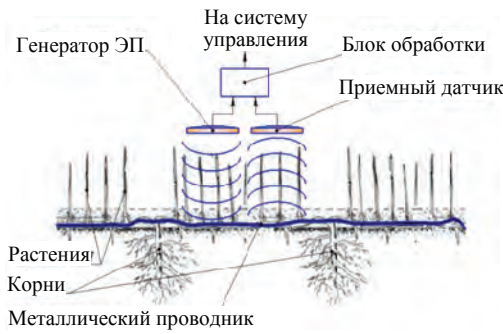
**Аннотация:** Предложена имитационная модель, позволяющая на основании данных с приемных датчиков определять координаты местоположения корневой системы растений. Разработаны алгоритм и математическая модель определения координат базовой метки, которые предполагают наличие трех приемных датчиков, блока генератора случайных величин для входных параметров. Представлена программа реализации алгоритма определения координат базовой метки в программном комплексе AnyLogic.

---

Одним из этапов исследований по разработке системы позиционирования рабочих органов и растений является построение имитационной модели, позволяющей исследовать ее поведение во времени и ряд факторов, которые не были включены в математическую модель. Для этих целей выбран инструмент имитационного моделирования AnyLogic, который поддерживает все подходы к созданию моделей: дискретно-событийный, системно-динамический и агентный, а также любую их комбинацию [1].

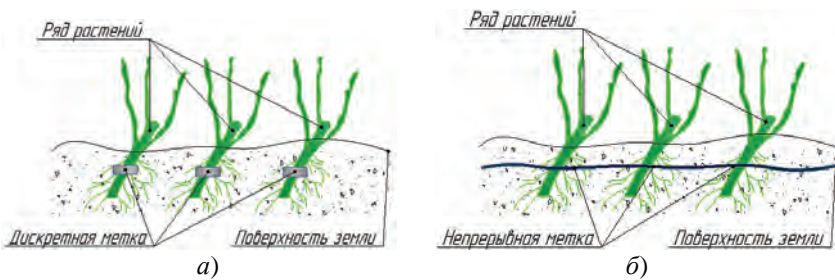
В сельскохозяйственном производстве существует ряд операций, таких как обработка междурядий в садах, посадка и выкопка саженцев плодовых растений и кустов ягод, которые требуют позиционирования рабочих органов машин и оборудования относительно местоположения штамбов растений, корневой системы, ветвей и т.д. В связи с этим возникает задача определения координат местоположения как самого растения, так и рабочего органа. Сами по себе растения не несут такого сигнала, который мог бы быть зафиксирован современными приборами.

Для позиционирования растения можно использовать электромагнитное поле, вырабатываемое источником, связанным с растением. На рисунке 1 представлена схема позиционирования корневой системы растения, которая имеет источник сигнала, являющийся металлическим проводником, и приемный датчик. Сам металлический проводник не несет информации о расположении корней. Для этого можно использовать генератор электромагнитного поля (ЭП), который излучает в пространство электромагнитные волны заданной частоты, и в металлическом проводнике возникает электродвижущая сила (ЭДС). Проводник становится источником сигнала и тоже генерирует в пространство ЭП. Приемный датчик фиксирует величину ЭП, которое пропорционально расстоянию до проводника, обозначая тем самым свое местоположение.



**Рис. 1. Схема позиционирования корневой системы растения**

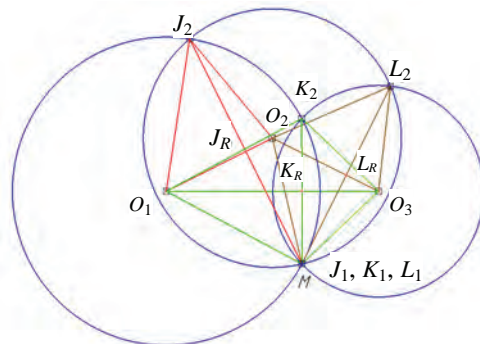
Источник сигнала, который связан с корневой системой растения назовем *базовой меткой*. Базовая метка может быть: дискретной; непрерывной (рис. 2). *Дискретной* меткой может быть металлическая полоса, которая совмещается в корневой системой растения в конкретной точке. *Непрерывной* меткой может быть металлический проводник (провод), который связан с корневой системой растения по всей длине ряда растений.



