

УДК 631.3.05

С.А. Лебедев<sup>1</sup>, В.П. Мальцев<sup>2</sup>, Г.И. Хлопов<sup>2</sup>, М.Л. Шуляк<sup>3</sup><sup>1</sup> Харьковський філіал УкрНДІПІТ імені Л. Погорелого, Харків<sup>2</sup> Інститут радіофізики і електроніки ім. А.Я. Усикова НАН України, Харків<sup>3</sup> Харьковський національний технічний університет сільськогосподарського господарства імені Петра Василенко, Харків

## КОМБИНИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ БУКСОВАНИЯ И СКОРОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ РЛС МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА И ДАТЧИКА ХОЛЛА

Описаний в роботі комбінований, вимірний комплекс, дозволяє провести оцінку вимірювання коефіцієнта буксування і дійсної швидкості сільськогосподарських машин. Це досягається використанням комбінації безконтактного і контактної вимірників швидкості. Для безконтактного вимірювання швидкості використовується гомодинамний доплерівський радар, в якості контактної датчика використовується вимірник на основі датчика Холла, який вимірює швидкість обертання колес агрегата. Для вивчення коефіцієнта буксування отримані дані синхронно обробляються на ЕВМ. Розроблений комплекс був випробований на двох видах ґрунту з вивченням коефіцієнта буксування і дійсної швидкості.

**Ключові слова:** радар, коефіцієнт буксування, економія палива, спектр, енергетичний центр тяжесті, датчик Холла, дійсна швидкість.

### Введение

Рациональное использование природных ресурсов в сельском хозяйстве является одной из важнейших проблем современного народного хозяйства. В частности, повышенный расход топлива приводит, помимо истощения ресурсов, также к повышенному загрязнению атмосферы. Один из резервов экономии топлива связан с выбором рационального режима движения агрегата. Например, при движении по рыхлой почве с повышенной скоростью, возникает буксование, которое характеризуется существенным увеличением расхода топлива. Поэтому коэффициент буксования  $K_{б} = 1 - V_p/V_k$  (где  $V_p$  – истинная скорость агрегата,  $V_k$  – линейная скорость вращения внешней поверхности колеса), оптимальное значение которого известно для данного типа агрегата и вида выполняемых работ. Поэтому указанный коэффициент является информативным признаком, что позволяет оптимизировать режим движения агрегата и, как следствие, уменьшить расход топлива.

Однако, в настоящее время, промышленность не выпускает датчиков, которые бы обеспечивали измерение буксования сільськогосподарського агрегата і абсолютної швидкості руху в реальному масштабі часу. В цій зв'язі, представляє інтерес розробка датчика в формі комбінації когерентного радара для вимірювання абсолютної швидкості руху і контактної датчика швидкості обертання колеса [1, 2]. Подібне рішення дозволяє інформувати оператора сільськогосподарської машини про буксування і абсолютну швидкість для оптимізації режиму руху агрегата. Однак

конструкція описаного контактної датчика потребує індивідуального підходу для кріплення на агрегаті і підвержена сильному забрудненню, що затруднює надійну роботу датчика.

Поэтому целью настоящей работы является описание разработанного авторами датчика для измерения абсолютной скорости движения и коэффициента буксования сільськогосподарського агрегата з використанням когерентного радара міліметрового діапазону і контактної датчика Холла, а також результатів експериментального дослідження виготовленого прототипа.

### Основной материал

**1. Контактный датчик на основе эффекта Холла.** Для измерения линейной скорости вращения колеса разработан и изготовлен датчик на основе эффекта Холла. Принцип работы датчика основан на детектировании изменения магнитного поля за счет перемещающихся металлических деталей (сталь, железо). На рис. 1 приведена структурная схема, где датчик Холла 1, совместно с постоянным магнитом 2 располагается на расстоянии от металлического предмета 3 в качестве имитатора неоднородности, а усилитель переменного тока 4 предназначен для усиления выходного сигнала датчика.

