

ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ РОБОТИЗИРОВАННОГО МОДУЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ПРОПОЛЬЩИКА СОРНЯКОВ

Несмиянов И.А., Воробьева Н.С., Иванов А.Г.

Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград

Ключевые слова: структурное строение, степень подвижности, маневренность, роботизированный модуль, кинематическая избыточность, прополка сорняков.

Аннотация. В статье приведено обоснование необходимых перемещений рабочего органа роботизированного пропольщика сорняков в рядках с целью обеспечения заданного технологического процесса. Проведен подробный структурный анализ механизма позиционирования выходного звена, определены степень подвижности рабочего органа и его маневренность в базовой плоскости. Приведены некоторые результаты практической реализации конструкции роботизированного модуля прецизионного пропольщика сорняков.

JUSTIFICATION OF THE STRUCTURE OF A ROBOTIC PRECISION WEED-WEEDING MODULE

Nesmiyanov I.A., Vorobyova N.S., Ivanov A.G.

Volgograd State Agrarian University, Volgograd

Keywords: structural configuration, degree of mobility, maneuverability, robotic module, kinematic redundancy, weeding.

Abstract. The article presents a justification for the required movements of the robotic weeder's working tool within crop rows to ensure the specified operational process. A detailed structural analysis of the output link positioning mechanism is conducted, and the working tool's degree of mobility and maneuverability within the reference plane are determined. Some results regarding the practical implementation of the robotic precision weeder module's design are also presented.

При возделывании овощных культур чаще всего используют в качестве борьбы с сорняками культивацию междурядий. Прополка в рядках культурных растений возможна лишь с использованием ручного труда, либо внесением гербицидов. Последнее нежелательно как с экологической точки зрения, так и с позиции безопасности продукции.

Предлагается для прополки сорняков в рядках растений использовать разработанный авторами настоящей статьи робот-пропольщик [1]. В качестве рабочего органа (РО) пропольщика используется фреза, которая позиционируется над сорняком и вращаясь разрушает его стеблевую и корневую системы.

Механизм перемещения рабочего органа модуля для прополки (рис. 1) представляет собой сложную кинематическую систему, которую можно классифицировать как пространственный манипуляционный механизм последовательно-параллельно-последовательной структуры.

На рисунке 1 представлена схема движения прополочного агрегата с роботизированным модулем прополки при технологическом процессе. Шасси перемещается с постоянной скоростью вдоль рядков растений с нарастанием глобальной координаты x_{2n} , в то время как РО выполняет периодическую дискретную работу по выфрезеровыванию сорняков и должен в процессе

движения агрегата некоторое время задерживаться над сорняком и иметь контакт с почвой. Поэтому для позиционирования РО необходимо изменение координаты каретки x_1 , причем как в направлении движения агрегата, так и в противоположном. Так как модуль прополки одновременно будет обрабатывать несколько рядков, то каретка с фрезой (РО) должна иметь возможность перемещения по оси y , т.е. перемещаться из одного рядка в другой. Таким образом механизм перемещения РО должен обеспечивать позиционирование РО по двум координатам в плоскости xy , причём при этом иметь дополнительную подвижность для обеспечения манёвренности РО в базовой плоскости равной или больше единицы. То есть механизм перемещения рабочего органа должен быть кинематически избыточным.