**Рис. 2. Дискретные (а) и непрерывные (б) базовые метки**

Для определения координаты базовой метки предлагаем использовать три приемных датчика  $O_1, O_2, O_3$ , расположенных на заданном расстоянии друг от друга (рис. 3). Каждый приемный датчик выдает в пространство сигнал, соответствующий расстоянию от него до базовой метки. Таким образом, расстояние до базовой метки можно считать радиусами окружностей с центрами  $O_1, O_2, O_3$ .

Рассмотрим нахождение точек пересечения окружностей с центрами  $O_1$  и  $O_2$ , которые представляют собой центры расположения приемных датчиков. На рисунке 3 обозначим: радикальная ось  $J_1J_2$  – прямая, соединяющая точки пересечения окружностей  $O_1$  и  $O_2$ ; радикальная ось  $K_1K_2$  – прямая, соединяющая точки пересечения окружностей  $O_1$  и  $O_3$ ; радикальная ось  $L_1L_2$  – прямая, соединяющая точки пересечения окружностей  $O_2$  и  $O_3$ ;  $J_R$  – середина радикальной оси  $J_1J_2$ ;  $K_R$  – середина радикальной оси  $K_1K_2$ ;  $L_R$  – середина радикальной оси  $L_1L_2$ ;  $\alpha_J$  – угол  $J_1O_1J_R$ ;  $\gamma_J$  – угол  $O_1J_1J_R$ ;  $\alpha_K$  – угол  $K_1O_1K_R$ ;  $\gamma_K$  – угол  $O_1K_1K_R$ ;  $\alpha_L$  – угол  $L_1O_2L_R$ ;  $\gamma_L$  – угол  $O_2L_1L_R$ ;  $O_{1x}, O_{2x}, O_{3x}$  – координаты центров окружностей  $O_1, O_2, O_3$  по оси  $X$ ;  $O_{1y}, O_{2y}, O_{3y}$  – координаты центров окружностей  $O_1, O_2, O_3$  по оси  $Y$ ;  $J_{1x}, J_{2x}$  – координаты точек пересечения окружностей  $O_1, O_2$  по оси  $X$ ;  $J_{1y}, J_{2y}$  – координаты точек пересечения окружностей  $O_1, O_2$



**Рис. 3. Геометрическая схема для построения математической модели определения координат базовой метки по сигналу трех приемных датчиков**

по оси  $Y$ ;  $K_{1x}, K_{2x}$  и  $K_{1y}, K_{2y}$  – координаты точек пересечения окружностей  $O_1, O_3$  соответственно по осям  $X$  и  $Y$ ;  $L_{1x}, L_{2x}$  и  $L_{1y}, L_{2y}$  – координаты точек пересечения окружностей  $O_2, O_3$  соответственно по осям  $X$  и  $Y$ ;  $J_{Rx}$  и  $J_{Ry}$  – координаты точки середины радикальной оси  $J_1J_2$  соответственно по осям  $X$  и  $Y$ ;  $K_{Rx}$  и  $K_{Ry}$  – координаты точки середины радикальной оси  $K_1K_2$  соответственно по осям  $X$  и  $Y$ ;  $L_{Rx}$  и  $L_{Ry}$  – координаты точки середины радикальной оси  $L_1L_2$  соответственно по осям  $X$  и  $Y$ ;  $M(M_x, M_y)$  – координаты базовой метки.

Расстояние между центрами окружностей является известной величиной и устанавливается в зависимости от конструктивных особенностей приемных датчиков метки и генератора.

Рассмотрим треугольник  $O_1J_1O_2$ . По теореме косинусов найдем косинус угол  $\alpha_J$ :

$$\cos(\alpha_J) = \frac{(O_1O_2)^2 + (O_1J_2)^2 - (O_2J_2)^2}{2(O_1O_2)(O_1J_2)}. \quad (1)$$