При пересечении металлическим предметом 3 магнитного поля, переменная составляющая напряжения на выходе датчика 1 усиливается в усилителе-ограничителе 4 и затем регистрируется с помощью персонального компьютера (ПК). Для кріплення подібного датчика на транспортних засобах розроблена універсальна конструкція на магнітній трено-

ге (рис. 2), которая обеспечивает фиксацию устройства практически на любом виде агрегатов.

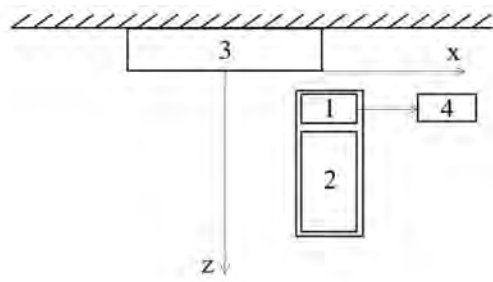


Рис. 1. Структурная схема измерения параметров датчика: 1 – датчик Холла; 2 – постоянный магнит; 3 – имитатор неоднородности; 4 – усилитель-ограничитель



Рис. 2. Общий вид контактного датчика на основе Эффекта Холла: 1 – датчик Холла с магнитом; 2 – составная штанга; 3 – усилитель; 4 – тренога; 5 – крепежные магниты; 6 – шарнирная цапфа

При этом датчик 1 крепится на составной штанге 2, которая позволяет гибко перемещать положение датчика относительно исследуемого объекта, а усилитель 3 располагается на треноге 4, которая обеспечивает фиксацию датчика практически к любой железной поверхности с помощью крепежных магнитов 5 в шарнирных цапфах 6.

Для практического использования датчика на эффекте Холла необходимо располагать его рабочими характеристиками, в первую очередь – шириной зоны чувствительности  $\Delta L$ , границы которой соответствует спаданию выходного напряжения на уровне  $\Delta U(\Delta L)/U_{max} = 0,707$  при поперечном смещении металлического препятствия относительно датчика. При экспериментальном исследовании датчика Холла (рис. 1) в качестве исследуемого объекта использовалась железная шайба диаметром  $d = 30$  мм толщиной  $h = 10$  мм, а нормированная зависимость выходного напряжения датчика от поперечного смещения относительно центра шайбы  $x$  приведена на рис. 3, а.

Как оказалось, ширина зоны чувствительности всего на 2,5% превышает физический размер ис-

пользуемого объекта и практически не зависит от зазора  $z$  (рис 3, б). Кроме того, при увеличении зазора  $z$  (рис. 1) выходное напряжение датчика экспоненциально убывает, как показано на рис. 4, а, что, в принципе, позволяет оптимально расположить датчик 3 относительно выбранных металлических деталей агрегата (рис. 2).

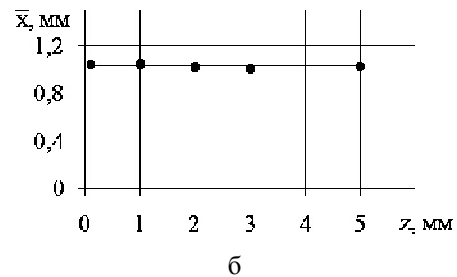
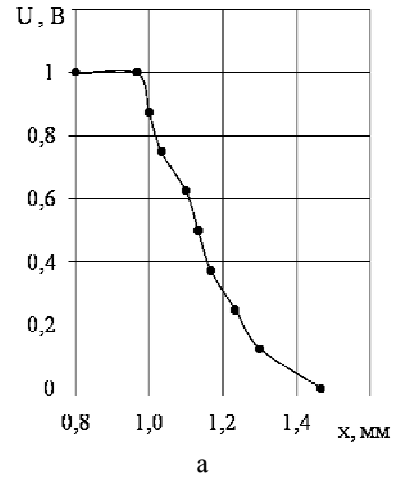


Рис. 3. Нормированная зависимость выходного напряжения датчика Холла от поперечного смещения объекта для зазора между датчиком и объектом  $z = 2$  мм (рис. 1) (а), зависимость ширины зоны чувствительности от зазора (б)

