

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ СКОРОСТИ И ПРОБУКСОВКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

В. П. МАЛЬЦЕВ

Цель описанного в работе датчика – измерение абсолютной скорости и пробуксовки ведущих колес сельскохозяйственных агрегатов для оптимизации их работы. Для этого используется комбинация контактного и бесконтактного измерителей скорости. В работе были проведены натурные эксперименты разработанного комплекса на двух видах почв с вычислением значений истинной скорости и коэффициента пробуксовки.

Ключевые слова: радар, контактный датчик, 3D спектр, оптимизация работы, коэффициент пробуксовки.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение скорости подвижных агрегатов возможно проводить несколькими способами. Контактный способ заключается в измерении скорости вращения колес с дальнейшим пересчетом в линейную скорость движения агрегата. Иной способ — радиолокационный, при котором датчик непосредственно измеряет скорость относительно подстилающей поверхности. Комбинация данных измерений находит применение в сельском хозяйстве, где одним из путей повышения урожайности является обеспечение равномерности посевов, опрыскивания и внесения удобрений, для чего необходимо контролировать скорость движения агрегата относительно подстилающей поверхности [1]. Однако показания традиционных датчиков скорости контактного типа V_c , основанных на измерении скорости вращения колес, отличаются значительной погрешностью, связанной с пробуксовкой и проседанием колес, которые определяются типом почвы, ее структурой и влажностью. Поэтому значительный интерес представляет применение бесконтактных радиолокационных датчиков, основанных, например, на измерении эффекта Доплера [2], обеспечивающих измерение абсолютного значения скорости движения V_R с высокой точностью.

При этом важным показателем оптимальности режима работы сельскохозяйственных машин является коэффициент пробуксовки $K_s = 1 - V_R/V_c$, знание которого позволяет выбирать наиболее экономный режим движения агрегата. Использование комбинации контактного и радиолокационного датчиков позволяет вычислить коэффициент пробуксовки как относительную разность показаний.

В связи с этим настоящая работа посвящена результатам разработки и предварительных испытаний комбинированного датчика на основе фотооптического датчика скорости контактного типа и дистанционного измерителя скорости в виде когерентного радара миллиметрового диапазона.

1. КОНТАКТНЫЙ ДАТЧИК СКОРОСТИ

Контактный датчик скорости (рис. 1, а) представляет собой металлический диск 1, расположенный между излучателем 2 и фотоприемником 3, которые закреплены на колесной оси. Диск содержит 60 прорезей (рис. 1, б), расположенных по внешнему периметру диска через 6° , которые модулируют световой поток, а его внешний вид приведен на рис. 2, а.

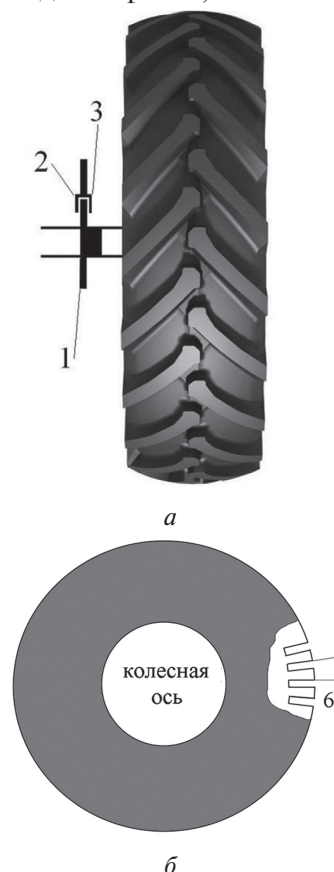
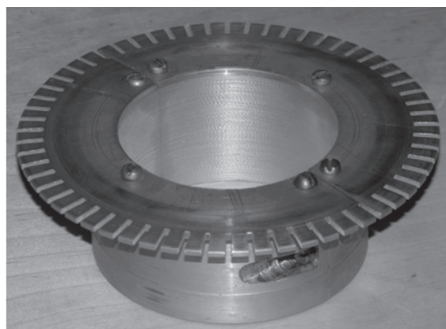