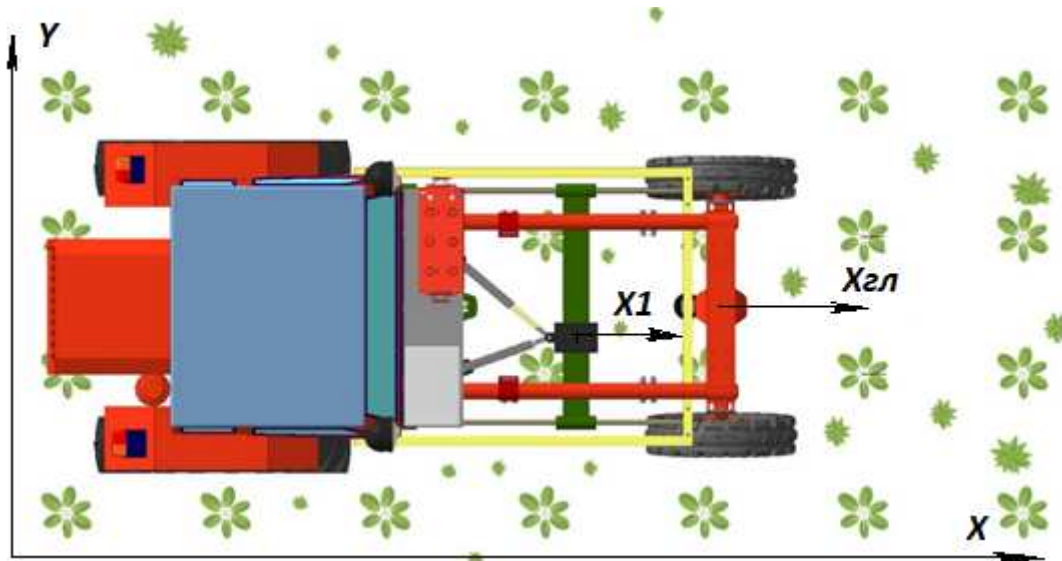


Рис. 1. Схема движения прополочного агрегата по полю

Для обоснования структурного строения механизма позиционирования РО представим его структурную схему в квазиплоском представлении (рис. 2).

Механизм содержит 9 подвижных звеньев ($n = 9$), шесть поступательных кинематических пар V класса ($p_{5л} = 6$) и пять вращательных кинематических пар V класса ($p_{5в} = 5$). Всего 11 одноподвижных кинематических пар. Степень подвижности рабочего органа 9 определится как

$$W = 3n - 2p_5 = 3 \cdot 9 - 2 \cdot 11 = 5. \quad (1)$$

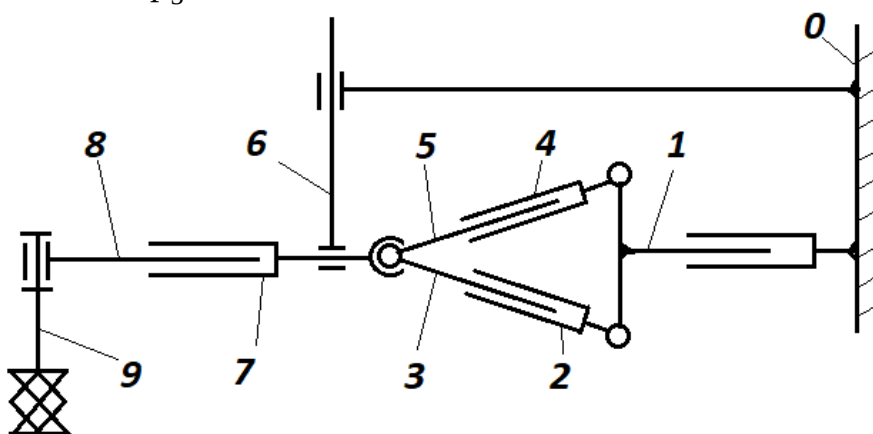


Рис. 2. Квазиплоское представление механизма позиционирования фрезы модуля прополки

С учетом глобального (переносного) перемещения шасси, несущего модуль прополки, степень подвижности фрезы относительно поверхности поля будет $W = 6$.

На рисунке 3 представлена топологическая схема механизма позиционирования фрезы модуля пропольщика [2].

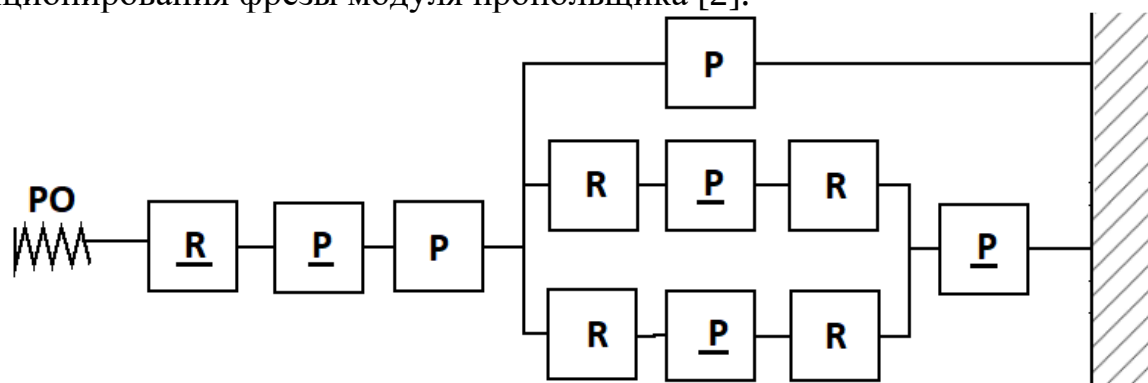


Рис. 3. Топологическая схема механизма пропольщика

На топологической схеме (рис. 3) неподвижные поступательные пары обозначены символом P , вращательные кинематические пары – символом R . Исполнительные приводы обозначены знаком подчеркивания: $\underline{P}$ – поступательный привод (актуатор), $\underline{R}$ – вращательный привод. Рабочий орган обозначен PO .