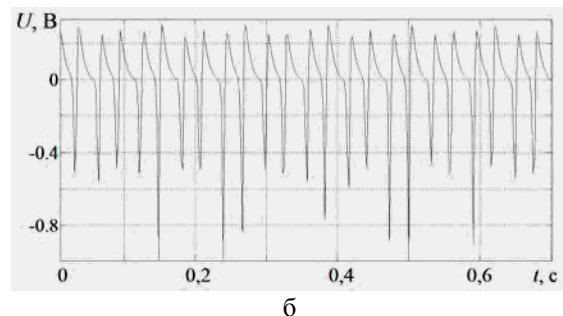
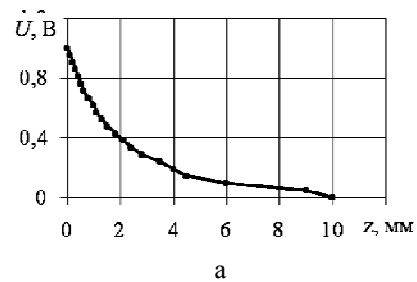


Рис. 4. Зависимость ширины зоны чувствительности от зазора (а), временная структура выходного напряжения датчика Холла (б)

Важной характеристикой датчика также является его информативная полоса, которая со стороны верхних частот ограничена постоянной времени, которая составляет обычно порядка 3 мкс, а со стороны нижних частот ограничения отсутствуют, так как рассматриваемый сенсор относится к классу позиционных датчиков и реагирует на статическое положение.

Как можно показать, в этом случае линейная скорость агрегата при использовании рассмотренного датчика вычисляется с помощью следующего выражения

$$V_k = 3,6(L/T), \quad (1)$$

где  $L = \pi D_k$  – длина окружности колеса диаметром  $D_k$  (м);  $T$  – время, за которое колесо совершает один оборот (с). При этом длина окружности  $L$  уточняется в процессе калибровки, а время  $T$  является измеряемой величиной.

В частности, на рис. 4, б приведен пример записи выходного сигнала датчика при движении трактора Т-150К в случае использования карданного вала как источника информации о скорости движения агрегата. При этом разная амплитуда выходных импульсов обусловлена различной высотой выступающих частей карданного вала, что, в общем случае, может приводить к дополнительной погрешности измерения скорости. Поэтому в структуре датчика предусмотрен усилитель-ограничитель, что позволяет практически полностью избавиться от модуляции амплитуды импульсов (рис. 4, б).

Чтобы оценить флуктуационную составляющую погрешности измерения скорости вращения с помощью описанного датчика, проведены испытания датчика с использованием токарного станка (рис. 5), когда кулачки 1 патрона 2 играют роль металлических неоднородностей, перемещение которых приводит к формированию сигнала на выходе датчика 3. В этом случае скорость вращения вала поддерживается постоянной с высокой точностью, а относительное среднеквадратичное отклонения показаний датчика (коэффициент вариаций) не превышает 0,1%, что вполне достаточно для большинства применений.

Таким образом, приведенные данные позволяют рассматривать показания контактного датчика как эталонные при движении по дороге с бетонным покрытием.

**2. Радиолокационный датчик скорости.** В качестве бесконтактного датчика скорости движения сельскохозяйственных агрегатов используется когерентный радар 8 мм диапазона, который построен по гомодинной схеме и подробно описан в работе [1]. Конструкция радара включает в себя механизм крепления 3 на основе фиксирующих магнитов, как показано на рис. 6, причем крепления рада-

ра 1 с антенной 2 обеспечивают возможность регулировки по углу места.



Рис. 5. Экспериментальный стенд для измерения погрешности датчика Холла: 1 – кулачки; 2 – токарный патрон; 3 – датчик Холла

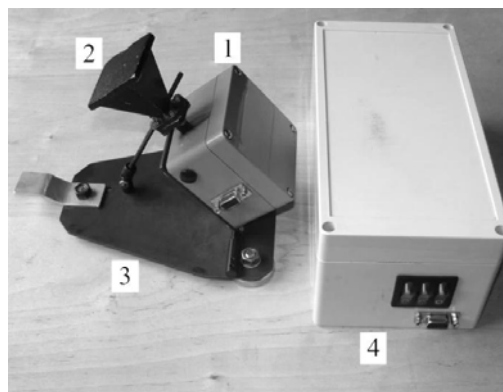


Рис. 6. Общий вид бесконтактного датчика (а): 1 – радар; 2 – антенна; 3 – крепление; 4 – блок питания и интерфейса

