

DOI:

РАЦИОНАЛЬНАЯ СТОИМОСТЬ РОБОТОВ ДЛЯ СБОРА УРОЖАЯ ЯБЛОК

Кузнецова А.А.

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,
Россия, Москва, Щербаковская ул., д. 38

AnAKuznetsova@fa.ru

Аннотация: Представлена методика оценки экономической эффективности роботов для сбора плодов и определения рациональной цены таких роботов, чтобы они были востребованы садоводами. Продемонстрировано, что основным препятствием к массовому внедрению роботизированной технологии сбора урожая плодовых культур является завышенная цена существующих прототипов роботов для сбора фруктов. Показано, что при стоимости до 100 000 евро роботизированное решение, управляемое тремя сменными операторами, заменяет десятерых сезонных рабочих и сокращает недобор урожая с 30–50%, характерных для ручного сбора, до 15%, при той же или меньшей стоимости владения.

Ключевые слова: робот для сбора урожая плодовых культур, робот для сбора урожая яблок, совокупная стоимость владения, рациональная цена, экономическая эффективность.

Введение

Численность занятых в сельском хозяйстве сегодня в развивающихся странах составляет 30% населения, в развитых – 2%, при этом человеческий труд составляет до 40% затрат на производство сельскохозяйственной продукции.

Одной из отраслей сельского хозяйства, наименее автоматизированных на сегодняшний день, является садоводство. В частности, сбор урожая большинства плодовых культур производится сезонными рабочими – это тяжелый монотонный и невысоко оплачиваемый физический труд.

С каждым годом все больше людей переезжают в города, чтобы заниматься более легким трудом. По данным [1] процент городского населения в мире за период с 1960 по 2018 г. практически линейно вырос с 34 до 55 %. Молодежь не стремится работать сборщиками плодов, и средний возраст занятых в садоводстве растет.

В европейских странах становится все сложнее нанимать сезонных рабочих для сбора урожая плодов, растет минимальная почасовая ставка оплаты труда таких рабочих.

В ближайшем будущем технология сбора плодов будет роботизирована. Автоматизированная технология будет востребована в том случае, если при таких же или меньших затратах по сравнению с ручным трудом роботы будут собирать больше плодов, либо если роботизированный труд будет стоить дешевле человеческого при сравнимых показателях качества.

В докладе представлена методика оценки экономической эффективности роботов для сбора плодов и определения рациональной цены таких роботов, чтобы они были востребованы садоводами.

На конкретном примере сбора урожая яблок проводится оценка стоимости ручного труда по сбору яблок и стоимости роботизированного решения для сбора яблок.

Показано, что роботизированное решение, управляемое тремя сменными операторами, заменяет десятерых сезонных рабочих и сокращает недобор урожая с 30–50%, характерных для ручного сбора, до 15%.

При этом при стоимости робота в несколько десятков тысяч евро роботизированное решение имеет существенно большую экономическую эффективность, чем использование ручного труда, и лишь при стоимости робота, равной 100 000 евро, стоимость владения роботизированным решением становится эквивалентной использованию ручного труда.

1 Прототипы роботов для сбора плодов

Роботов для сбора урожая фруктов начали разрабатывать еще в конце 1970-х г. [1]. Но за последние сорок лет производительность таких роботов не увеличилась, а существующие прототипы стоят сотни тысяч евро, что не позволяет роботам окупаться в садоводческих хозяйствах.

Работы [2–7] посвящены описанию прототипов роботов для сбора урожая яблок, разработанных только за последние полтора года (в 2019–2020 гг.). Всего на сегодняшний день роботы для сбора яблок представлены более чем 50 прототипами.

Однако ни один из существующих прототипов еще не используется в реальных садах. Два из наиболее готовых к использованию прототипов представлены Abundant Robotics [8] и FFRobotics [9]. Однако на официальных сайтах этих компаний ни цены на роботов, ни цены на роботизированный

сбор урожая как услуги, не указаны. По неофициальным данным, цены на таких роботов начинаются от 200 000 евро.

