



УДК 631.348

## Изучение динамики комбинированного сошника

В.И.Мельник<sup>1</sup>, Аль-Фтиххат Моусаб Абдулвахид Мохамед<sup>2</sup>, Р.В.Антощенко<sup>3</sup>

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
им. П. Василенка (г. Харьков, Украина), <sup>1</sup> victor\_melnik@ukr.net,  
<sup>2</sup> goldenagr@yahoo.com, <sup>3</sup> roman.tiaxntusg@gmail.com

Выполняется сравнение динамики нескольких вариантов конструкции комбинированного сошника, предназначенного для высева пропашных культур и одновременного послепосевного ленточного внутривспашечного внесения гербицидов. Для восстановления траектории сошников и оценки параметров их динамики используются методы парциальных ускорений (приведено описание применяемого оборудования), прямого преобразования Фурье и последовательного приближения. Показано, что совмещение операций проходит наиболее эффективно, если в конструкции комбинированного сошника используются асимметричные загортачи.

**Ключевые слова:** сошник, траектория, линия рядка, амплитуда, частота, длина волны, спектр, скорость, ускорение, гармоника, тригонометрический ряд, преобразование Фурье.

**Актуальность задачи.** Дискретные рабочие органы (РО) для высева пропашных культур и ленточного внутривспашечного внесения гербицидов (ЛВВГ) известны. Проблему создает реализация ЛВВГ в хозяйственных условиях, связанная с необходимостью точного вождения агрегатов с наложением последовательно выполняемых проходов сеялки и агрегата для ЛВВГ.

**Обзор известных технико-технологических решений.** Наиболее очевидный вариант решения обозначенной проблемы — создание комбинированного агрегата, выполняющего посев и ЛВВГ одновременно. В таком случае ЛВВГ можно выполнять как до посева, так и после него, что предпочтительнее [1].

Возможны несколько вариантов комбинирования таких операций [1, 2]: а) путем применения трактора интегральной компоновки, когда посевная машина агрегируется, например, на передней навесной системе, а культиватор с РО для ЛВВГ — на задней; б) путем создания комбинированной машины, в которой на общей раме последовательно закреплены посевные секции и секции для ЛВВГ; в) путем создания комбинированной рабочей секции, которая объединяет в одну конструкцию сошник и дискретный РО для ЛВВГ; г) путем разработки комбинированного сошника, когда сошник объединяется в одну конструкцию с устройством для ЛВВГ [2].

Последний вариант технологичнее и дешевле других. Все перечисленные варианты имеют один общий недостаток — рост затрат времени на технологическое обслуживание агрегата, что может привести к снижению его общей производительности. Это важная проблема, но сейчас мы остановимся на другом.

**Постановка задачи исследований.** Сошники и дискретные РО для ЛВВГ хорошо изучены и конструктивно проработаны [1]. Но, тем не менее, объединение этих двух РО в один, даже с минимальными переделками влечет потенциальную возможность ухудшения качества выполнения обеих операций и, особенно, посева.

На рис. 1 показана предлагаемая конструкция посевной секции с комбинированным сошником для ЛВВГ [2].

Он состоит из полоза 1, в задней части которого установлен стрельчатый удлинитель сошника (УС) 2 авторской конструкции. За ним следуют штатные загортачи 3 и далее удлинители 4 тяги 5 прикатывающего колеса (не показано). В рабочем положении загортачи 3 удерживают пружины 6. Рабочая жидкость подходит по каналу 7 к щелевому распылителю 8 через клапан-отсекатель и индивидуальный фильтр. Далее гидравлическую часть конструкции мы рассматривать не будем.

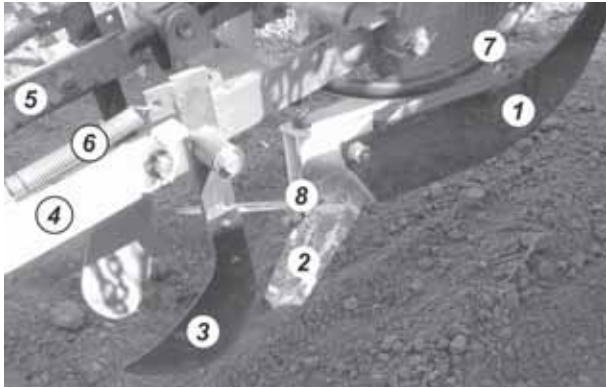


Рис. 1. Усовершенствованная посевная секция сеялки СУПН-6А, оборудованная стрельчатым УС для ЛВВГ: 1 – полоз сошника; 2 – УС; 3 – загортак; 4 – удлинитель тяги; 5 – тяга; 6 – пружина привода загортача; 7 – канал для подвода рабочей жидкости, 8 – распылитель.

В процессе работы полоз сошника заглубляется в почву на заданную глубину посева. Стрельчатый УС для ЛВВГ установлен на полозе сошника с возможностью регулирования относительной глубины хода. Плоскость резания стрельчатого УС, предназначенного для ЛВВГ, всегда располагается выше уровня заделки высеваемых семян.

В процессе движения крылья стрельчатого УС создают в почве динамическую полость. На ее дно через щелевой распылитель подается рабочая жидкость, которая затем укрывается слоем падающей почвы.

Поскольку за сошником всегда образуется развальная борозда, то штатные загортачи остались в конструкции и по-прежнему выполняют свои функции. Изменения коснулись только места их установки. Они путем использования удлинителей тяги опорного колеса существенно смещены назад (против направления рабочего хода). Это связано с увеличением общей длины комбинированного сошника и образующейся за ним полости в почве.

Предлагаемое изменение конструкции сошника, очевидно, может привести к ухудшению его стабильности хода по глубине и прямолинейности движения. Оценить то и другое можно, если восстановить траекторию движения сошника и/или построить и оценить амплитудно-частотную характеристику горизонтальных и вертикальных колебаний сошника во время выполнения рабочего процесса.

**Результаты исследования.** Первый вариант (восстановление траектории сошника), как наиболее очевидный, хотя и менее информативный, необходим для оценки адекватности представления траектории движения сошника в

виде конечного тригонометрического ряда Фурье. Такой подход предполагает техническую возможность измерения: 1) трех декартовых компонент (парциальных [3]) ускорений (осевой  $a_x$ , поперечной  $a_y$ , вертикальной  $a_z$ ) движения базисной точки сошника (БТС); 2) трех угловых скоростей вращения конструкции сошника  $\omega_x$ ,  $\omega_y$  и  $\omega_z$  относительно продольно-горизонтальной  $Ox$ , поперечно-горизонтальной  $Oy$  и вертикальной  $Oz$  осей декартовой системы координат  $Oxyz$ , связанной с БТС; 3) временных отметок потока данных; 4) осевой составляющей скорости  $v_x$  движения БТС.

Второй вариант (оценка амплитудно-частотной характеристики горизонтальных и вертикальных колебаний сошника) предпочтительнее, поскольку представляет собой количественную оценку колебательных процессов и требует меньшее количество исходных данных. Для его применения достаточно измерить временные ряды поперечной  $a_y$  и вертикальной  $a_z$  декартовых составляющих (парциальных) ускорений, а также угловых скоростей  $\omega_x$  и  $\omega_z$ .