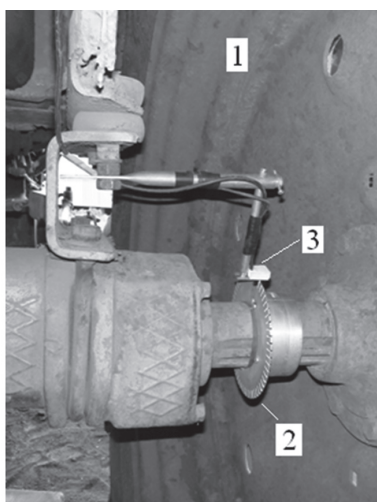
Рис. 1. Схема дискового модулятора (а) и его внешний вид (б)

Фотоприемник, закрепленный неподвижно на корпусе агрегата, считывает световые импульсы, которые передается в кабину посредством кабеля и записываются в регистрирующем устройстве. На рис. 2, б показано расположение

контактного датчика на тракторе типа ЮМЗ, где 1 – колесо, 2 – модуляционный диск, 3 – фотооптический датчик.



а



б

Рис. 2. Вид модуляционного диска (а) и расположение контактного датчика (б)

Вычисление скорости движения агрегата с помощью контактного датчика осуществляется с помощью следующего выражения

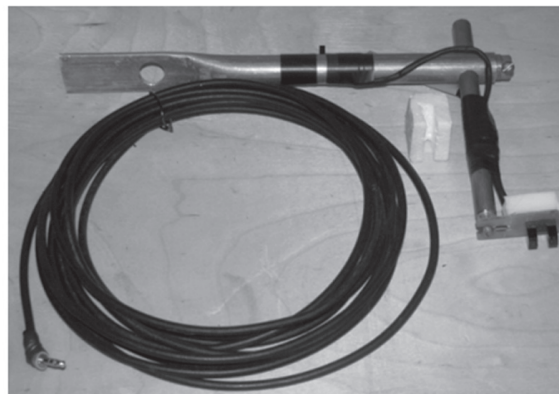
$$V_c = 3,6 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D}{\Delta t \cdot N} \right), \quad (1)$$

где D , м – диаметр колеса, Δt , с – период следования импульсов на выходе фотоприемника, N – количество прорезей. Общий вид фотодатчика, состоящего из оптоэлектронной пары, блока питания и несущей конструкции приведен на рис. 3, а, а осциллограмма выходных импульсов при работе датчика на испытательном стенде показана на рис. 3, б.

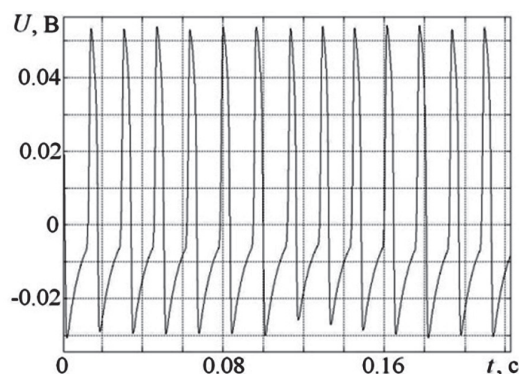
Для проверки погрешности контактного датчика использовался механический стенд, который обеспечивал фиксированную скорость вращения диска ≈ 60 об/мин. Это соответствуют средней скорости движения агрегата (1) $\bar{V}_c = 17,43$ км/ч, причем для повышения точности измерения выходные сигналы усреднялись на интервале 0,5 с.

На рис. 4 приведена зависимость измеренной скорости от времени, флуктуации которой обусловлены конечным количеством прорезей по периметру модуляционного диска и погрешностью их изготовления, тем не менее, как показали проведенные измерения, среднеквадра-

точное отклонение (СКО) измерения скорости на испытательном стенде не превышает 0,3%.