Блок интерфейса 4 располагается в кабине агрегата, а сам радар крепится в носовой части агрегата под углом  $\alpha$  (рис. 7, а), в связи с чем, измеряемая линейная скорость движения агрегата описывается простым выражением:

$$V_p = K_p \frac{\lambda}{2} f_d \cos \lambda, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны радара (м);  $f_d$  – доплеровский сдвиг частоты (Гц). Калибровочный коэффициент  $K_p$  учитывает погрешность установки угла  $\alpha$ , а также погрешность измерения скорости движения агрегата за счет конечной ширины диаграммы направленности (ДН) антенны, что приводит к расширению спектра доплеровских частот. Как показано в работе [2], указанный спектр имеет сложную форму, что, в частности, приводит к смещению среднего значения скорости движения.

Разработанная конструкция позволяет сравнительно просто крепить радар практически на любых типах агрегатов и под заданным углом, чтобы обеспечить оптимальный угол визирования подстилающей поверхности [2].

Как показали экспериментальные исследования, параметры радара соответствуют значениям, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Параметры радара

Табл. №	Параметр	Значение
1	Длина волны	8,5 мм
2	Излучаемая мощность	12 мВт
3	Шум фактор приемника	14 дБ
4	Ширина луча антенны по уровню - 3 дБ	8 Град
5	Напряжение питания	24 В
6	Частота дискретизации	32 КГц

На рис. 7, а показана схема установки разработанного датчика, а на рис. 7, б – фото экспериментального образца датчика в составе агрегата ХТА- 35. Так как показания датчика зависят от угла наклона луча  $\alpha$  (2) и от характера неровностей подстилающей поверхности [2, 3], то вычисление линейной скорости представляется далеко не тривиальной задачей.

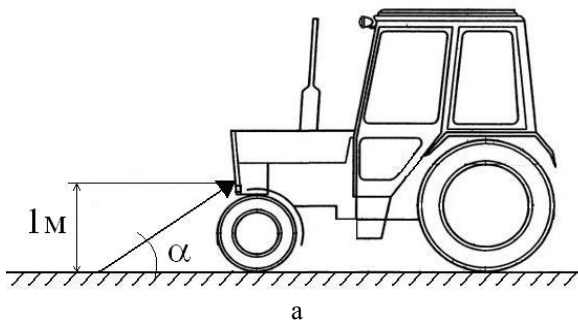


Рис. 7. Расположение (а) и внешний вид (б) бесконтактного датчика на агрегате

В частности, как показано в работе [2], выходное напряжение движущегося радара представляет собой сложный широкополосный сигнал, как показано на рис 8, а, где приведен 3D спектр в плоскости «частота-время». Поэтому для вычисления текущей линейной скорости агрегата в работе используется понятие энергетического центра тяжести (ЭЦТ) [1] в виде отношения первого и нулевого моментов текущего спектра  $S(t_n, \omega)$  в последовательные моменты времени  $t_n$

$$\bar{V}_R(t_n) = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\int_0^\infty d\omega \omega S(t_n, \omega)}{\int_0^\infty d\omega S(t_n, \omega)} \cos \alpha ; \quad (3)$$

$$S(\omega, t_n) = \left| \int_{t_n}^{t_n+\tau} U(t) e^{-j\omega t} dt \right|^2. \quad (4)$$