*Исследовательское оборудование.* Для измерения перечисленных выше параметров использовали разработанную Антощенковым Р.В. мобильную измерительную систему (МИС) [4 – 7]. В процессе измерений использовали часть возможностей МИС, а именно, ее модуль GPS, акселерометры и гироскопические датчики.

Основными компонентами МИС являются (рис. 2): компьютер (ноутбук), модуль GPS, блок питания, CAN-шина и три идентичных инерционных измерительных прибора, объединяющих в своем корпусе трехмерный акселерометр и трехмерный гироскоп.

Компьютер выполнял функции управляющего устройства и хранилища информации (результатов измерений). GPS-модуль обеспечивал измерение GPS-координат и осевой скорости движения агрегата в целом. CAN-шина использовалась по назначению, т.е. для осуществления связи между компьютером и другими элементами МИС. Трехмерные акселерометры обеспечивали измерение парциальных ускорений  $a_x$ ,  $a_y$  и  $a_z$ , а гироскопические датчики — угловых скоростей  $\omega_x$ ,  $\omega_y$  и  $\omega_z$ . Основные параметры МИС приведены в табл. 1.

Ранее при выполнении математического моделирования посева было использовано предположение, что траектория сошника (линия рядка) состоит из нескольких групп гармоник, часть из которых (длинноволновых) обусловлены непрямолинейностью движения трактора, другая часть (средневолновых) обусловлены колебаниями рамы сеялки относительно линии тяги и третья часть (коротковолновых) обуслов-

лены колебаниями сошников относительно рамы сеялки [8].

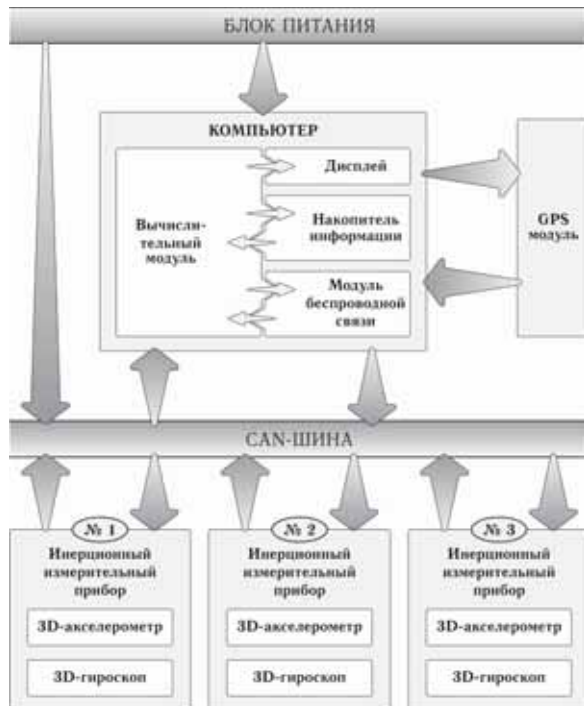


Рис. 2. Структурная схема МИС

Учитывая изложенное инерционные измерительные приборы были установлены соответственно на посевной секции (рис. 3 и 4А, прибор № 1), на раме сеялки (рис. 3 и 4В, прибор № 2) и на раме трактора (рис. 5А, прибор № 3).

Крепление инерционных измерительных приборов осуществляли с помощью струбцин (рис. 4 и 5А).

Пост наблюдения организовывали или в кабине трактора (рис. 3В) или на прицепе с опрыскивателем (рис. 5В).

*Сравнение вариантов восстановления функциональных зависимостей применением прямого преобразования Фурье и метода последовательного приближения*

Описанное выше экспериментальное оборудование позволяло, в частности, измерять угловую скорость  $\omega_z$  крутильных колебаний посевной секции вокруг вертикальной оси  $Oz$ , проходящей через точку установки инерционного измерительного прибора № 1. Этот параметр, характеризует стабильность хода сошника в горизонтальной плоскости и по этому для текущих исследований представляет интерес.

Методологию применение метода дискретного ППФ для получения функциональной зависимости  $\omega_z$  от времени ( $t$ ), т.е. восстановления функции  $\omega_z(t)$ , изложено в работе [9] по этому тут мы этот метод описывать не будем.

Таблица 1. Техническая характеристика МИС

Наименование параметра	Единица измерения	Числовое значение
1. Интервал варьирования измеряемой величины		
1.1. Ускорение	м/с <sup>2</sup>	±20
1.2. Угловая скорость	град./с	±250
1.3. Географические координаты	град.	0 – 90
1.4. Линейная скорость	м/с	0 – 515
1.5. Курсовой угол	град.	0 – 359
2. Количество измерительных каналов		
2.1. Ускорение		3
2.2. Угловая скорость		3
2.3. Навигационная информация		1
3. Предел основной допустимой относительной ошибки		
3.1. Ускорение	%	±1
3.2. Угловая скорость	%	±1
4. Предел основной допустимой абсолютной ошибки		
4.1. Линейная скорость	м/с	0,01
4.2. Горизонтальная координата	м	<2,0
4.3. Временные отметки	с	5x10 <sup>-8</sup>

Далее речь пойдет о сглаживании результатов измерений суммой гармоник, которые подбирают последовательно и оценивают по методу наименьших квадратов, т.е. о методе последовательного приближения (ПП). Для этого представим непрерывную функцию  $\omega_z(t)$  в виде конечного тригонометрического ряда:

$$\omega_z(t) = \sum_{i=1}^n A_i^{(\omega z)} \cos(\Omega_i^{(\omega z)} t + \varphi_i^{(\omega z)}), \quad (1)$$

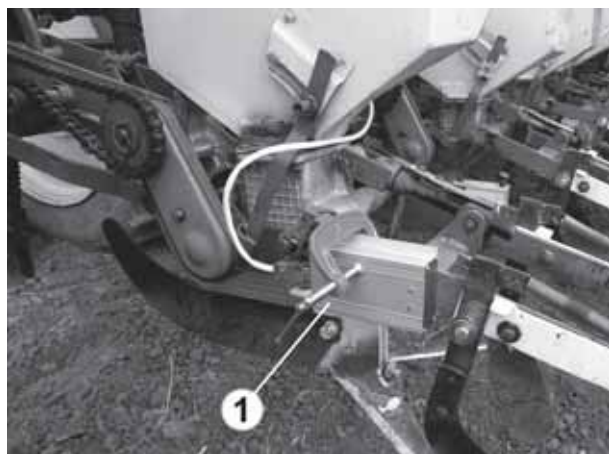
$$t \in [0, T], \quad 1 \leq n,$$

где:  $A_i^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_i^{(\omega z)}$  и  $\varphi_i^{(\omega z)}$  — амплитуда, круговая частота и начальная фаза -той гармоники разложения;  $T$  — период или ширина интервала времени  $t$ , соответствующего области определения  $\omega_z(t)$ ;  $n$  — количество гармоник.