Найдем косинус угла  $\gamma_J$ , равнобедренного треугольника  $O_1J_1J_2$

$$\cos(\gamma_J) = \cos\left(\frac{180 - 2\alpha_J}{2}\right). \quad (2)$$

Найдем половину радиальной оси  $J_1J_2$

$$J_1J_R = \cos(\gamma_J)(O_2J_2), \quad (3)$$

из которой можно вычислить расстояние от центра первой окружности  $O_1$  до центра  $J_R$  радикальной оси  $J_1J_2$

$$O_1J_R = \cos(\alpha_J)(J_2J_R). \quad (4)$$

Найдем координаты центра  $J_R$  радикальной оси  $J_1J_2$  по оси  $X$

$$J_{Rx} = \frac{O_{1x} + O_1J_R(O_{2x} - O_{1x})}{O_1O_2} \quad (5)$$

и по оси  $Y$

$$J_{Ry} = \frac{O_{1y} + O_1J_R(O_{2y} - O_{1y})}{O_1O_2}. \quad (6)$$

Определим координаты точек пересечения  $J_1(J_{1x}; J_{1y}), J_2(J_{2x}; J_{2y})$  окружностей с центрами  $O_1$  и  $O_2$ :

$$\begin{aligned} J_{1x} &= \frac{J_{Rx} + J_2J_R(O_{2y} - O_{1y})}{O_1O_2}; & J_{1y} &= \frac{J_{Ry} - J_2J_R(O_{2x} - O_{1x})}{O_1O_2}; \\ J_{2x} &= \frac{J_{Rx} - J_2J_R(O_{2y} - O_{1y})}{O_1O_2}; & J_{2y} &= \frac{J_{Ry} + J_2J_R(O_{2x} - O_{1x})}{O_1O_2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Расчет координат точек пересечения окружностей  $O_2$  и  $O_3$ ,  $O_3$  и  $O_1$  точно такой же, поэтому приведем лишь конечные формулы:

– координаты точек пересечения  $K_1(K_{1x}; K_{1y})$  и  $K_2(K_{2x}; K_{2y})$  окружностей с центрами  $O_1$  и  $O_3$ :

$$K_{1x} = \frac{K_{Rx} + K_2 K_R (O_{3y} - O_{1y})}{O_1 O_3}; \quad K_{1y} = \frac{K_{Ry} - K_2 K_R (O_{3x} - O_{1x})}{O_1 O_3};$$

$$K_{2x} = \frac{K_{Rx} - K_2 K_R (O_{3y} - O_{1y})}{O_1 O_3}; \quad K_{2y} = \frac{K_{Ry} + K_2 K_R (O_{3x} - O_{1x})}{O_1 O_3}.$$
(8)

– координаты точек пересечения  $L_1(L_{1x}; L_{1y})$  и  $L_2(L_{2x}; L_{2y})$  окружностей с центрами  $O_2$  и  $O_3$ :

$$L_{1x} = \frac{L_{Rx} + L_2 L_R (O_{3y} - O_{2y})}{O_3 O_2}; \quad L_{1y} = \frac{L_{Ry} - L_2 L_R (O_{3x} - O_{2x})}{O_3 O_2};$$

$$L_{2x} = \frac{L_{Rx} - L_2 L_R (O_{3y} - O_{2y})}{O_3 O_2}; \quad L_{2y} = \frac{L_{Ry} + L_2 L_R (O_{3x} - O_{2x})}{O_3 O_2}.$$
(9)

В итоге, имеем три пары точек пересечения трех окружностей с координатами:  $J_1(J_{1x}; J_{1y})$ ,  $J_2(J_{2x}; J_{2y})$ ;  $K_1(K_{1x}; K_{1y})$ ,  $K_2(K_{2x}; K_{2y})$ ;  $L_1(L_{1x}; L_{1y})$ ,  $L_2(L_{2x}; L_{2y})$ . Для определения координаты базовой метки необходимы три точки:  $J_1(J_{1x}; J_{1y})$ ,  $K_1(K_{1x}; K_{1y})$ ,  $L_1(L_{1x}; L_{1y})$ . У данных точек координаты по осям абсцисс и ординат должны совпадать. Соответственно, эти координаты и будут координатами базовой метки.