2 Фактический подход к оценке эффективности внедрения роботизированных решений в сельском хозяйстве

Несмотря на то, что в целом фермеры теоретически рассматривают возможность внедрения роботизированных решений, в том числе для сбора урожая, практически на сегодняшний день не существует ни одного примера реальных, хотя бы единичных, внедрений роботов для сбора плодов.

Большинство фермеров считает, что эффективность применения роботизированных решений (Ef) определяется предложенными еще в конце 1960-х гг. в процессе механизации сельского хозяйства индексом эффективности робота, равному отношению годового времени полезной работы робота к сумме годового времени полезной работы робота T_f , годового времени простоев T_s и годового времени наладок T_r [10]:

$$(1) \quad Ef = \frac{T_f}{T_f + T_s + T_r},$$

а также индексом полевой загрузки машины (*Field Machine Index, FMI*), равному доле рабочего времени робота в году:

$$(2) \quad Ef = \frac{T_f - T_s - T_r}{T_f - T_s}.$$

Такой подход хорошо работает при внедрении массовой механизации и позволяет выбрать, например, такие комбайны, которые реже ломаются и требуют меньше времени на обслуживание.

Тем не менее, пока роботизированные решения для сбора плодов только подходят к возможности практического внедрения, этот способ анализа эффективности совершенно не позволяет оценить эффективность внедрения роботов: даже если робот не будет ломаться и требовать настройки, фермерам не понятно, каким образом окупятся, и окупятся ли инвестиции.

Для того, чтобы ответить на этот вопрос, необходимо аккуратно оценить все выгоды и затраты, связанные с внедрением роботизированного решения, с учетом ценности денег во времени.

При этом анализу ценности денег в сельскохозяйственной науке и практике внимание практически не уделяется. Так, в стандарте ASABE (Американского общества агро- и биоинженеров) "EP496.3: Agricultural machinery management" («Управление сельскохозяйственной техникой»), принятом в 2011 г., предлагается оценивать годовую стоимость владения техникой C_A просто как некоторый процент C_0 от первоначальной стоимости P_M :

$$(3) \quad C_A = C_0 P_M,$$

где

$$(4) \quad C_0 = \frac{1 - S_V}{L} + i \frac{1 + S_V}{2} + K_2,$$

L – полезный срок эксплуатации машины, S_V – остаточная стоимость машины в конце полезного срока эксплуатации, K_2 – годовая ставка налогов, страховок и аренды [11].

В большинстве других стран вопросам анализа экономической эффективности внедрения роботов уделяется еще меньше внимания.

Основная часть авторов научных статей, посвященный анализу денежных потоков в сельском хозяйстве, пока даже не знакома с понятием ренты и рассчитывает современную ценность потока из 10 одинаковых платежей по формуле

$$(5) \quad NPV = C + \frac{C}{1+i} + \frac{C}{(1+i)^2} + \dots + \frac{C}{(1+i)^9}.$$

На самом деле ни рост производительности труда, ни сокращение оплаты труда, ни сокращение недобора урожая представленные подходы никак не учитывают, а ведь именно в этих трех факторах и сосредоточены основные цели перехода на роботизированный сбор урожая.

При этом основным фактором, сдерживающим внедрение роботов, является цена машинного труда.

2 Соотношение между ценой ручного и машинного труда и оптимальный уровень роботизации в сельском хозяйстве

На рис. 1 представлены графики зависимости суммарной стоимости ручного и машинного труда при различных уровнях автоматизации.

По оси абсцисс отложен уровень роботизации, который может принимать значения от нуля до единицы. При этом функция зависимости стоимости ручного труда, а функция зависимости стоимости машинного труда возрастает с ростом уровня роботизации.

Обе эти функции являются выпуклыми вниз. Например, очевидно, что чем выше уровень роботизации, тем дороже обходится его повышение.

Вертикальная линия определяет оптимальную долю роботизации, минимизирующую эту суммарную стоимость.

Анализ модели, представленной на рис. 1, показывает, что только снижение стоимости владения роботизированными технологиями позволяет ускорить их массовое проникновение.

3 Стоимость ручного труда по сбору урожая плодов

Перейдем к более детальному сопоставлению стоимости ручного и машинного труда при роботизации садоводства на конкретном примере работа для сбора урожая яблок.