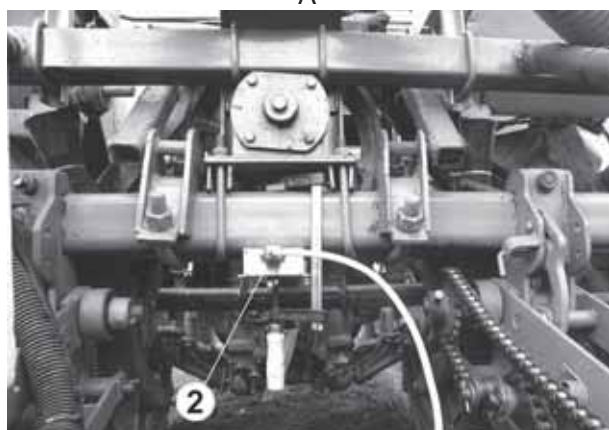


Рис. 3. Рабочее положение инерционных измерительных приборов МИС на посевной секции (1) и раме (2) сеялки

С целью восстановления функции (1) нам следует разработать алгоритм поиска значений  $A_i^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_i^{(\omega z)}$  и  $\varphi_i^{(\omega z)}$ . Самый простой из алгоритмов предполагает следующие этапы:



А



В

Рис. 4. Крепление инерционных измерительных приборов № 1 и № 2 с помощью струбцин на посевной секции (А) и раме (В) сеялки

1) Задаем количество  $\max\{n\}$  гармоник в разложении и обозначаем интервалы варьирования величин  $A_i^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_i^{(\omega z)}$  и  $\varphi_i^{(\omega z)}$ . В качестве обоснованных ориентиров логично использовать одноименные величины, полученные в случае применения метода ППФ.

2) Интервалы варьирования  $A_i^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_i^{(\omega z)}$  и  $\varphi_i^{(\omega z)}$  которые (как вариант) считаем равными для всех  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$  делим на подинтервалы и таким образом получаем три упорядоченных множества возможных значений перечисленных величин.

3) Текущую гармонику, для которой выполняется расчет амплитуды, частоты и фазы, обозначим литерой  $j$ . Гармоники, для которых  $i < j$  являются определенными, а гармоники с номерами  $i \in \{j + 1, j + 2, \dots, n\}$  еще предстоит определить. В процессе определения параметров  $n$  гармоник  $j$  пробегает все значения упорядоченного множества  $\{1, 2, \dots, n\}$ .

3) Начинаем с тригонометрического ряда (1), состоящего из одной гармоники, т.е.  $n = 1$ .



А



В

Рис. 5. Крепление инерционного измерительного прибора № 3 на раме трактора (А) и организация исследовательского поста наблюдения (В) на прицепе с опрыскивателем

4) Используя три вложенных цикла для всех комбинаций значений  $A_j^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_j^{(\omega z)}$  и  $\varphi_j^{(\omega z)}$ , где  $j = n$ , вычисляем сумму квадратов отклонений (невязку) экспериментальных значений  $\omega_z(t)$  от теоретической кривой (1), с текущим значением  $n \leq \max\{n\}$ . Тот комплект значений  $A_j^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_j^{(\omega z)}$  и  $\varphi_j^{(\omega z)}$ , которому соответствует наименьшая невязка, приписываем искомой -той гармонике.

5) Увеличиваем значения  $n = j$  на единицу и повторяем пункты 4 и 5 до тех пор, пока будут определены все  $n = \max\{n\}$  гармоник.

На этом заканчивается этап первичного определения гармоник разложения (1). Поскольку параметры каждой предыдущей гармоники определяли без учета наличия всех последующих гармоник, то далее следует уточнить параметры всех гармоник.

Теперь  $n$  остается фиксированным ( $n = \max\{n\}$ ), а  $j$  пробегает все значения упорядоченного множества  $\{1, 2, \dots, n\}$ . Цикл операций по уточнению параметров всех гармоник предполагает такие действия:

6) Выбираем начальную гармонику  $j = 1$ .

7) Для текущей  $j$ -той гармоники известны параметры  $A_j^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_j^{(\omega z)}$  и  $\varphi_j^{(\omega z)}$ . Отказываемся от этих конкретных значений и для каждого параметра назначаем новые интервалы варьирования, которые могут быть равными прежним (см. пункт 1). Один из вариантов определения границ варьирования  $A_j^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_j^{(\omega z)}$  и  $\varphi_j^{(\omega z)}$  является последовательное умножение текущих значений  $A_j^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_j^{(\omega z)}$  и  $\varphi_j^{(\omega z)}$  на два коэффициента  $\alpha_1 < 1$  и  $\alpha_2 > 1$ .

Тут возможны и другие варианты, которые заслуживают отдельного исследования. На них мы останавливаться не будем.

8) Новые интервалы варьирования  $A_j^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_j^{(\omega z)}$  и  $\varphi_j^{(\omega z)}$  делим на подинтервалы и таким образом снова получаем три множества возможных значений перечисленных величин. Разница состоит в том, что теперь эти множества индивидуальны для всех гармоник.

9) Используя три вложенных цикла для всех комбинаций значений  $A_j^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_j^{(\omega z)}$  и  $\varphi_j^{(\omega z)}$  вычисляем невязку экспериментальных значений  $\omega_z(t)$  и теоретической кривой (1) и тот комплект значений  $A_j^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_j^{(\omega z)}$  и  $\varphi_j^{(\omega z)}$ , которому соответствует наименьшая невязка, приписываем искомой  $j$ -той гармонике. Теперь  $j$ -тая гармоника переопределена.

10) Увеличиваем значение  $j$  на единицу и повторяем пункты 7 – 10 до тех пор пока будут переопределены все  $n$  гармоник.

11) Цикл уточнения параметров гармоник (пункты 6 – 10) повторяются до тех пор, пока изменение невязки удовлетворит требованию на точность. Все гармоники окончательно определены.

Преимущество описанного алгоритма состоит в его простоте, а недостаток — в значительной ресурсоемкости, связанной с тем, что все параметры  $A_i^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_i^{(\omega z)}$  и  $\varphi_i^{(\omega z)}$  всех гармоник разложения (1) рассчитывают и уточняют путем перебора. На ПК средней производительности такая задача может потребовать от нескольких часов до нескольких суток расчетного времени. Поскольку амплитуду  $A_i^{(\omega z)}$  гармоник можно определить точно, не прибегая к перебору, покажем, как это можно выполнить.