а



б

Рис. 3. Внешний вид фотодатчика (а), осциллограмма выходных импульсов (б)

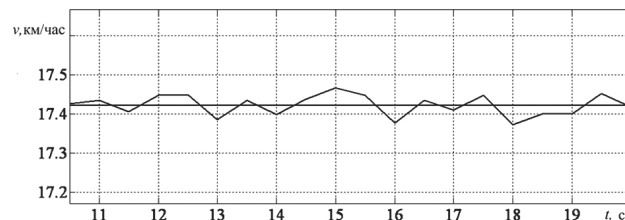


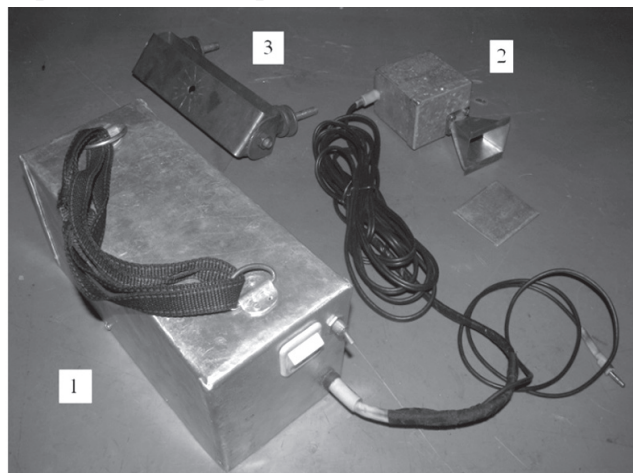
Рис. 4. Флуктуации скорости движения, измеренной контактным датчиком

2. РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ ДАТЧИК СКОРОСТИ

Для проведения экспериментальных исследований использован датчик скорости, разработанный и изготовленный на основе доплеровского радара [3], работающего в режиме непрерывного излучения и собранного по гомодинной схеме. В качестве генератора применяется лавинно-пролетный диод (ЛПД) в диапазоне 8 мм с выходной мощностью ≈ 12 мВт, рупорная антенна обеспечивает ширину диаграммы направленности (ДН) 10° по уровню -3 дБ, а принятые сигналы доплеровской частоты после усиления в приемном устройстве подаются на цифровое регистрирующее устройство, тактовая частота которого составляет 32 кГц.

На рис. 5, а показаны компоненты разработанного радиолокационного датчика, включая портативный блок питания 1, приемо-передаю-

щее устройство 2 и кронштейн для крепления радара 3. Радар крепится в носовой части колесного тракторного агрегата типа ЮМЗ на высоте ≈ 1 м (рис. 5, б), угол наклона антенны отсчитывается от горизонтали и может регулироваться в пределах $\alpha=30^\circ, 45^\circ$ и 60° , причем плоскость поляризации рупорной антенны может устанавливаться вертикально или горизонтально.



а



б

Рис. 5. Общий вид измерительного радара с устройством крепления (а): 1 – БП радара, 2 – приемопередатчик; 3 – крепежное устройство; расположение радара на тракторе (б)

Однако в реальной ситуации отраженный сигнал представляет собой сложный амплитудно- и частотно-модулированный сигнал, текущий спектр которого сложным образом перемещается в частотно-временной области, типичный пример которого приведен на рис. 6.

Поэтому обработку подобного сигнала естественно осуществлять в частотно-временной плоскости [4] путем вычисления так называемого 3D-спектра в виде последовательности кратковременных энергетических спектров в моменты времени $t \in [t_n, t_n + \tau]$ на интервале длительности окна τ [4]. Подобное представление отражает распределение энергии отраженного сигнала в плоскости “частота-время” и впервые предложено Д. Габором для распознавания речевых сигналов [5].

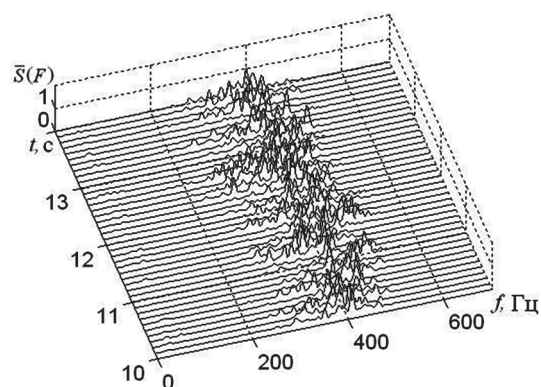


Рис. 6. 3D-спектр сигнала, отраженного от подстилающей поверхности при движении транспорта

Для оценки усредненного значения скорости агрегата на длительности окна τ вычисляется энергетический центр тяжести (ЭЦТ) спектра отраженных сигналов в виде отношения первых двух моментов кратковременного спектра [4, 6]

$$\bar{V}_R(t_n) = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\int_0^\infty d\omega \omega S(t_n, \omega)}{\int_0^\infty d\omega S(t_n, \omega)} \cos \alpha \quad (2)$$

Приведенная характеристика имеет простой физический смысл и описывает временную зависимость средней скорости движения транспорта в смысле центра тяжести спектральной плотности.