Число замкнутых контуров Гофмана определяется по выражению:

$$k = \sum_{i=1}^5 p_i - n = 11 - 9 = 2. \quad (2)$$

И это хорошо видно из топологической схемы механизма (рис. 3). Первый контур образован цепью, прикрепленной к стойке $\underline{P} - R - \underline{P} - R - P$, второй контур – внутренний $R - \underline{P} - R - R - \underline{P} - R$. Есть ещё и третий – независимый контур. По определению О.Г. Озола [3] число независимых контуров механизма определяется как

$$k = \sum_{i=1}^5 p_i - n + 1. \quad (3)$$

Таким образом, мы имеем механизм с тремя контурами: двумя замкнутыми и одним независимым.

Число исполнительных приводов в механизме равно пяти: четыре поступательных и один вращательный. Таким образом, число приводов равно числу степеней подвижности рабочего органа (без учета глобальных перемещений шасси):

$$n_{np} = W = 5. \quad (4)$$

Для позиционирования фрезы пропольщика в пространстве необходимо три координаты: x, y, z , механизм же обладает 5-ю степенями подвижности, из которых за позиционирование в пространстве отвечают четыре привода. Позиционирование по координате z обеспечивается актуатором (кинематическая пара 7-8, рис. 2). Изменение по координате x осуществляется актуаторами 1, 2 и 3 (кинематические пары 0-1, 2-3 и 4-5 соответственно, рис. 2). Перемещение вдоль оси y осуществляется актуаторами 2 и 3 (кинематические пары 2-3 и 4-5 соответственно). Отсюда следует, что механизм кинематически избыточен, однако это необходимо для повышения маневренности исполнительного звена (PO) в базовой плоскости агрегата при его движении.

Для определения маневренности в базовой плоскости механизм на рисунке 2 заменим эквивалентным (рис. 4).

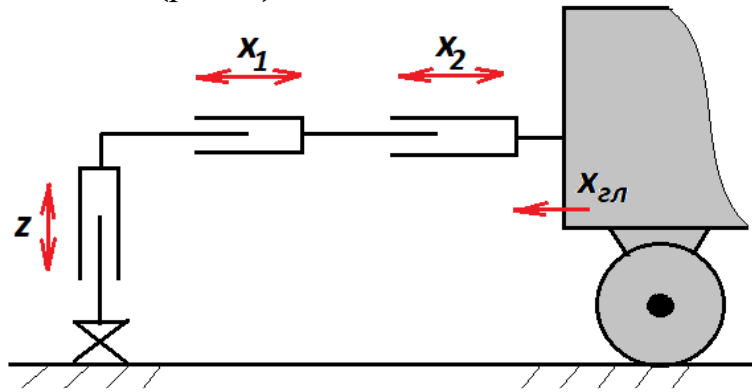


Рис. 4. Эквивалентная схема механизма пропольщика для определения маневренности

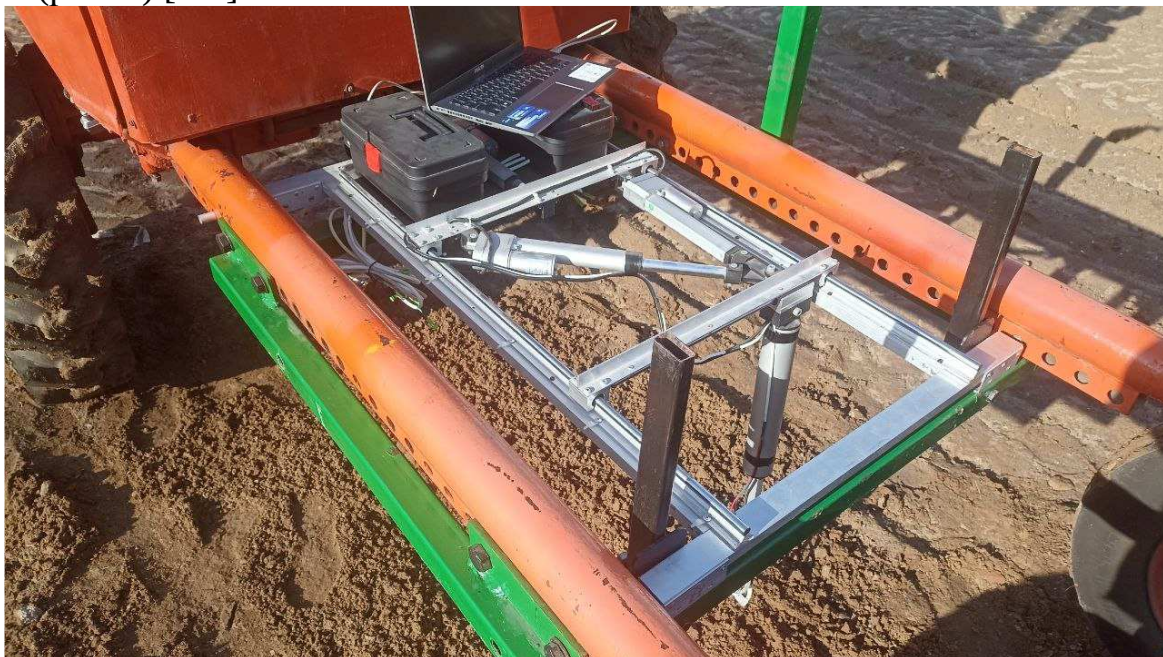
Базовая маневренность согласно формуле Озола [4, 5]