Представляем ряд (1) в развернутом виде

$$\omega_z(t) = \sum_{i=1}^{j-1} A_i^{(\omega z)} \cos(\Omega_i^{(\omega z)} t + \varphi_i^{(\omega z)}) + A_j^{(\omega z)} \cos(\Omega_j^{(\omega z)} t + \varphi_j^{(\omega z)}) + \sum_{i=j+1}^n A_i^{(\omega z)} \cos(\Omega_i^{(\omega z)} t + \varphi_i^{(\omega z)}) \quad (2)$$

$1 \leq n, \quad j = 1, 2, \dots, n.$

Принимая во внимание упорядоченное множество экспериментально измеренных значений

$$\omega_{zk} \in \{\omega_{z1}, \omega_{z2}, \dots, \omega_{zK}\}, \quad (3)$$

которому соответствует временной ряд

$$t_k \in \{t_1, t_2, \dots, t_K\}, \quad (4)$$

где  $K$  — количество экспериментальных измерений. Записываем сумму квадратов отклонений  $S^2$  экспериментальных значений  $\omega_{zk}$  от теоретических  $\omega_z(t_k) = \omega_z(t = k)$ , ( $k = 1, 2, \dots, K$ ), которую рассматриваем, как функцию параметров  $A_j^{(\omega z)}$ ,  $\Omega_j^{(\omega z)}$  и  $\varphi_j^{(\omega z)}$ :

$$S^2 = S^2(A_j^{(\omega z)}, \Omega_j^{(\omega z)}, \varphi_j^{(\omega z)}) = \sum_{k=1}^K (\omega_z(t_k) - \omega_{zk})^2 \quad (5)$$

Фиксируем величину частоты  $\Omega_j^{(\omega z)}$  и начальной фазы  $\varphi_j^{(\omega z)}$ , а значение амплитуды  $A_j^{(\omega z)}$  будем считать неизвестной непрерывной величиной. Для поиска конкретного значения  $A_j^{(\omega z)}$ , минимизирующего  $S^2$ , находим частную производную от (5):

$$\frac{\partial S^2}{\partial A_j^{(\omega z)}} = 2 \sum_{k=1}^K (\omega_z(t_k) - \omega_{zk}) \frac{\partial \omega_z(t_k)}{\partial A_j^{(\omega z)}}, \quad (6)$$

где

$$\frac{\partial \omega_z(t_k)}{\partial A_j^{(\omega z)}} = \cos(\Omega_j^{(\omega z)} t_k + \varphi_j^{(\omega z)}). \quad (7)$$

Далее приравняем (6) к нулю

$$\sum_{k=1}^K (\omega_z(t_k) - \omega_{zk}) \cos(\Omega_j^{(\omega z)} t_k + \varphi_j^{(\omega z)}) = 0 \quad (8)$$

и выполнив подстановку  $\omega_z(t_k)$  (2) с учетом замены

$$\begin{aligned} C_{ik} &= \cos(\Omega_i^{(\omega z)} t_k + \varphi_i^{(\omega z)}), \\ C_{jk} &= \cos(\Omega_j^{(\omega z)} t_k + \varphi_j^{(\omega z)}), \end{aligned} \quad (9)$$

приходим к выражению

$$\sum_{k=1}^K \left[ \sum_{i=1}^{j-1} A_i^{(\omega z)} C_{ik} + A_j^{(\omega z)} C_{jk} + \sum_{i=j+1}^n A_i^{(\omega z)} C_{ik} - \omega_{zk} \right] C_{jk} = 0 \quad (10)$$

Далее решаем выражение (10) относительно  $A_j^{(\omega z)}$ . В итоге получаем:

$$A_j^{(\omega z)} = \frac{\sum_{k=1}^K \left[ \omega_{zk} - \sum_{i=1}^{j-1} A_i^{(\omega z)} C_{ik} - \sum_{i=j+1}^n A_i^{(\omega z)} C_{ik} \right] C_{jk}}{\sum_{k=1}^K C_{jk}^2} \quad (11)$$

На этом рассмотрение предлагаемого алгоритма ПП экспериментальных дискретных данных конечным тригонометрическим рядом заканчиваем.

На рис. 6 представлены сравнительные результаты применения методов ППФ и ПП для случая обработки экспериментальных значений угловой скорости  $\omega_z$  (град./с) крутильных колебаний посевной секции в процессе посева.

В отличие от интерполяции экспериментальных данных путем ППФ, метод ПП изна-

начально предназначен для аппроксимации экспериментальных данных, а, значит, позволяет выполнять их сглаживание (избавление от шумов). Процедура сглаживания состоит в ограничении максимального возможного значения  $\max\{\Omega_i^{(\omega z)}\}$  частоты гармоник (1) при обосновании их параметров в процессе реализации метода ПП. При этом количество гармоник  $n$  в разложении (1) остается фиксированным.

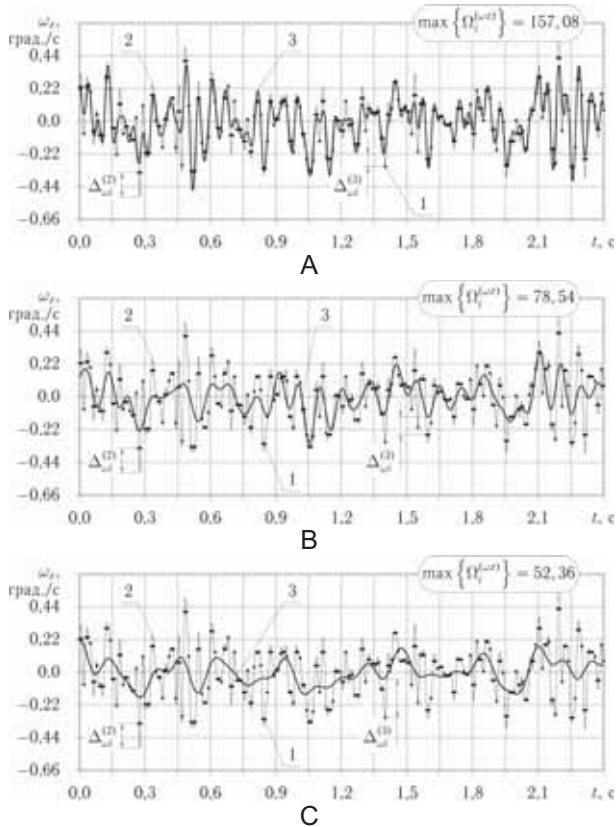


Рис. 6. Аппроксимация точек данных (1) измерения угловой скорости  $\omega_z$  (град./с) посевной секции в случае применения ППФ (2) и метода ПП (3), когда максимальная частота (рад./с) элементов рядов (2) и (3)  $\max\{\Omega_i^{(\omega z)}\}$  ограничена величинами: 157,08 (А); 78,54 (В); 52,36 (С)

Метод ППФ также предоставляет возможность сглаживания экспериментальных данных похожим способом. Только в таком случае ограничивают количество гармоник в разложении (уменьшают  $n$ ), а вместе с этим и максимальную частоту гармоник.

На рис. 6 точками 1 обозначены результаты измерений угловой скорости  $\omega_z$ , а кривые 2 и 3 соответствуют методу ППФ, когда задействованы все возможные гармоники (120 шт.), и методу ПП, когда максимальное значение круговой частоты гармоник  $\max\{\Omega_i^{(\omega z)}\}$  (рад./с) ограниче-

ны величинами: 157,08 (рис. 5А); 78,54 (рис. 6В); 52,36 (рис. 6С). Поскольку кривые 2 интерполируют экспериментальные данные и одинаковы для всех рисунков, то они выступают в роли эталона для оценки эффекта сглаживания.

Для кривой 2 характерны неточности интерполяции, которые проявляются в проходах кривой за пределы экспериментальных точек  $\Delta_{\omega i}^{(2)}$ . Для кривых 3, которые аппроксимируют экспериментальные данные, характерны отклонения обратного свойства —  $\Delta_{\omega i}^{(3)}$ .