Алгоритм определения координаты базовой метки, представленный на рис. 4, состоит из 15 блоков. После того как начала выполняться модель (блок 1), устанавливаем время моделирования  $t_m$  (блок 2) и задаем координаты каждого приемного датчика:  $O_1(O_{1x}, O_{1y})$ ,  $O_2(O_{2x}, O_{2y})$ ,  $O_3(O_{3x}, O_{3y})$  (блок 3). Рассчитываем расстояния от  $O_1$  до  $O_3$ , от  $O_1$  до  $O_2$ , от  $O_2$  до  $O_3$  (блок 4):

$$d_{13} = \sqrt{(O_{3x} - O_{1x})^2 + (O_{3y} - O_{1y})^2};$$
(10)

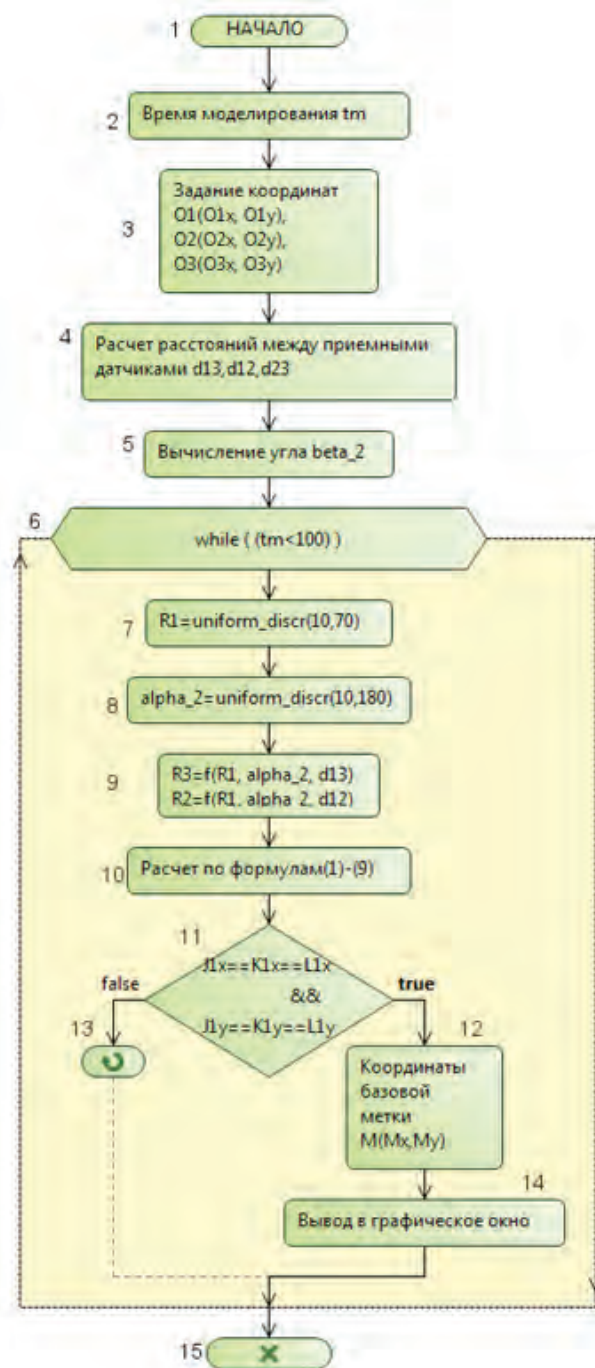
$$d_{12} = \sqrt{(O_{2x})^2 + (O_{2y})^2};$$
(11)

$$d_{23} = \sqrt{(O_{3x} - O_{2x})^2 + (O_{3y} - O_{2y})^2}.$$
(12)

Предположим, что  $O_1 O_2 O_3$  – равнобедренный треугольник. Тогда, найдем угол  $O_2 O_1 O_3 = \text{beta\_2}$  (блок 5):

$$\text{beta\_2} = a \cos\left(\frac{d_{13}/2}{d_{12}}\right).$$
(13)

Входим в бесконечный цикл (блок 6), тело которого будет повторяться до тех пор, пока не закончится время моделирования  $t_m$ . Зададим значение параметра  $R_1$  – расстояния от приемного датчика  $O_1$  до базовой метки (блок 7). В модели данный параметр изменяется случайным образом. Изменение представляет собой дискретное равномерное распределение со значениями в интервале [10, 70].