3. КАЛИБРОВКА КОМБИНИРОВАННОГО ДАТЧИКА СКОРОСТИ

Так как фактический диаметр колеса агрегата D отличается от его размеров в ненагруженном и неподвижном состоянии за счет веса агрегата, то использование выражения (1) приводит к заметным погрешностям. Поэтому проводилась калибровка контактного датчика с помощью радиолокационного датчика, ориентированного на эталонный уголкового отражателя параллельно подстилающей поверхности (рис. 7, а).

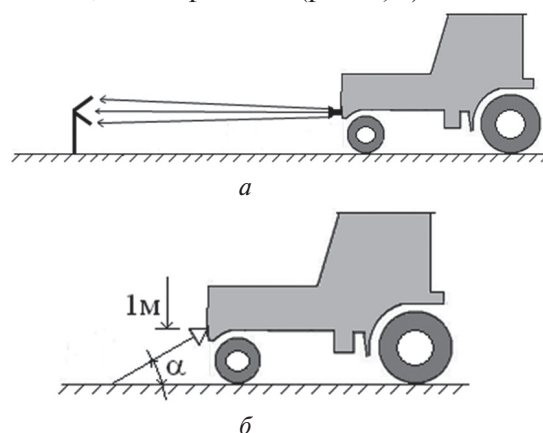


Рис. 7. Калибровки контактного датчика скорости

В этом случае радиолокационный датчик обеспечивает точное измерение частоты Доплера и, как следствие, прецизионное изме-

рение скорости движения $V = f_d \cdot \lambda / 2$, что позволяет уточнить диаметр нагруженного колеса D_0 , используя выражение

$$D_0 = \frac{\Delta t N}{7,2\pi} \lambda f_d. \quad (3)$$

Как показали измерения, эффективный диаметр нагруженного колеса в данном случае равнялся 149 см, в то время как геометрически измеренный диаметр равен 152,8 см.

С другой стороны, при измерении скорости с помощью радара, ось которого расположена наклонно к подстилающей поверхности, на выходе приемного устройства формируется сложный доплеровский сигнал, спектр которого описывается моделью [7]

$$S(f) = \exp \left\{ - \left[\frac{f - f_{d0} \frac{5,5\xi^2}{1 + 5,5\xi^2}}{\frac{2V}{\lambda} a_r \sqrt{1 + 5,5\xi^2}} \right]^2 \right\}, \quad (4)$$

где $f_{d0} = (2V_0/\lambda)\cos\alpha$ – значение доплеровской скорости для наклонно расположенной антенны радара (рис. 7, б), V_0 – линейная скорость агрегата, $a_r = 2\sigma_h/l_c$ – параметр шероховатости подстилающей поверхности, σ_h – среднеквадратичная высота шероховатостей, l_c – интервал корреляции шероховатостей, $\xi = a_r/\theta_a$ – отношение параметра шероховатости к ширине диаграммы направленности (ДН) антенны.

В соответствии с моделью (4) средняя частота спектра и его ширина зависят от шероховатости поверхности, как показано на рис. 8, где приведены примеры спектра отраженных сигналов для средней скорости движения агрегата $V_0 = 3$ м/с, угла визирования $\alpha = 45^\circ$, ширине ДН антенны $\theta_a = 10^\circ$ и параметре шероховатости поверхности $a_r = 0,2; 0,5$ и $0,8$ (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