Проблема состоит в том, что как бы ни выглядели графики 3 нет критерия для оценки степени необходимого сглаживания. В работе [9] для обоснования степени сглаживания было предложено использовать не анализ параметров первичной функции, например, (1) и соответствующего ей графика  $\omega_z(t)$ , а первого или второго интеграла от нее. В данном случае интегрированием  $\omega_z(t)$  (1) получаем угол поворота посевной секции вокруг вертикальной оси  $\lambda_z(t)$ , как функцию времени:

$$\lambda_z(t) = \sum_{i=1}^n A_i^{(\lambda z)} \sin(\Omega_i^{(\lambda z)} t + \varphi_i^{(\lambda z)}), \quad (12)$$

$$t \in [0, T], \quad 1 \leq n,$$

где:  $A_i^{(\lambda z)}$ ,  $\Omega_i^{(\lambda z)}$  и  $\varphi_i^{(\lambda z)}$  — амплитуда, круговая частота и начальная фаза, а  $n$ ,  $t$  и  $T$  сохраняют прежние значения. В свою очередь новая амплитуда  $A_i^{(\lambda z)}$  определяется дробью:

$$A_i^{(\lambda z)} = \frac{A_i^{(\omega z)}}{\Omega_i^{(\omega z)}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

а новая частота сохраняет свое прежнее значение, т.е.:

$$\Omega_i^{(\lambda z)} = \Omega_i^{(\omega z)}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (14)$$

Графики  $\lambda_z(t)$  показаны на рис. 7.

Кривая 1 соответствует результатам расчета угла крутильных колебаний  $\lambda_z$  (град.) посевной секции вокруг вертикальной оси  $Oz$  в случае применения ППФ, когда задействованы все 120 шт. гармоник. Кривая 2 также получена с применением ППФ, но количество гармоник ограничено максимальным значением частоты  $\max\{\Omega_i^{(\omega z)}\}$  (рад./с): 157,08 (рис. 7А); 78,54 (рис. 7В); 52,36 (рис. 7С). При таких же ограничениях по частоте получены кривые 3, но для их построения применили метод ПП.

Как видим, принципиальных различий между кривыми 2 и 3 нет. Поскольку они получены вследствие интегрирования, то, как не трудно заметить, для них характерно самосглаживание. Даже в случае когда задействованы все гармоники и, соответственно, фильтрация не применяется (рис. 7А), на кривых 2 и 3 не наблюдаются характерных для (рис. 6) осцилляций.

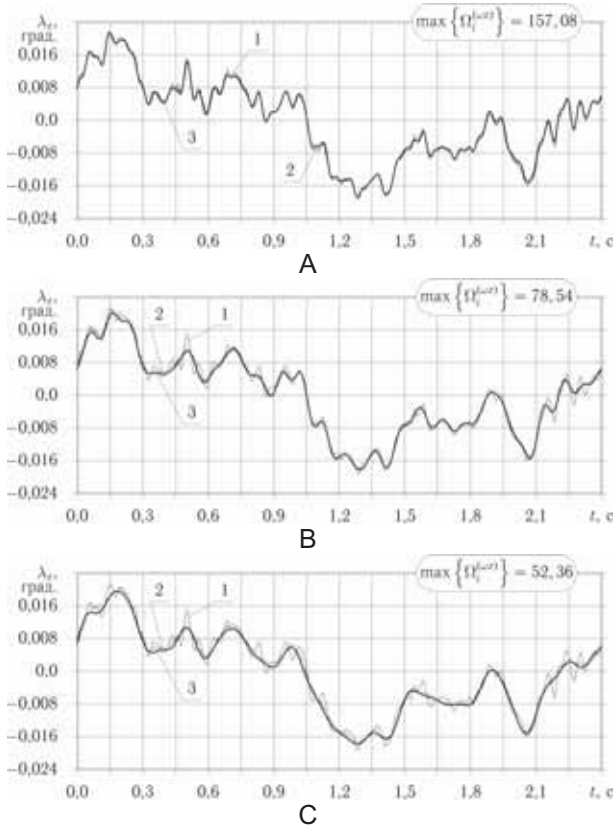


Рис. 7. Результаты расчета угла поворота  $\lambda_z$  (град.) посевной секции вокруг оси  $Oz$  в случае применения ППФ когда задействованы все (1) или часть (2) гармоник, а также метода ПП (3), когда частота (рад./с) элементов рядов (2) и (3)  $\max\{\Omega_i^{(\omega z)}\}$  ограничена величинами: 157,08 (А); 78,54 (В); 52,36 (С)

Поясняется это тем, что при интегрировании тригонометрического ряда  $\omega_z(t)$  (1) получаем временную функцию угла поворота (12), в которой амплитуда  $A_i^{(\lambda z)}$  определяется дробью (13), в числителе которой располагается первичная амплитуда  $A_i^{(\omega z)}$ , а в знаменателе частота  $\Omega_i^{(\omega z)}$ , которая и после интегрирования остается неизменной. Из этого следует, что чем больше частота гармоники  $\Omega_i^{(\lambda z)}$ , тем меньше вклад начальной амплитуды  $\Omega_i^{(\omega z)}$  в ее результирующее значение  $A_i^{(\lambda z)}$ . В этом состоит суть механизма самосглаживания (самофильтрации), вызванного интегрированием первичной функции.

Результаты описанной трансформации амплитудно-частотного спектра рядов  $\omega_z(t)$  (1) и  $\lambda_z(t)$  (12) иллюстрируют рис. 8 и 9.

Рис. 8 соответствует случаю, когда сглаживание не применяется, т.е. и в первом, и во втором случае задействованы все  $n = 120$  гармоник и, к тому же, ограничение по частоте в случае

применения метода ПП (рис. 8В,  $\max\{\Omega_i^{(\omega z)}\} = 309,22$ ) с точностью до единицы совпадает с максимальной частотой спектра для случая интерполяции экспериментальных данных с применением ППФ (рис. 8А,  $\max\{\Omega_i^{(\omega z)}\} = 310,25$ ).

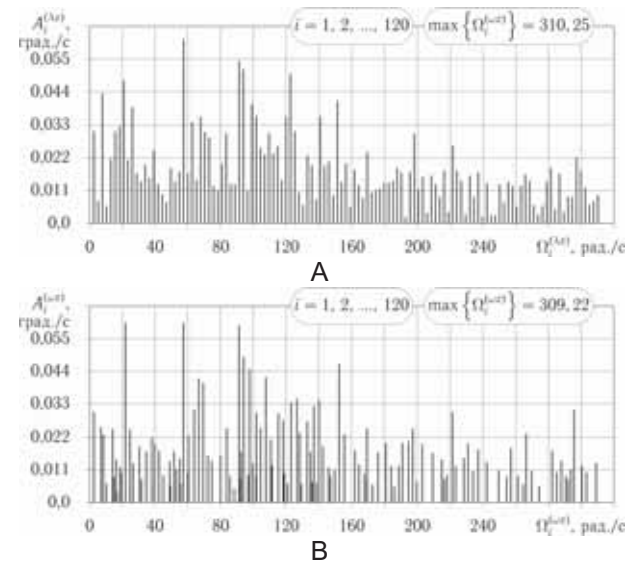


Рис. 8. Амплитудно-частотный спектр ( $\Omega_i^{(\omega z)}$  — частота, рад./с;  $A_i^{(\omega z)}$  — амплитуда, град.): А) функции  $\omega_z(t)$  (град./с, кривая 2, рис. 6.) интерполяции точек данных измерения угловой скорости посевной секции в случае применения ППФ, когда задействованы все  $n = 120$  гармоник; В) функции  $\omega_z(t)$  (град./с) аппроксимации тех же данных путем применения ПП, когда максимальное значение частоты  $\max\{\Omega_i^{(\omega z)}\}$  и число гармоник соответствуют предыдущему варианту

Принципиальное отличие полученных спектров состоит в том, что во втором случае интервалы между соседними частотами носят случайный характер. В остальном в качественном смысле спектры совпадают.