**Рис. 4. Алгоритм работы имитационной модели определения местоположения корневой системы плодовых растений**

Данный интервал выбран на основании конструктивных особенностей приемных датчиков и расположения базовой метки. Зададим значение  $\alpha_2$  (блок 8) – угла между радиусом первой окружности  $O_1$  и осью  $X$ . Используется та же функция генератора случайных чисел, что и при задании  $R_1$ . Приемные датчики должны

находиться выше уровня почвы, поэтому параметры  $R_1$  и  $\alpha_2$  моделируют местоположение базовой метки в третьем и четвертом квадрантах плоскости. Далее рассчитываются  $R_2$  – расстояние от приемного датчика  $O_2$  до базовой метки;  $R_3$  – расстояние от приемного датчика  $O_3$  до базовой метки:

$$R_3 = \sqrt{R_1^2 + d_{13}^2 - 2R_1d_{13} \cos(\alpha_2)}; \quad (14)$$

$$R_2 = \sqrt{R_1^2 + d_{12}^2 - 2R_1d_{12} \cos(\alpha_2 + \beta_2)}.$$

По формулам (1) – (9) определяем координаты точек пересечения окружностей (блок 10) и проверяем их на равенство (блок 11):

$$J_{1x} = K_{1x} = L_{1x} \ \&\& \ J_{1y} = K_{1y} = L_{1y}. \quad (15)$$

Если уравнение (15) выполняется, то координаты метки (блок 12):

$$M(M_x, M_y) = J_1(J_{1x}; J_{1y}) = K_1(K_{1x}; K_{1y}) = L_1(L_{1x}; L_{1y}). \quad (16)$$

В противном случае цикл начинается сначала (блок 13). В графическом окне (блок 14) идет геометрическое построение пересечения трех окружностей в точке  $M(M_x, M_y)$ . При истечении модельного времени  $t_m$  выходим из цикла (блок 15).

Для построения модели определения местоположения корневой системы плодовых растений используется дискретно-событийное моделирование, то есть моделирование, относящееся к алгоритмическому. Основными блоками модели AnyLogic являются активные объекты, которые позволяют моделировать любые объекты реального мира. Чтобы создать модель, необходимо создать классы активных объектов (или использовать объекты библиотек) и задать их взаимосвязи. AnyLogic интерпретирует создаваемые графически классы активных объектов в классы языка программирования Java [2]. При реализации алгоритма он задается элементом event (событие). В данной модели используется событие, происходящее по истечении таймаута, который выбирается на основании целей моделирования. В нашем случае он равен двум единицам модельного времени, так как меньшее время не позволит наблюдать за процессом.