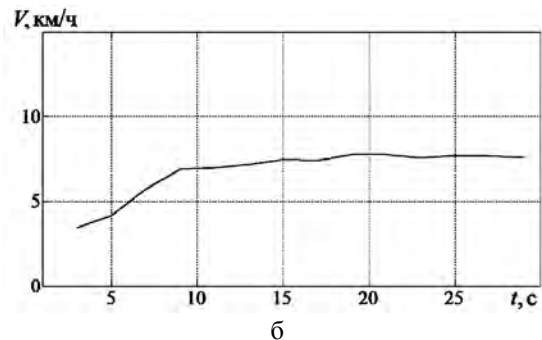
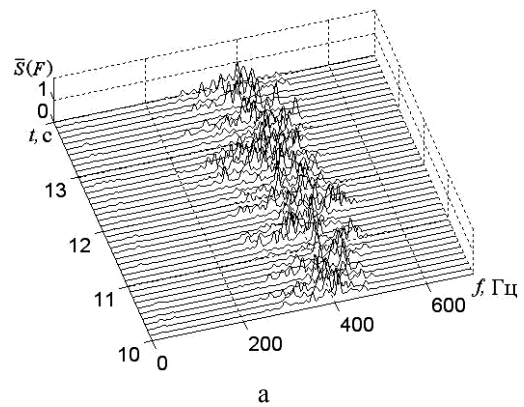


Рис. 8. 3D спектр сигналов, отраженных от подстилающей поверхности при движении агрегата в плоскости «частота-время» (а), пример вычисления абсолютной скорости движения агрегата (б)

В частности, на рис. 8, б приведен пример вычисления скорости агрегата как траектория движения энергетического центра в частотно-временной плоскости, когда длительность временного окна составляет  $\tau = 2$  с, которая соизмерима со временем оборота колеса исследуемого агрегата. При этом основной вклад в погрешность бесконтактного датчика вносит погрешность установки угла наклона

луча радара  $\alpha$  (рис. 6, а), а также конечная ширина диаграммы направленности антенны радара. Так как погрешность измерения скорости с помощью контактного датчика достаточно мала ( $\leq 0,1\%$ ), то оценка погрешности измерения скорости с помощью бесконтактного датчика осуществлялась путем сравнения показаний обоих датчиков при движении по ровной асфальтовой дороге. Как показали многочисленные заезды, среднеквадратического отклонения (СКО) скорости измеренной с помощью бесконтактного датчика не превышает 2%.

**3. Экспериментальные исследования датчика.** Перед проведением экспериментальных исследований разработанного датчика проводилась его калибровка для уточнения диаметра колеса  $D_k$  и угла наклона луча радара  $\alpha$ . При этом измерялся путь  $L_n$ , за один оборот колеса, для определения динамического диаметра колеса  $D_k = L_n/\pi$ , а также вычислялся калибровочный коэффициент  $K_p$  бесконтактного датчика путем минимизации СКО-показаний контактного  $V_k$  и бесконтактного  $V_p$  датчиков при езде по асфальтированному покрытию

$$\delta = \sqrt{\int_0^T dt [V_k - V_p]^2}.$$

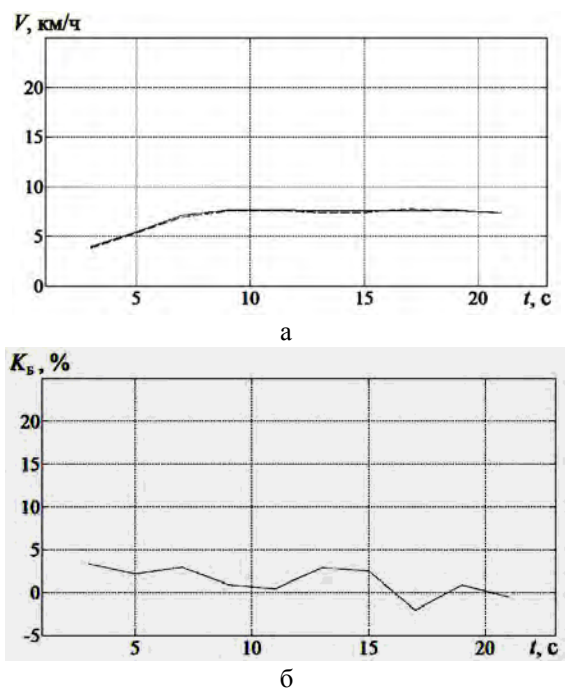


Рис. 9. Скорость агрегата при движении по асфальту (а), показания бесконтактного датчика (пунктир) и контактного датчика (сплошная кривая), коэффициент буксования (б)