Чтобы роботы для сбора плодов были востребованы садоводами, необходимо обеспечить баланс между их стоимостью и эффективностью.

Сначала оценим стоимость ручного труда по сбору яблок.

Если количество рабочих часов в день принять равным 8, количество рабочих дней в неделю 6, а количество недель для сбора урожая в году – 5, то общее количество рабочих часов в году составит $8 \times 6 \times 5 = 240$.

Во многих странах существуют ограничения по минимальной норме почасовой оплаты труда сезонных рабочих, начинающиеся от 12 евро. Считая, что оплата труда составляет 12 евро в час, за сезон один рабочий получает $12 \times 240 = 2880$ евро.

Также в стоимость труда входят страховые взносы. Если считать ставку страховых взносов работодателей равной 19,325%, размер страховых взносов в расчете на одного сборщика плодов окажется равным $2880 \times 19,325\% = 556,56$ евро, а стоимость труда одного рабочего с учетом страховых взносов – $2880 + 556,56 = 3436,56$ евро.

В яблоневых садах интенсивного типа урожайность с одного дерева составляет примерно 70–80 плодов. Считая массу одного яблока равной 0,2 кг, получим урожайность с дерева $75 \times 0,2 = 15$ кг.

Недобор урожая при его ручном сборе доходит до 50%. Считая, что несобранными остаются 30% яблок, а на сбор одного яблока у рабочего уходит 10 с, можно рассчитать среднюю массу собранного урожая с дерева $15 \times (1 - 0,3) = 10,5$ кг и среднее время сбора урожая с дерева $75 \times (1 - 0,3) \times 10 = 525$ с. С учетом этого можно вычислить, что один рабочий собирает в час $3600 / 525 \times 10,5 = 72$ кг, а за сезон – $240 \times 72 = 17\,280$ кг.

Итак, за сезон один рабочий обходится в $2880 + 556,56 = 3436,56$ евро и собирает 17 280 кг.

4 Стоимость роботизированного сбора урожая плодов

Теперь оценим стоимость владения роботизированным решением для сбора яблок.

Учитывая, что робот со сменными операторами могут работать по 20 ч в день, при 6 рабочих днях в неделю и 5 неделях в году, отведенных на сбор урожая, получим общее количество рабочих часов в году $20 \times 6 \times 5 = 600$.

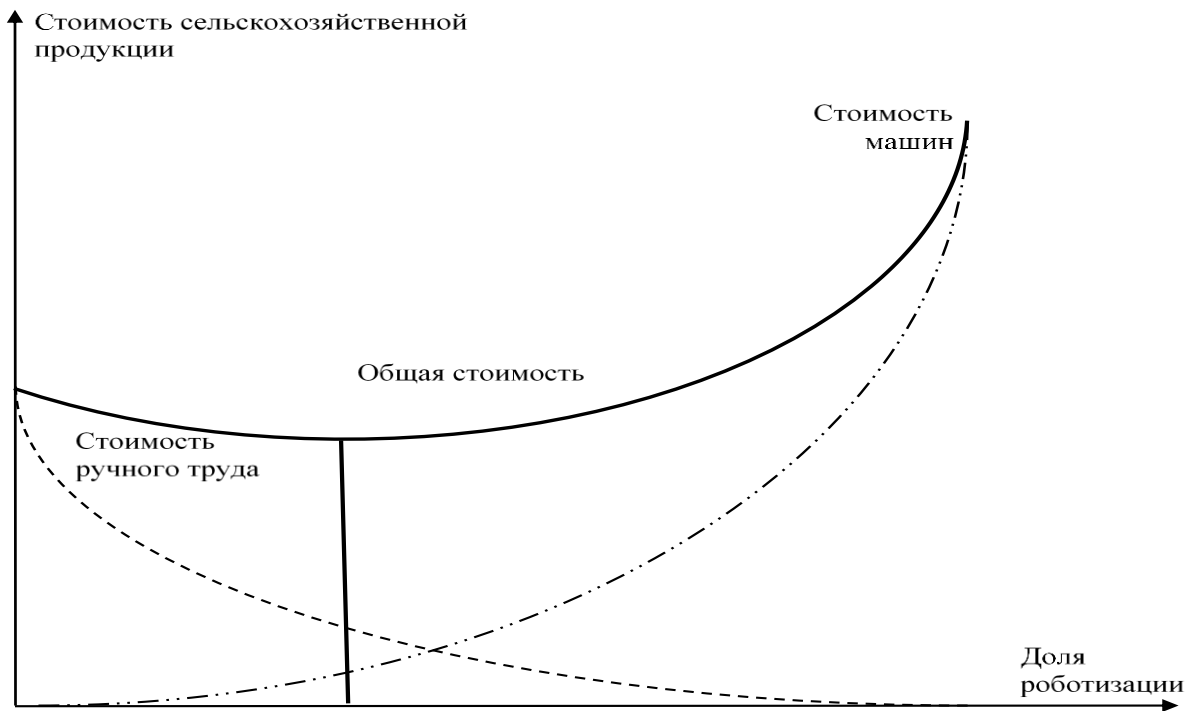
Если доля обнаруженных роботом плодов составляет 92%, а доля потерянных плодов равна 8%, то недобор урожая роботом составит $1 - 0,92 \cdot (1 - 0,08) = 15,36\%$.