$$m_{\bar{o}} = \sum f_{kn} - 3 = 4 - 3 = 1, \quad (5)$$

где f_{kn} – сумма степеней свободы кинематических пар, обеспечивающих движение в базовой плоскости.

Таким образом $m_{\bar{o}} = 1 > 0$, говорит о том, что механизм обладает маневренностью в базовой плоскости, а значит рабочий орган может иметь контакт с поверхностью поля в течение определённого времени при постоянном изменении координаты $x_{2л}$ (постоянном движении шасси, несущего модуль прополки) и при одновременном изменении координат x_1 (поступательная кинематическая пара 0-1) и x_2 (поступательные кинематические пары 2-3 и 4-5).

На рисунке 5 представлена практическая реализация роботизированного модуля прецизионного пропольщика на самоходном шасси. Разработанная конструкция модуля дискретной прецизионной прополки сорняков в рядках крепится снизу к лонжеронам рамы самоходного шасси ВТЗ-30СШ или Агромаш 50СШ (рис. 5) [6-8].



а

Рис. 5. Общий вид модуля дискретной прецизионной прополки сорняков в рядках:
а) вид на модуль прополки сверху



б

Рис. 5. Общий вид модуля дискретной прецизионной прополки сорняков в рядках:
б) вид на фрезу (РО)

В результате испытания выявлено, что уничтожение сорняков на опытных делянках с перцем составило 96%, что соответствует СТО АИСТ 4.6-2018. Данный модуль дискретной прецизионной прополки сорняков эффективно использовался на полях с малой засоренностью сорной растительностью и росте сорняков до 10 см.

Список литературы

1. Патент №2703092 РФ. Робот-пропольщик / Н.С. Воробьева, А.В. Дяшкин, А.Г. Иванов, И.А. Несмиянов, В.В. Жога, В.В. Дяшкин-Титов. – Заявка №2019102103 от 25.01.2019; опубл. 15.10.2019.
2. Андриенко П.А., Евграфов А.Н., Козликин Д.П., Семенов Ю.А., Семенова Н.С. Использование элементов теории графов для структурного анализа механизмов // Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 11-й Международной научной конференции. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – с.43-58.
3. Кожевников С.Н. Теория механизмов и машин. Учебное пособие. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1969. – 584 с.
4. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с.
5. Жавнер В.Л., Крамской Э.И. Погрузочные манипуляторы / Под ред. проф. А.И. Колчина. – Л.: Машиностроение (Ленинградское отд-ние), 1975. – 160 с.
6. Иванов А.Г., Несмиянов И.А., Воробьева Н.С. Обоснование параметров культиватора с автоматизированным блоком удаления сорняков // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2024. – №9(292). – С. 31-35.
7. Несмиянов И.А., Цепляев В.А., Воробьева Н.С., Иванов А.Г., Захаров Е.Н., Борисенко И.Б., Дяшкин-Титов В.В., Дяшкин А.В. Разработка сменных модулей реконфигурируемого роботизированного агрегата для технологических процессов возделывания овощей для семеноводства: монография. – Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2026. – 132 с.
8. Воробьева Н.С., Дяшкин-Титов В.В., Жога В.В., Несмиянов И.А. Синтез оптимального алгоритма перевода механической системы в заданное положение // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2026. – №2. – С. 148-155.

Сведения об авторах:

Несмиянов Иван Алексеевич – д.т.н., профессор;

Воробьева Наталья Сергеевна – д.т.н., доцент;

Иванов Алексей Геннадьевич – к.т.н., доцент.