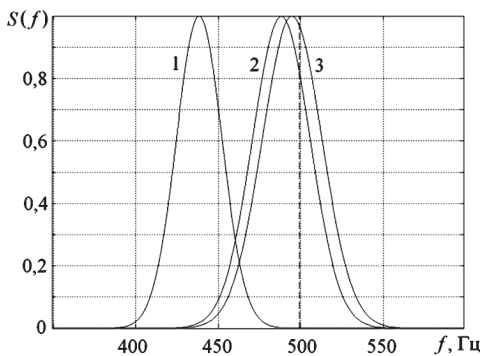


Рис. 8. Спектр сигналов, отраженных от подстилающей поверхности

Как видно, отличие центральной частоты спектра от истинного значения доплеровской частоты (пунктирная линия) может превышать 10%, причем отклонение всегда направлено в сторону низких частот. Указанная погрешность выражается через параметры радара и подстилающей поверхности в следующем виде [7]:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{5,5\xi^2}{1 + 5,5\xi^2} - 1. \quad (5)$$

На рис. 9 приведена рассчитанная зависимость (5), которая показывает, что погрешность монотонно уменьшается с увеличением параметра ξ .

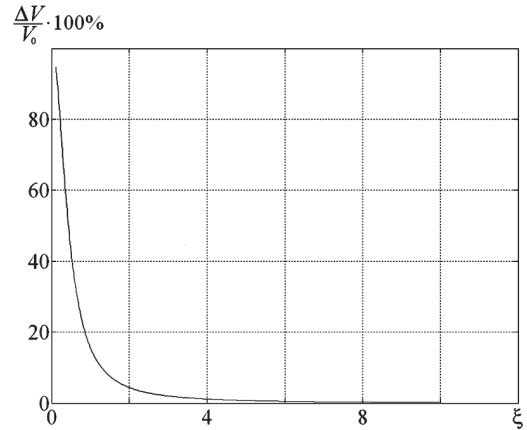


Рис. 9. Зависимость погрешности радиолокационного датчика от параметра ξ

Задавая погрешностью измерений $\leq 5\%$, нетрудно получить условие $\xi \geq 2$, которое накладывает ограничения на ширину ДН антенны $\theta_a \leq a_r/2$ и гарантирует слабую зависимость погрешности радиолокационных измерений скорости движения агрегата от шероховатости подстилающей поверхности. При этом следует отметить, что величина погрешности не зависит от угла визирования α , что важно при конструировании радиолокационного датчика.

Тем не менее, учитывая неопределенность в величине коэффициента шероховатости a_r , при практическом использовании описываемого датчика необходимым условием является калибровка радиолокационного датчика по показаниям предварительно откалиброванного контактного датчика (рис. 7, а).

При этом агрегат двигался по укатанной грунтовой дороге без нагрузки, что предполагает отсутствие пробуксовки, причем антенна радара ориентирована на подстилающую поверхность. Для вычисления истинной скорости $V_R = \frac{\lambda}{2} f_d \cos\alpha \cdot K_c$ вводился поправочный коэффициент K_c , значение которого находится путем минимизации функционала

$$\min \left\{ \int_0^T dt |V_R(t) - V_c(t)|^2 \right\}, \quad (6)$$

где $V_c(t)$ – показания контактного датчика.

На рис. 10 приведен пример подобной минимизации функционала (6), где скорости с выхода радара (гладкая кривая) и контактного датчика (пунктир) практически совпадают рис. 10, а, а относительная разность скоростей $\frac{V_R - V_c}{V_c}$ – показана на рис. 10, б.

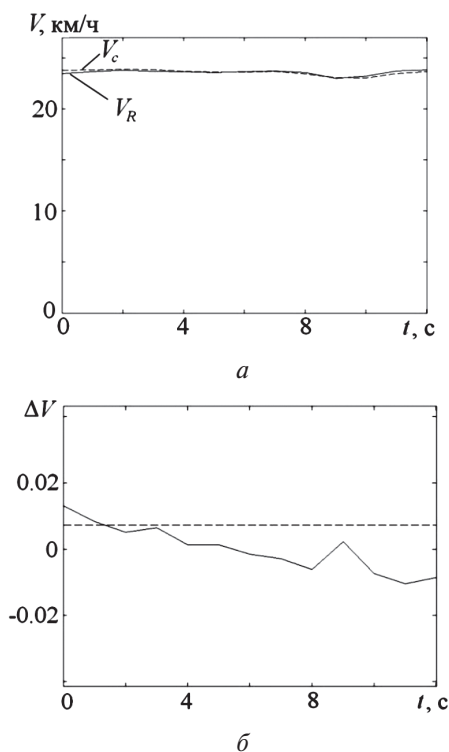


Рис. 10. Данные контактного и радиолокационного датчиков (а), относительная разность скоростей датчиков (б)