Если робот имеет 4 манипулятора, каждый из которых собирает одно яблоко, так же как и рабочий, за 10 с, то средняя масса урожая, собранного с одного дерева, составит $15 \times (1 - 0,1536) = 12,696$ кг и среднее время сбора урожая с дерева $75 \times (1 - 0,1536) \times 10 / 4 = 158,7$ с.

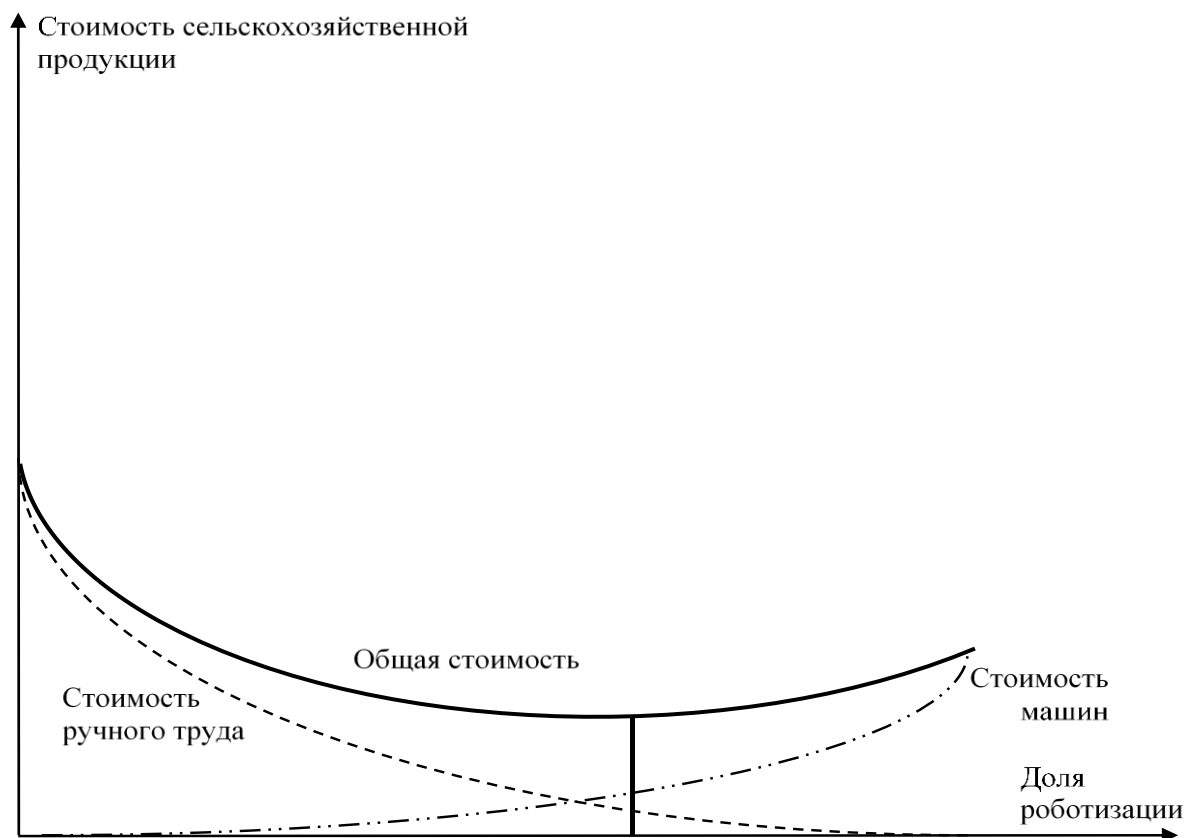
Тогда в час робот соберет $3600 / 158,7 \times 12,696 = 288$ кг, а за сезон – $240 \times 288 = 172\,800$ кг, т. е. столько же, что 10 рабочих.