Приведем программу реализации алгоритма определения координат базовой метки:

```
//присваиваем координат приемным датчикам
O1x=0; O2x=O1x+20; O3x=O1x+40;
O1y=0; O2y=O1y+30; O3y=O1y;
//рассчитываем расстояния между приемными датчиками
d13=sqrt(pow(O3x-O1x,2)+pow(O3y-O1y,2));
d12=sqrt(pow(O2x-O1x,2)+pow(O2y-O1y,2));
d23=sqrt(pow((O3x-O2x),2)+pow((O3y-O2y),2));
// задаем угол между радиусом R1 и осью X
double alpha_2=uniform_discr(10,180);
// рассчитываем cos(alpha_2)
double cos_alpha_2=cos(alpha_2*3.14/180);
// косинус угла beta_2 (исходя из конструктивных параметров)
double cos_beta_2=(d13/2)/d12;
// угол beta_2
double beta_2=acos(cos_beta_2)*180/3.14;
// задание радиуса первой окружности
R1=uniform_discr(10,70);
// задание радиуса третьей окружности
R3=sqrt(pow(R1,2)+pow(d13,2)-2*R1*d13*(cos(alpha_2*(3.14/180))));
// задание радиуса второй окружности
double gamma=alpha_2+beta_2;
R2=sqrt(pow(R1,2)+pow(d12,2)-2*R1*d12*(cos(gamma*(3.14/180))));
/* Рассчитаем данные для определения координат пересечения
```

```

* окружностей O1 и O2 */
//косинус угла J1O1O2
double cos_alpha_j=(pow(d12,2)+pow(R1,2)-pow(R2,2))/(2*d12*R1);
// угол J1O1O2
double alpha_j=acos(cos_alpha_j)*(180/3.14);
// угол O1J1JR
double gamma_j=(180-(2*alpha_j))/2;
// косинус угла O1J1JR
double cos_gamma_j=cos(gamma_j*(3.14/180));
//расстояние от O1 до середины радикальной линии JR
double aj=cos_alpha_j*R1;
// расстояние от J1 до середины радикальной оси JR
double hj=sqrt(pow(R1,2)-pow(aj,2));
// координата точки радикальной оси JR по оси X
double JRx=O1x+aj*(O2x-O1x)/d12;
// координата точки радикальной оси JR по оси Y
double JRY=O1y+aj*(O2y-O1y)/d12;
/* Рассчитаем данные для определения координат пересечения
* окружностей O1 и O3 */
//косинус угла K1O1O3
double cos_alpha_k=(pow(d13,2)+pow(R1,2)-pow(R3,2))/(2*d13*R1);
// угол K1O1O3
double alpha_k=acos(cos_alpha_k)*(180/3.14);
// угол O1K1KR
double gamma_k=(180-(2*alpha_k))/2;
// косинус угла O1J1KR
double cos_gamma_k=cos(gamma_k*(3.14/180));
// расстояние от O1 до середины радикальной линии KR
double ak=cos_alpha_k*R1;
// расстояние от K1 до середины радикальной оси KR
double hk=sqrt(pow(R1,2)-pow(ak,2));
// координата точки радикальной оси KR по оси X
double KRx=O1x+ak*(O3x-O1x)/d13;
// координата точки радикальной оси KR по оси Y
double KRY=O1y+ak*(O3y-O1y)/d13;
/* Рассчитаем данные для определения координат пересечения
* окружностей O2 и O3 */
//косинус угла L1O2O3
double cos_alpha_l=(pow(d23,2)+pow(R2,2)-pow(R3,2))/(2*d23*R2);
// угол L1O2O3
double alpha_l=acos(cos_alpha_l)*(180/3.14);
// угол O2L1LR
double gamma_l=(180-(2*alpha_l))/2;
// косинус угла O2L1LR
double cos_gamma_l=cos(gamma_l*(3.14/180));
//расстояние от O2 до середины радикальной линии LR
double al=cos_alpha_l*R2;
// расстояние от L1 до середины радикальной оси LR
double hl=sqrt(pow(R2,2)-pow(al,2));
// координата точки радикальной оси LR по оси X
double LRx=O2x+al*(O3x-O2x)/d23;
// координата точки радикальной оси LR по оси Y
double LRY=O2y+al*(O3y-O2y)/d23;
//Рассчитаем координаты пересечения окружностей O1, O2, O3
// Координаты пересечения окружностей O1 и O2
J1x=JRx+hj*(O2y-O1y)/d12;
J1y=JRY-hj*(O2x-O1x)/d12;
J2x=JRx-hj*(O2y-O1y)/d12;
J2y=JRY+hj*(O2x-O1x)/d12;
// Координаты пересечения окружностей O1 и O3
K1x=KRx+hk*(O3y-O1y)/d13;
K1y=KRY-hk*(O3x-O1x)/d13;
K2x=KRx-hk*(O3y-O1y)/d13;
K2y=KRY+hk*(O3x-O1x)/d13;
// Координаты пересечения окружностей O2 и O3
L1x=LRx+hl*(O3y-O2y)/d23;

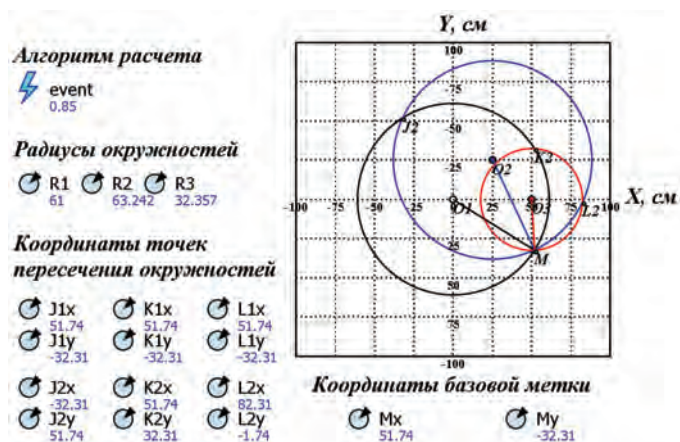
```



```

L1y=LRy-h1*(O3x-O2x)/d23;
L2x=LRx-h1*(O3y-O2y)/d23;
L2y=LRy+h1*(O3x-O2x)/d23;
//если равны, то координата базовой метки M(Mx,My)
//иначе на новую итерацию
if(J1x == K1x && K1x == L1x && J1y == K1y && K1y == L1y){
Mx = J1x;
My = J1y;
}