В результате проведенных вычислений значение коэффициента калибровки оказалось равным $K_c = 0,98$, что обеспечивает совпадение данных датчиков со среднеквадратичной погрешностью не более 0,8 %. Откалиброванный таким образом измерительный комплекс в дальнейшем использовался для измерения коэффициента пробуксовки тракторного агрегата с различными нагрузками и режимами движения и на разных почвах.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При проведении натуральных измерений описанный измерительный комплекс устанавливался на тракторный агрегат колесного типа ЮМЗ (рис. 5, б), который двигался по грунтовой дороге и по полю после уборки урожая. В качестве нагрузки при движении по полю использовался культиватор, который приводил к пробуксовке ведущих колес агрегата.

На рис. 11, а приведены временные зависимости скорости движения трактора с выхода контактного датчика (пунктир) и радиолокационного датчика (сплошная кривая) при движении агрегата по грунтовой дороге.

Как видно, в условиях твердого дорожного покрытия данные контактного и радиолокационного датчиков совпадают с графической точностью и в пределах аппаратной погрешности $K_{пр} = 0,008$, а среднеквадратичное значение коэффициента пробуксовки составляет $K_s = 0,01$ (рис. 11, б).

На рис. 12, а приведены аналогичные данные, когда агрегат движется по полю после

уборки урожая. В этом случае наблюдается стабильная пробуксовка колес агрегата ($V_c > V_R$), а среднеквадратичное значение коэффициента пробуксовки $K_s = 0,076$ (рис. 12, б) заметно превышает соответствующее значение в предыдущем случае и погрешность аппаратного комплекса

$$\delta_{\Delta V} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T dt |V_R - V_c|^2}.$$

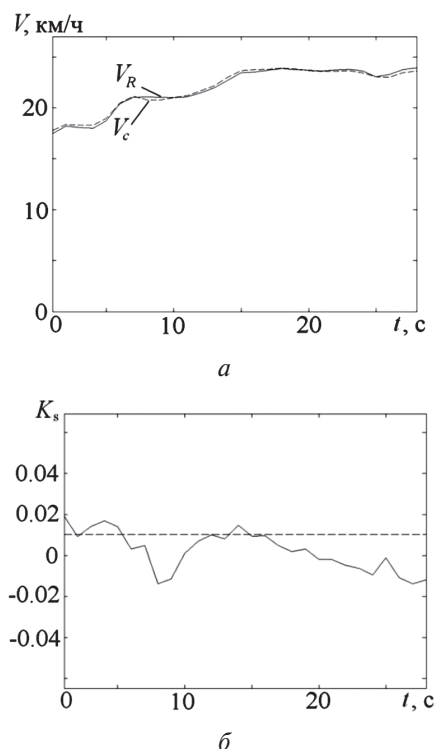


Рис. 11. Скорость (а) и коэффициент пробуксовки (б) при движении по грунтовой дороге

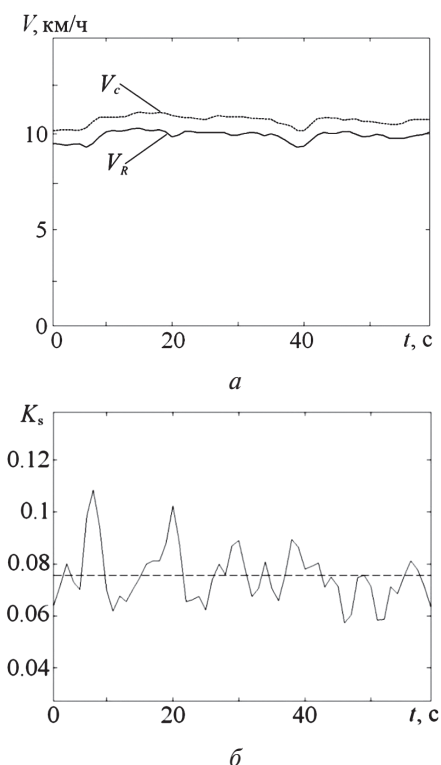


Рис. 12. Зависимости скорости (а) и коэффициента пробуксовки (б) при движении трактора по полю

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанный комбинированный датчик скорости позволяет измерять тонкую структуру динамики движения сельскохозяйственных машин и, в частности, коэффициент пробуксовки агрегата.