Натурные исследования проводились с использованием агрегата Т-150К при движении на трассах различного типа, причем одновременно регистрировались показания датчиков обоих типов для даль-

нейшего вычисления коэффициента буксования  $K_b$ . В частности, на рис. 9, а приведен пример измерения скорости агрегата при движении по асфальту (контактный датчик – сплошная кривая, бесконтактный датчик – пунктир), а на рис. 9, б показана временная зависимость коэффициента буксования. Как оказалось, в этом случае СКО измерения коэффициента буксования (рис. 9, б) практически определяется погрешностью радиолокационного датчика и не превышает  $\delta_b < 2,15\%$ .

При движении по грунтовой дороге, разница между показаниями датчиков заметно возрастает (рис. 10, а, контактный датчик – сплошная кривая, бесконтактный датчик – пунктир), а коэффициент буксования достигает значения 8% (рис. 10, б) при величине СКО = 3%.

При движении агрегата под нагрузкой (с прицепными орудиями) и по рыхлой подстилающей поверхности коэффициент буксования возрастает по понятным причинам. В частности, для трассы в виде поля под «паром» и дисковой бороны в качестве нагрузки, показания контактного датчика всегда превышают показания бесконтактного датчика (рис. 11, а, скорость вращения колес неоправданно возрастает), а коэффициент буксования достигает 16% (рис. 11, б) при СКО = 11,6%.

Таким образом, приведенные результаты натурных исследований показывают, что разработанный комбинированный измеритель обеспечивает достаточно высокую чувствительность при измерении скорости и коэффициента буксования при движении агрегата в различных условиях.

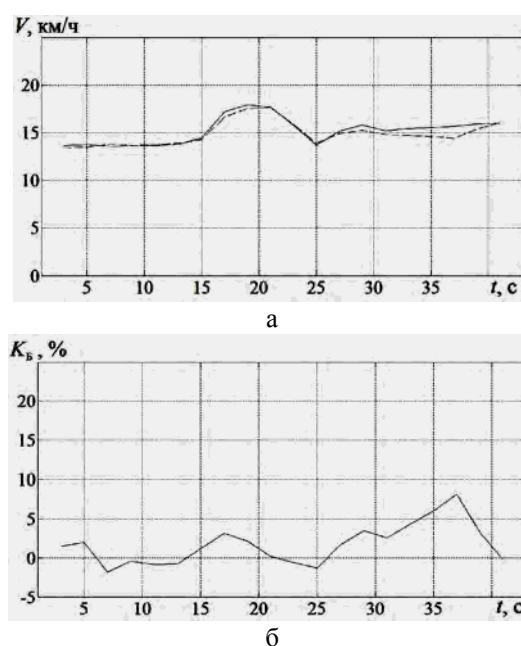


Рис. 10. Скорость агрегата при движении по твердой грунтовой дороге (а), показания бесконтактного датчика (пунктир) и контактного датчика (сплошная кривая), коэффициент буксования (б)

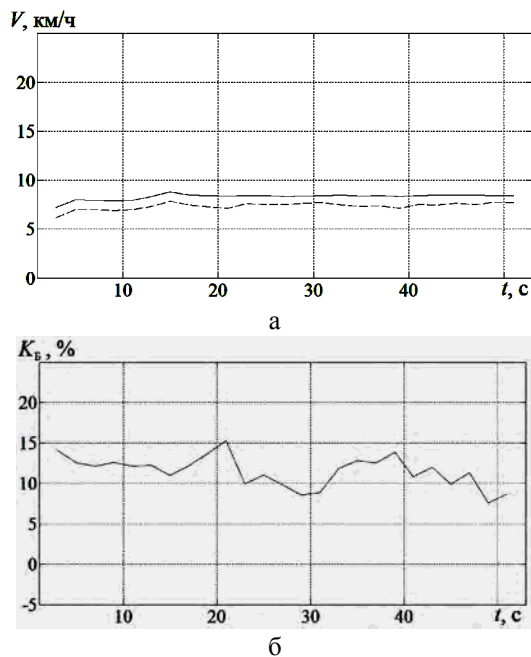


Рис. 11. Скорость агрегата при движении по полю под «паром» с нагрузкой в виде дисковой бороны (а), измеренная бесконтактным датчиком (пунктир) и контактном датчиком (сплошная кривая), коэффициент буксования (б)

## Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработан, изготовлен и испытан датчик на основе эффекта Холла для измерения линейной скорости вращения колеса. Показано, что ширина зоны чувствительности превышает диаметр исследуемого объекта всего на 2,5%, практически совпадает с раз-

мерами металлической неоднородности и слабо зависит от расстояния до объекта.