Оплата труда операторов выше, чем рабочих. Считая часовую ставку операторов, работающих посменно, равной 25 евро, получим суммарную оплату труда операторов за год: $25 \times 240 = 15\,000$ евро.

Учитывая страховые взносы по ставке 19,325%, которые составят $15\,000 \times 19,325\% = 2898,75$ евро, получим суммарную годовую стоимость труда при роботизированной уборке урожая $15\,000 + 2898,75 = 17\,898,75$ евро.



а) при дорогих машинах



б) при удешевлении машин

Рис. 1. Оптимальная доля роботизации при высокой стоимости машин (а) и при их удешевлении (б)

При мощности робота в 1 кВт и цене электроэнергии в 0,20 евро за 1 кВт·ч общая стоимость электроэнергии, потребляемой роботом за год составит $0,20 \cdot 240 = 120$ евро.

5 Совокупная стоимость ручного и роботизированного сбора урожая

При оценке эффективности ИТ-проектов уже давно стандартом де факто стал анализ совокупной стоимости владения – современной ценности потока платежей, связанных с проектом.

Фактически внедрение робота в агрохозяйство представляет собой типичный проект ИТ-трансформации, однако

Если робот, имеющий 10-летний срок полезной эксплуатации, стоит 50 000 евро, а его годовое техническое обслуживание обходится в 2500 евро (включая расходные материалы), то общая стоимость роботизированного сбора урожая в первый год владения роботом составит $50\,000,00 + 2500,00 + 17\,898,75 + 120,00 = 70\,518,75$ евро, а во второй и последующие году – соответственно $2500,00 + 17\,898,75 + 120,00 = 20\,518,75$ евро.

Таким образом, совокупная стоимость владения роботом за все 10 лет, равная современной ценности всех платежей, связанных с покупкой робота, его обслуживанием, оплатой труда операторов, отчислением страховых взносов, а также оплатой электроэнергии, будет равна

$$(6) TCO_{R1} = 70\,518,75 + \frac{20\,518,75(1 - (1 + 0,01)^{-9})}{0,01} = 246\,282,72 \text{ евро.}$$

Совокупная стоимость ручного труда 10 рабочих, собирающих такой же объем урожая, что и робот, составит

$$(7) TCO_H = \frac{10 \cdot 3436,56(1 + 0,01)(1 - (1 + 0,01)^{-10})}{0,01} = 328\,741,93 \text{ евро.}$$

Если робот стоит 100 000 евро, а его ежегодное техническое обслуживание обходится в 5000 евро, то общая стоимость роботизированного сбора урожая в первый год владения роботом составит $100\,000,00 + 5000,00 + 17\,898,75 + 120,00 = 123\,018,75$ евро, во второй и последующие году – соответственно $5000,00 + 17\,898,75 + 120,00 = 23\,018,75$ евро, а совокупная стоимость владения роботом будет равна

$$(8) TCO_{R2} = 123\,018,75 + \frac{23\,018,75(1 - (1 + 0,01)^{-9})}{0,01} = 320\,197,77 \text{ евро.}$$