Сравнение рис. 8А и рис. 9А позволяет проиллюстрировать упомянутый выше процесс самосглаживания, который происходит в ответ на интегрирование первичной интерполирующей функции, т.е. переход от разложения  $\omega_z(t)$  (1) к разложению (12). Как видим во втором случае, с некоторой поправкой на волнообразность, явно выражена общая закономерность: чем больше частота  $\Omega_i^{(\lambda z)}$ , тем меньше амплитуда  $A_i^{(\lambda z)}$ .

Кроме этого рис. 9 иллюстрирует принципиальную разницу механизмов сглаживания путем ограничения максимальной частоты гармоник в разложении в случае применения ППФ (рис. 9В) и метода ПП (рис. 9С).

В первом случае ограничение максимальной частоты гармоники сопровождается уменьшением общего количества гармоник в разложении, а во втором случае количество гармоник может сохраняться. Это обстоятельство позволяет предположить, что в случае сглаживания по методу ПП можно получить большую корректность получаемых закономерностей. Но сравнение графиков рис. 7 дает основание утверждать, что такие различия во многих случаях останутся несущественными.

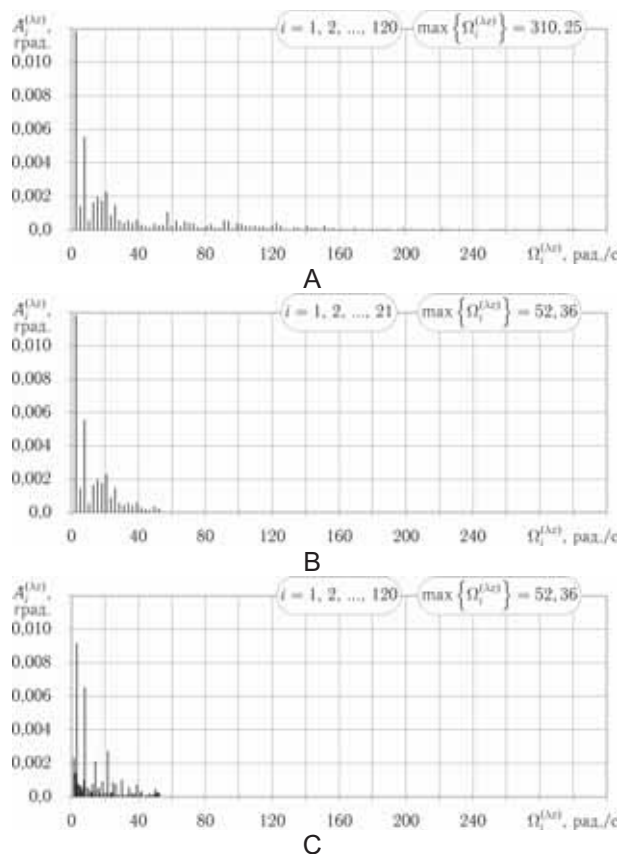


Рис. 9. Амплитудно-частотный спектр ( $\Omega_i^{(\lambda z)}$ , — частота, рад./с;  $A_i^{(\lambda z)}$  — амплитуда, град.): А) кривой 1 на рис. 7, построенной с применением ППФ когда задействованы все ( $n = 120$ ) гармоники; В) кривой 2 на рис. 7С, построенной с применением ППФ когда с целью фильтрации задействованы часть ( $n = 21$ ) гармоник; С) кривой 3 на рис. 7С, построенной с применением ПП тригонометрическим рядом когда с целью фильтрации максимальная частота гармоник ограничена величиной  $\max\{\Omega_i^{(\lambda z)}\} = 52,36$  рад./с

Главным недостатком метода ПП является его ресурсоемкость. По времени счета применение ППФ и метода ПП различаются на порядки. Кроме того, получаемый методом ПП амплитудно-частотный спектр может меняться в зависимости от особенностей программной реали-

зации метода, а в случае применения ППФ получаемый амплитудно-частотный спектр остается неизменным. Тем не менее, у метода ПП есть важное преимущество. Этот метод не требует равномерного распределения аппроксимируемых данных вдоль шкалы аргумента и, следовательно, применим, например, для восстановления линии рядка по координатам растений.

*Восстановление линии рядка по координатам взошедших растений методом ПП.* В данном случае мы ставим задачу предварительной проверки применимости метода ПП для восстановления линии рядка по взошедшим растениям. Полное решение такой задачи включая расчет параметров точности восстановления линии рядка мы не предполагаем. Полное решение такой задачи заслуживает отдельной работы, поскольку может найти применение в алгоритмах функционирования автоматов вождения уборочных машин.

Вычислительный эксперимент по восстановлению линии рядка предполагает следующее:

1) Назначить параметры  $A_k^{(y)}$ ,  $L_k^{(y)}$  и  $\varphi_k^{(y)}$  — амплитуду, длину волны и начальную фазу линии рядка  $y(l)$  в соответствии с представлением об  $y(l)$ , как о зависимости между ординатой  $y$  (горизонтальным отклонением от идеальной прямой рядка) и текущим значением длины отрезка  $l$  линии рядка, представляемой в виде суммы трех ( $k = 1, 2, 3$ ) гармоник [1]:

$$y(l) = \sum_{k=1}^3 A_k^{(y)} \sin\left(\frac{2\pi}{L_k^{(y)}} l + \varphi_k^{(y)}\right). \quad (12)$$

2) В соответствии с авторским алгоритмом [1] провести моделирование одного 10-ти метрового участка рядка посева и таким образом получить совокупность фактических координат  $(x_i, y_i)$  всех  $N_r$  шт. взошедших растений;

3) Используя математическую модель предлагаемой методики оценки параметров распределения растений в рядке [1], получить измеренные значения  $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$  фактических координат  $(x_i, y_i)$  всех  $N_r$  шт. взошедших растений, а также определить конечные параметры распределения растений в рядке, в частности оценку  $\sigma_r$  среднеквадратического горизонтального отклонения семян от линии рядка.

Несмещенную оценку  $\sigma_r^*$  среднеквадратического горизонтального отклонения семян от линии рядка  $\sigma_r$  определять не следует, поскольку на одном 10-ти метровом участке рядка располагается на порядок меньше растений, чем необходимо для расчёта  $\sigma_r^*$ . В связи с этим мы сразу отмечаем, что несоответствие фактического значения и полученной оценки  $\sigma_r$  среднеквадратического горизонтального отклонения семян от линии рядка внесет свой негативный вклад в погрешности восстановления рядка.