```



**Рис. 5. Имитационная модель определения местоположения корневой системы плодовых растений**

На рисунке 5 приведен процесс имитационного моделирования определения координат базовой метки. На экран выводятся значения радиусов и координат пересечения окружностей, а также координаты базовой метки.

**Выводы.** В результате моделирования получено подтверждение адекватности предложенной математической модели процесса определения местоположения корневой системы плодовых растений; оценены конструктивные и временные параметры реальной автоматической системы.

#### Список литературы

1. Боев, В. Д. Компьютерное моделирование : пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic7 / В. Д. Боев. – СПб. : ВАС, 2014. – 432 с.
2. Гордеев, А. С. Моделирование в агроинженерии / А. С. Гордеев. – СПб. : Лань, 2014. – 384 с.

## A Simulation Model for Detecting the Location of the Root System of Fruit Plants

A. S. Gordeev, B. S. Mishin

Department of Agroengineering, Power Engineering and Information Technologies,  
Michurinsk State University of Agriculture, Michurinsk, Russia;  
boris.sergeewitch@yandex.ru

**Keywords:** agriculture; control systems; modeling; plants; positioning; working organs.



**Abstract:** The paper proposes a simulation model that allows detecting the coordinates of the plant root system location, using the data from the receiving sensors. An algorithm and a mathematical model for determining the coordinates of the base label are developed; the model consists of three receiving sensors, a block of a random variable generator for input parameters. The program for implementing the algorithm for determining the coordinates of the base label in the AnyLogic software is presented.

#### *References*

1. Boev V.D. *Komp'yuternoe modelirovanie* [Computer modelling], St. Petersburg: VAS, 2014, 432 p. (In Russ.)
2. Gordeev A.S. *Modelirovanie v agroinzhenerii* [Modeling in agroengineering], St. Petersburg: Lan', 2014, 384 p. (In Russ.)

---

### **Nachahmungsmodell zur Bestimmung des Standortes des Wurzelsystems von Obstpflanzen**

**Zusammenfassung:** Es ist ein Simulationsmodell vorgeschlagen, mit dem die Koordinaten des Standortes des Pflanzenwurzelsystems anhand der Daten von empfangenden Sensoren bestimmt werden können. Es sind ein Algorithmus und ein mathematisches Modell zur Bestimmung der Koordinaten der Basismarkierung entwickelt, die das Vorhandensein von drei Empfangssensoren, einen Block eines Zufallsvariablen-generators für Eingabeparameter voraussetzen. Das Programm zur Implementierung des Algorithmus zur Bestimmung der Koordinaten der Basismarkierung im Programm-komplex AnyLogic ist vorgestellt.

---

### **Modèle de simulation pour la détermination de la localisation du système racinaire des plantes fruitières**

**Résumé:** Est présenté le modèle de simulation qui permet de définir les coordonnées de la localisation du système racinaire des plantes à la base de données avec l'emploi des capteurs récepteurs. Sont élaborés un algorithme et un modèle mathématique de la définition des coordonnées de la marque de base qui suggèrent la présence de trois capteurs récepteurs, de l'unité du générateur des valeurs aléatoires pour les paramètres d'entrée. Est présenté le programme de la mise en œuvre de l'algorithme de la détermination des coordonnées de la marque de base dans le complexe AnyLogic.

---

**Авторы:** *Гордеев Александр Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Агроинженерия, электроэнергетика и информационные технологии»; *Мишин Борис Сергеевич* – аспирант кафедры «Агроинженерия, электроэнергетика и информационные технологии», ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», г. Мичуринск, Россия.

**Рецензент:** *Манаенков Константин Алексеевич* – доктор технических наук, профессор, директор инженерного института ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», г. Мичуринск, Россия.