При стоимости робота в 300 000 евро и стоимости ежегодного технического обслуживания в 15000 евро общая стоимость роботизированного сбора урожая в первый год владения роботом составит $100\,000,00 + 5000,00 + 17\,898,75 + 120,00 = 333\,018,75$ евро, во второй и последующие году – соответственно $5000,00 + 17\,898,75 + 120,00 = 33\,018,75$ евро, а совокупная стоимость владения роботом будет равна

$$(9) TCO_{R3} = 333\,018,75 + \frac{33\,018,75(1 - (1 + 0,01)^{-9})}{0,01} = 615\,857,94 \text{ евро.}$$

6 Результаты

Мы видим, что при разумной цене робота для сбора фруктов его использование привлекательно для садоводов с экономической точки зрения. Учитывая, что основную долю в стоимости робота составляет интеллектуальный капитал разработчиков, для расширения использования роботизированных решений для сбора фруктов целесообразно устанавливать цены на роботов на уровне нескольких десятков, а не сотен тысяч евро.

7 Обсуждение

Значительный процент фермеров хотел бы использовать роботов для сбора фруктов. Однако стоимость существующих роботов для сбора фруктов на уровне сотен тысяч евро не только не позволяет таким роботам окупиться в практической работе, но даже не позволяет фермерам рассмотреть возможность покупки этих роботов.

Поэтому, несмотря на большое количество прототипов роботов для сбора фруктов и потенциальную готовность фермеров их покупать, ни одна садоводческая ферма до сих пор не использует их, главным образом, из-за слишком высоких затрат.

Человеческий труд в сельском хозяйстве намного дешевле современного робототехнического оборудования, но эта ситуация изменится. В настоящее время в сельском хозяйстве не хватает как неквалифицированных, так и квалифицированных рабочих.

Роботизация садоводства, повышение эффективности роботизированных технологий и их удешевление помогут решить эту проблему. Параллельно с этим возрастет и потребность в высококвалифицированных кадрах.

В будущем использование роботов для сбора плодов поможет повысить эффективность работы садоводческих ферм за счет повышения производительности труда во время сбора урожая и сокращения недобора урожая.

Литература

1. *Bechar A., Vigneault C.*. Agricultural robots for field operations: Concepts and components // *Biosystems Engineering*, 2016, vol. 149, pp. 94–111.
2. *Jia W., Tian Y., Luo Y., Zhang Zh., Zheng Y.* Detection and segmentation of overlapped fruits based on optimized mask R-CNN application in apple harvesting robot // *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, vol. 172, article 105380.
3. *Gené-Mola J., Gregorio E., Cheein F.A., Guevara J., Llorens J., Sanz-Cortiella R., Escolà R., Rosell-Polo J.R.*. Fruit detection, yield prediction and canopy geometric characterization using LiDAR with forced air flow // *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, vol. 168, pp. 105–121.
4. *Kang H., Chen C.* Fruit detection, segmentation and 3D visualization of environments in apple orchards // *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, vol. 171, article 105302.
5. *Wan Sh., Goudos S.* Faster R-CNN for multi-class fruit detection using a robotic vision system // *Computer Networks*, 2020, vol. 168, article 107036.
6. *Kuznetsova A., Maleva T., Soloviev V.* Detecting apples in orchards using YOLO-v3 // in *Proceedings from ICCSA 2020: The 20th International Conference on Computational Science and its Applications*, Cagliari, Italy, 1–4 July 2020, pp. 1–12.
7. *Kuznetsova A., Maleva T., Soloviev V.* Using YOLOv3 algorithm with pre- and post-processing for apple detection in fruit-harvesting robot / *Agronomy*, 2020, vol. 10, pp. 1–19.
8. [Abundant Robotics Official Site. https://www.abundantrobotics.com](https://www.abundantrobotics.com)
9. [FFRobotics Official Site. https://www.ffrobotics.com](https://www.ffrobotics.com)
10. *Shamshiri R., Ehsani R., Maja J.M., Roka F.M.* Determining machine efficiency parameters for a citrus canopy shaker using yield monitor data // *Applied Engineering in Agriculture*. 2013. V. 29. № 1. P. 33–41.
11. *Zhang Z., Zhang Z.H., Wang X.M., Liu H., Wang Y.J., Wang W.J.* Models for economic evaluation of multi-purpose apple harvest platform and software development // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019. V. 12. № 1. P. 74–83.