В результате выполненных работ можно сделать следующие выводы:

1. Разработан и изготовлен фотооптический датчик контактного типа для измерения скорости колесного тракторного агрегата.

2. Экспериментально проведена калибровка контактного и радиолокационного датчиков и определены поправочные коэффициенты, необходимые для точного измерения абсолютной скорости движения и коэффициента пробуксовки.

3. Проведены натурные исследования разработанного комбинированного датчика скорости на двух типах грунтов и показано, что разработанный датчик обеспечивает измерение абсолютной скорости движения с погрешностью не хуже 0,8%, и коэффициента пробуксовки — 0,85%, причем основной вклад вносит погрешность измерения радиолокационного датчика.

Литература

- [1] Малорацкий Л. Г. Радарные измерители скорости машинно-тракторных агрегатов // Зарубежная радиоэлектроника. — 1986. — № 7. — С. 84–91.
- [2] Справочник по радиолокации: В 4 т. / Под ред. М. Скольника / Пер. с англ. под ред. К. Н. Трофимова. — М.: Сов. радио, 1978. — Т. 3: Радиолокационные устройства и системы / Под ред. А.С. Винницкого. — 528 с.
- [3] В. П. Мальцев, Г. И. Хлопов. Флуктуации когерентных сигналов миллиметрового диапазона при зондировании почвы с малых высот // Радиотехника, Изд-во ХНУРЭ. — Вып. 172, 2013. — С. 32–40.
- [4] Могила А. А., Хлопов Г. И., Шестопалов В. П. Траекторный спектральный анализ // Радиотехника. — Харьков: Изд-во Харьк. ун-та. — 1989. — Вып. 91. — С. 86–93.
- [5] Gabor D. Theory of Communication // J. IEE (London). — 1946. — Vol. 93, November. — P. 429–457.
- [6] Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 584 с.

- [7] С. Г. Зубкович. Статистические характеристики радиосигналов отраженных от земной поверхности. — М.: Сов. Радио, 1968. — 224 с.

Поступила в редколлегию 5.03.2014



Мальцев Валентин Петрович, аспирант, младший научный сотрудник отдела физических основ радиолокации института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины. Научные интересы: зондирование земной поверхности, датчики для оптимизации работы сельскохозяйственных агрегатов.

УДК 319.61.126

Використання комбінації радіолокаційних та контактних вимірювань для розрахунку швидкості і пробуксовки сільськогосподарських машин / В. П. Мальцев // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2014. — Том 13. — № 1. — С. 93–98.

У статті було розглянуто комбінований датчик швидкості і пробуксовки, метою якого є оптимізація роботи сільськогосподарських агрегатів. Були проведені натурні експерименти за допомогою даного комплексу з обчисленням істинної швидкості і коефіцієнта пробуксовки.

Ключові слова: радар, контактний датчик, 3D-спектр, оптимізація роботи, коефіцієнт пробуксовки.

Л.: 12. Бібліогр.: 07 найм.

UDC 319.61.126

Use of a combination of radar and contact measurements for calculating speed and wheel slip of agricultural vehicles / V. P. Maltsev // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2014. — Vol. 13. — № 1. — P. 93–98.

The aim of the sensor described in the paper is measuring the absolute speed and slip of traction wheels of agricultural aggregates to optimize their operation. A combination of contact and contactless speedometers is used for this purpose. Field experiments of the developed complex have been made on two soil types with calculation of true speed and slip coefficient values.

Keywords: radar, contact sensor, 3D spectrum, work optimization, slip coefficient.

Fig.: 12. Ref.: 07 items.