4) Используя изложенный выше алгоритм ПП, восстановить уравнение линии рядка и посредством графиков оценить степень соответствия между фактической и восстановленной линией рядка.

На этом вычислительный эксперимент по восстановлению линии рядка заканчивается. Далее в табл. 2 приведены заданные значения параметров 10-ти метрового участка рядка посева кукурузы, линия которого подвергалась восстановлению.

**Таблица 2.** Исходные параметры для моделирования

Наименования параметров	Единицы измерения	Обозначения	Числовые значения
1. Параметры трех гармоник:			
амплитуда	мм	$A_1^{(y)}$ , $A_2^{(y)}$ , $A_3^{(y)}$	17,1; 16,7; 18,22
длина волны	м	$L_1^{(y)}$ , $L_2^{(y)}$ , $L_3^{(y)}$	106,8; 17,9; 4,4
начальная фаза		$\varphi_1^{(y)}$ , $\varphi_2^{(y)}$ , $\varphi_3^{(y)}$	1,546; 0,553; 0,862
2. Математическое ожидание интервала между растениями	мм	$\bar{a}$	200
3. Среднеквадратическое отклонение интервала между растениями	мм	$\sigma_a$	76,15
4. Среднеквадратическое отклонение растений относительно линии рядка	мм	$\sigma_r$	6,58
5. Вероятность высева		$P_1$	0,95
6. Вероятность высева двойника		$P_2$	0,2
7. Вероятность появления всхода		$P_3$	0,8

На рис. 10 показана фактическая линия рядка 1, координаты семян, давших всходы 2 и восстановленная линия 3 рядка. Смещение точек 2 и линии 3 относительно фактической линии 1 связано с несовпадением фактической системы координат и системы координат, в которой проводили (моделировали) измерения положения растений. В отношении кривизны линий 1 и 3 наблюдаются существенные совпадения. Таким образом, предлагаемый метод заслуживает дальнейшего изучения и развития, но достигнутая точность не достаточна для оценки динамики сошников предлагаемых конструкций.

*Сравнение динамики разработанных вариантов конструкции комбинированного сошника.* Программа экспериментов по сравнению параметров движения сошников предлагаемой конструкции во время выполнения технологического процесса предполагала четыре варианта: № 1 — заводская конструкция сошника, без изменений (контроль); № 2 — УС без загортачей;

№ 3 — УС, у которого загортачи располагались симметрично (рис. 11А); № 4 — УС, у которого загортачи установлены асимметрично (рис. 11Б). Ширина захвата всех вариантов УС составляла 200 мм

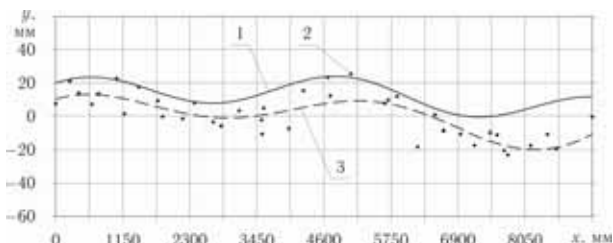


Рис. 10. Результаты восстановления линии рядка: 1 и 3 — фактическая и восстановленная линия рядка; 2 — точки семян давших всходы

Методика экспериментов предполагала рабочие проходы агрегата на подготовленном под посев ровном горизонтальном участке поля. Глубина посева составляла 60 мм, а внесения РЖ — 40 мм. Измерения проводили в течение 12 с рабочего хода, после выхода агрегата на устоявшийся режим.

Динамику сошников оценивали по двум показателям: 1) среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\lambda z}$  (град.) угла поворота  $\lambda_z$  (град.) сошника в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси  $Oz$ ; 2) среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\Delta h}$  (мм) разницы ( $\Delta h = h - \bar{h}$ ) между текущей глубиной  $h$  (мм) хода сошника и ее средним значением  $\bar{h}$  (мм) на мерном участке. Количество повторностей опытов — четырехкратная.



Рис. 11. Варианты СУ, у которых загортачи установлены симметрично (А) и со смещением (Б)

На рис. 12 показаны сравнительные результаты по четырем повторностям экспериментов.

В табл. 3 приведен цифровой материал, иллюстрирующий показатели стабильности рабочего хода сошников сравниваемых конструкций согласно экспериментам № 1 — 4.

Из анализа гистограмм рис. 12А и цифрового материала табл. 3 видно, что горизонтальные крутильные колебания сошников во всех случаях отличались не принципиально. Самое большое значение среднеквадратического отклоне-

ния  $\sigma_{\lambda_z} = 0,0202$  град. относится к второй повторности опыта согласно варианту № 3 (симметричные загортачи). Но, тем не менее, в целом по всем повторностям опыта № 3 среднее значение  $\bar{\sigma}_{\lambda_z}$  среднеквадратического отклонения отличалось от контроля на 7,14%.

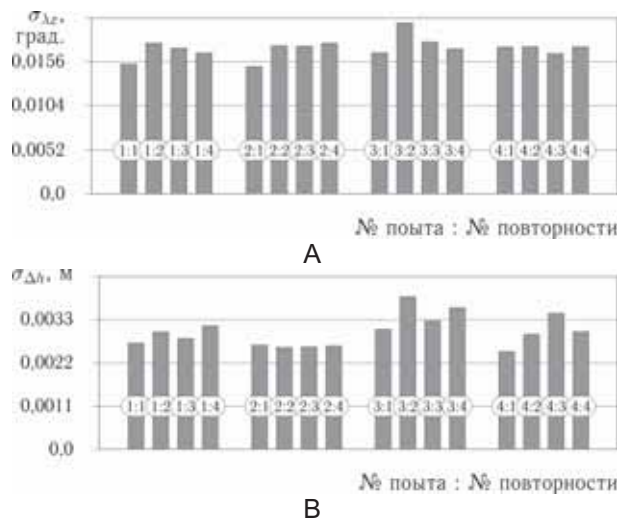


Рис. 12. Сравнение показателей стабильности рабочего хода сошников согласно экспериментам № 1 – 4: А) среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\lambda_z}$  горизонтального угла поворота сошника относительно вертикальной оси  $Oz$ ; В) среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\Delta h}$  глубины хода сошника от среднего значения

Стабильность хода сошников по глубине (рис. 12В, табл. 3) в зависимости от номера опыта различалась в существенно большей степени. Тем не менее, самый худший вариант остался тем же (опыт № 3).

Примечательно, что если загортачи отсутствуют (опыт № 2), то стабильность хода улучшается. Для опыта № 3 среднее значение  $\bar{\sigma}_{\Delta h}$  среднеквадратического отклонения  $\sigma_{\Delta h}$  составило 120,69%, а для опыта № 2 — 89,66%. Четвертый вариант опыта отличается от контроля не принципиально. Для него среднее значение  $\bar{\sigma}_{\Delta h}$  составило 3,45%.

#### Выводы:

1. Получение аналитического представления траектории движения точки через измерение ее парциальных ускорений может выполняться как методом ППФ, так и методом ПП. Причем в такой задаче метод ПП значительно уступает по ресурсоемкости.