2. Разработан и изготовлен доплеровский датчик скорости движения агрегата, испытания которого показали, что ошибка измерения скорости не превышает 2% при движении по грунтовой дороге.

3. Показано, что СКО измерения коэффициента буксования, в первую очередь, определяется погрешностью радиолокационного датчика и не превышает  $\delta_{\delta} < 2,15\%$ .

4. При движении по грунтовой дороге коэффициент буксования достигает значения 8% (СКО = 3%), а при движении агрегата под нагрузкой (с прицепными орудиями) по рыхлой подстилающей поверхности коэффициент буксования возрастает до 16% при СКО = 11,6%.

## Список литературы

1. Мальцев В.П. Флуктуации когерентных сигналов миллиметрового диапазона при зондировании почвы с малых высот / В.П. Мальцев, Г.И. Хлопов // Радиотехника. – Х.: Изд-во ХНУРЭ, 2013. – Вып. 172. – С. 32-40.
2. Мальцев В.П. Применение комбинации радиолокационных и контактных измерений для вычисления скорости и пробуксовки сельскохозяйственных машин / В.П. Мальцев // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: Изд-во ХНУРЭ, 2014. – Т. 13, № 1. – С. 93-98.
3. Зубкович С.Г. Статистические характеристики радиосигналов отраженных от земной поверхности / С.Г. Зубкович. – М.: Сов. Радио, 1968. – 224 с.

Поступила в редколлегию 16.03.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.А. Подригало, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков.

## КОМБІНОВАНИЙ ВИМІРЮВАЧ БУКСУВАННЯ І ШВИДКОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН НА ОСНОВІ РЛС МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ І ДАТЧИКА ХОЛЛА

С.А. Лебедев, В.П. Мальцев, Г.І. Хлопов, М.Л. Шуляк

Описаний в роботі комбінований, вимірювальний комплекс, дозволяє провести оцінку вимірювання коефіцієнта буксування і дійсної швидкості сільськогосподарських машин. Це досягається використанням комбінації безконтактного та контактних вимірювачів швидкості. Для безконтактного вимірювання швидкості використовується гомодинний доплерівський радар, в якості контактних датчиків використовується вимірювач на основі датчика Холла, який вимірює швидкість обертання коліс агрегату. Для обчислення коефіцієнта буксування отримані дані синхронно обробляються на ЕОМ. Розроблений комплекс був випробуваний на двох видах ґрунтів з обчисленням коефіцієнта буксування і дійсної швидкості.

**Ключові слова:** радар, коефіцієнт буксування, економія палива, спектр, енергетичний центр ваги, датчик Холла, дійсна швидкість.

## COMBINATION METER SLIPPING AND SPEED AGRICULTURAL MACHINES BASED RADAR SYSTEMS MILLIMETER AND HALL SENSORS

S.A. Lebedev, V.P. Maltsev, G.I. Chlopov, M.L. Shulayk

Described in work combined, measuring complex, allows an assessment of the coefficient of slipping and the actual speed of agricultural machines. This is achieved using a combination of non-contact and contact velocimeters. For non-contact measurement of speed used homodyne Doppler radar, as a contact sensor meter is used on the basis of the Hall sensor, which measures the speed of the wheels of the machine. To calculate the slippage coefficient data obtained are processed synchronously by computer. Designed complex has been tested on two types of soil with the calculation of the coefficient of slipping and the actual speed.

**Keywords:** radar, the coefficient of slipping, fuel economy, range, power center of gravity, the Hall sensor, the actual speed.