2. Для таких задач, как восстановление линии хода сошника по координатам взошедших растений из перечисленных методов ППФ и ПП из-за нерегулярности данных координат, измеренных вдоль прямой идеального направления ряда, применим только метод ПП.

Таблица 3. Показатели стабильности рабочего хода сошников согласно экспериментам №1 – 4

Наименования параметров	Обозначения	Единицы измерения	Варианты опыта			
			1	2	3	4
1. Среднеквадратическое отклонение угла $\lambda_z$ :	$\sigma_{\lambda_z}$	град.	0,0153	0,015	0,0167	0,0174
			0,0178	0,0175	0,0202	0,0174
			0,0172	0,0175	0,0180	0,0166
			0,0166	0,0178	0,0171	0,0174
Среднее значение:	$\bar{\sigma}_{\lambda_z}$	град.	0,0168	0,0170	0,0180	0,0172
		%	100,00	101,19	107,14	102,38
2. Среднеквадратическое отклонение $\Delta h$ глубины $h$	$\sigma_{\Delta h}$	мм	0,0027	0,0027	0,0031	0,0025
			0,0030	0,0026	0,0039	0,0029
			0,0028	0,0026	0,0033	0,0035
			0,0031	0,0026	0,0036	0,0030
Среднее значение:	$\bar{\sigma}_{\Delta h}$	мм	0,0029	0,0026	0,0035	0,0030
		%	100,00	89,66	120,69	103,45

3. Применяя оба метода установлено, что вариант конструкции УС, у которого ширина захвата составляет 200 мм и загортачи установлены асимметрично, имеет показатели стабильности рабочего хода, сравнимые с контролем, согласно которому сошник имеет заводскую конструкцию.

#### Литература

1. Мельник В.И. Распределение жидкостей под слоем почвы: Монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, – 441 с.
2. Мельник В.И. Ленточное внесение почвенных гербицидов в контексте эволюционирующего земледелия / В.И. Мельник, Аль-Фтиххат Моусаб Абдулвахид Мохамед // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture, – Lublin, 2014. – Том 16, No 7. – С. 117-124.
3. Метод парциальных ускорений и его приложения в динамике мобильных машин / Н.П. Артемов, А.Т. Лебедев, М.А. Подригало, А.С. Полянский, Д.М. Клец, А.И. Коробко, В.В. Задорожня. – Под ред. М.А. Подригало. – Х.: «Міськдрук», 2012. – 220 с.
4. Антощенко Р.В. Система збору та обробки даних для контролю за функціонуванням машинно-тракторного агрегату [Текст] / Р.В. Антощенко // Механізація сільськогосподарського виробництва // Вісник ХНТУСГ. – Х.: ХНТУСГ, 2012. – Вип. 124, т. 2. – С. 89 – 95.
5. Антощенко Р.В. Мобільний вимірювальний комплекс для збору та обробки даних функціонування мобільних енергетичних засобів

[Текст] / Р.В. Антощенко, В.М. Антощенко, М.А. Голубничий, Д.І. Шаповалов // Технічний сервіс машин для рослинництва: Вісник ХНТУСГ. – Х.: ХНТУСГ, 2013. – Вип. 134. – С. 52 – 57.

6. Антощенко Р.В. Спосіб та вимірювальна для визначення енергетичних витрат мобільної машини [Текст] / Р.В. Антощенко, В.М. Антощенко // Технічний сервіс машин для рослинництва: Вісник ХНТУСГ. – Х.: ХНТУСГ, 2014. – Вип. 145. – С. 10 – 216.

7. Антощенко Р.В. Обробка даних мобільного вимірювального комплексу для контролю за функціонуванням мобільних енергетичних засобів [Текст] / Р.В. Антощенко // Вібрації в техніці

та технологіях. – Вінниця, 2013. – № 2(70) – С. 6 – 9.

8. Мельник В.И. Математическое моделирование посева пропашных культур / В.И. Мельник, Аль-Фтиххат Моусаб Абдулвахид Моххамед // Бюллетень научных работ. Выпуск 31 / Белгород: Издательство БелГСХА им. В.Я.Горина, 2012. – С. 182 - 192.

9. Мельник В.И. Использование метода парциальных ускорений при восстановлении траектории сошника / В.И. Мельник, Аль-Фтиххат Моусаб Абдулвахид Моххамед // Научно-теоретический сборник: Вісник ЖНАЕУ. Вип. 1(45), Т. 1, Ч. II / Житомир: ЖНАЕУ, 2014. – С 438-447.

## Анотація

### Вивчення динаміки комбінованого сошника

В.І.Мельник, Аль-Фтіххат Моусаб Абдулвахід Мохамед, Р.В.Антощенко

Виконується порівняння динаміки декількох варіантів конструкції комбінованого сошника, призначеного для висіву просапних культур і одночасного післяпосівного стрічкового внутрішньогрунтового внесення гербіцидів. Для відновлення траєкторії сошників та оцінки параметрів їх динаміки використовуються методи парціальних прискорень (наведено опис застосовуваного устаткування), прямого перетворення Фур'є і послідовного наближення. Показано, що поєднання операцій проходить найбільш ефективно, якщо в конструкції комбінованого сошника використовуються асиметричні загортачі.

**Ключові слова:** сошник, траєкторія, лінія рядка, амплітуда, частота, довжина хвилі, спектр, швидкість, прискорення, гармоніка, тригонометричний ряд, перетворення Фур'є.

## Abstract

### Study of the dynamics of the combined coulter

V.I. Melnik, Al-Ftihat Mousab Abdulwahid Mohamed, R.V. Antoshchenkov

A comparison is made of the dynamics of multiple design options combined coulter. Proposed opener enables simultaneous seeding row crops and seed tape after the subsurface application of herbicides. From the series opener, he is characterized by a rear mounted lancet extension. We consider several options lancet extension coulter, which differ by the presence and installation of coverers. Studied the dynamics of questions compared structures. The basis of practical and experimental studies on the method of partial acceleration. For representation of the experimental data used in analytical form trigonometric series. Their parameters are determined using the methods of direct Fourier transform and successive approximation. The algorithm of the recovery line travel opener using the method of successive approximations. A comparison of the Fourier method and successive approximation with respect to the problem of reconstructing the trajectory of coulter. The advantages and disadvantages of the method of successive approximation, which is recommended for use to restore order on line coordinates germinating plants. In order to compare the stability of experimental the working stroke coulters equipped lancet extensions, use the standard deviation of the horizontal angle of rotation of the opener to the vertical axis and the standard deviation of the depth control coulter of the mean. It is shown that the combined coulter embodiment of the lancet extension opener, which coverers are installed asymmetrically, has performance stability working stroke, comparable to the control, according to which the coulter is factory construction.

**Key words:** coulter, path, line order, amplitude, relative frequency, wavelength range, velocity, acceleration, harmonica, trigonometric series, Fourier transform.

Представлено: А.Т.Лебедев / Presented by: A.T.Lebedev

Рецензент: М.А.Подригайло / Reviewer: M.A.Podrigajlo

Подано до редакції / Received: 15.10.2014