

# ПРОГРАММИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

## PROGRAMMING THE TRAJECTORIES OF MACHINE-TRACTOR UNITS

**А.Т. КАЛЮЖНЫЙ**, к.т.н.  
**Ю.А. ГУСЬКОВ**, д.т.н.  
**А.А. ДОЛГУШИН**, к.т.н.  
Новосибирский ГАУ, Новосибирск, Россия  
atik102@mail.ru

**A.T. KALYUZHNYJ**, PhD in Engineering  
**YU.A. GUS'KOV**, DSc in Engineering  
**A.A. DOLGUSHIN**, PhD in Engineering  
Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russia,  
atik102@mail.ru

Для автоматического вождения МТА возможные программы движения необходимо закладывать в систему автовождения на этапе проектирования, а перед началом работы конкретизировать настройками. Качество автоматического вождения определяется техническим уровнем системы автовождения, составной частью которой является система координат. Распространенное мнение о программировании траектории следом предыдущего прохода МТА является ошибочным – след является координатной линией, используемой для привязки требуемой траектории к местности. Возможны различные способы задания систем координат, из которых наиболее перспективным является задание стационарными линейными ориентирами в виде подземных токонесущих проводов. Такие системы обладают высокой четкостью, универсальностью, автономностью ориентиров, помехоустойчивостью, долговременной стабильностью. Для реализации всех достоинств систем координат, задаваемых подземными токонесущими проводами, место нахождения МТА следует определять двухточечным разностно-амплитудным методом по проекции вектора напряженности магнитного поля на поперечную ось трактора или одноточечным двухуровневым амплитудно-фазным методом. Высокую точность программирования обеспечивает выполнение токонесущих проводов коммутируемыми, питание смежных проводов встречными токами и создание навигационного магнитного поля токами трех смежных проводов, из которых рабочим является средний. Высокая четкость ориентиров и помехозащищенность алгоритмов позволяет определять не только тракторное рассогласование, но и направление продольной оси трактора и направление вектора скорости. Введение этих параметров в закон управления рулевым механизмом позволяет повысить устойчивость систем автовождения и точность управления траекториями рабочих органов технологических машинорудий.

*Ключевые слова:* программирование траекторий, направляющая поверхность, магнитная индукция, автовождение тракторных агрегатов, система координат.

The control of trajectories of self-propelled agricultural vehicles and machine and tractor units (MTU) is carried out according to certain programs stored in memory of the tractor driver or in the system of autonomous driving. In the tractor driver's memory, the programs are laid down at the stage of studying and mastering the specialty, and are specified when receiving a task to perform a specific job. A common opinion about programming a trajectory following a previous MTU passage is erroneous as the trace is the coordinate line used to bind the desired trajectory to the terrain. The quality of trajectory driving depends on the tractor's driver, his experience and qualification but not the system of coordinates. Similarly, for autonomous driving of MTU the possible driving programs must be put into the autonomous system at the design stage, and be specified with settings before work start. The quality of autonomous driving is defined by technological level of a system of autonomous driving, which integral part is the coordinate system. There are various ways to define system of coordinates. The most promising of them is to stationary reference points in the form of underground current-carrying wires. Such systems have the high definition, universality, autonomous waymarks, noise stability and long-term stability. To realize all the advantages of coordinates systems set by underground current-carrying wires it is necessary to determine the location of MTU by point-to-point differential and amplitude method by a projection of magneto-field vector to a cross axis of the tractor or a single-point two-level amplitude and phase method. High programming accuracy is achieved by means of current-carrying wires made by commutable ones, power supply of adjacent wires by counter currents and creation of navigation magnetic field by currents of three adjacent wires, where the middle wire is a contact line. The high definition of the guidelines and the noise immunity of the algorithms allow determining both the path mismatch and the direction of the longitudinal axis of the tractor and the direction of the velocity vector as well. Introduction of these parameters into the control law of steering mechanism allows increasing the stability of systems of autonomous driving and accuracy of trajectories control of working bodies of technological machine tools.

*Keywords:* programming of trajectories, directing surface, magnetic induction, auto driving of tractor units, system of coordinates.

## Введение

Роботизация самоходных сельскохозяйственных машин и машинно-тракторных агрегатов (МТА), т.е. автоматизация на уровне, обеспечивающем выполнение полевых работ без непосредственного участия тракториста-машиниста, может существенно повысить эффективность растениеводства, ликвидировать тяжелый труд механизаторов на поле, оптимизировать технико-эксплуатационные параметры МТА с целью снижения машинной деградации почвы и повышения топливной экономичности. Но реализация этих возможностей станет доступной при условии автоматизации всех функций, выполняемых трактористом на поле, из которых наиболее сложной является автоматизация управления траекторией движения МТА на гоне и поворотной полосе.

Управление пространственно-временной траекторией технических и биологических объектов изучает навигация – наука о методах и средствах определения параметров движения и управления движением. Параметрами движения являются координаты требуемого и фактического места нахождения объекта, его пространственная ориентация, направление и величина линейной скорости перемещения, угловые скорости и ускорения, время движения, пройденный путь. В зависимости от вида объекта и условий движения, требуется измерение разных параметров, но обязательными являются координаты требуемого и фактического места нахождения, необходимые для формирования сигнала тракторного рассогласования и управления вектором скорости объекта управления.

Навигация решает вопросы управления движением конкретных объектов в конкретных условиях. Технические решения, оптимальные для одних объектов или условий движения, могут быть непригодными для других. В растениеводстве нужны решения, обеспечивающие программирование требуемых и определение фактических траекторий МТА с точностью до 1–2 см, никакие другие объекты не требуют такой точности.

## Цель исследований

Разработка рекомендаций по поиску технических решений роботизации МТА для растениеводства.

## Материалы и методы

Управление движением МТА включает три этапа [1, с. 5]:

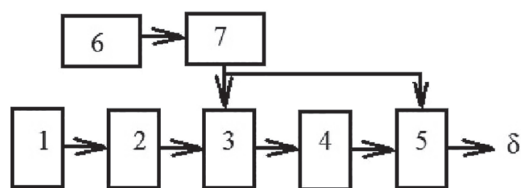
- программирование требуемой траектории;
- определение фактического места нахождения МТА и формирование сигнала тракторного рассогласования;
- преобразование сигнала тракторного рассогласования в команды управления рулевым механизмом трактора, снижающие тракторное рассогласование.

Принято считать, что при ручном управлении тракторист использует в качестве программы движения след предыдущего прохода или предыдущей операции, например борозду или рядок растений [2, с. 74; 3, с. 65]. Поэтому такой след можно использовать в качестве программной траектории при автоматическом управлении движением [4, с. 5].

В действительности при ручном управлении программа движения находится не на поле, а известна трактористу, обладающему необходимыми знаниями и опытом мысленного программирования требуемых траекторий. В процессе движения тракторист использует след на земле в качестве координатной линии для «привязки» программы к местности. Пользуясь координатной линией, тракторист определяет тракторное рассогласование и принимает решение о необходимости корректировки траектории. Один и тот же след может использоваться при реализации разных программ, формируемых трактористами разной квалификации или управляющих разными МТА.

Функции линейного следа, как координатной линии, не меняются при замене интеллектуального труда тракториста работой навигационного устройства местоопределения. Функциональная схема формирования сигнала  $\delta$  тракторного рассогласования таким устройством показана на рис. 1.

С помощью физических ориентиров  $I$  задается система координат  $OXYZ$ , ось  $OX$  которой совпадает с требуемым направлением движения МТА, т.е. с направлением гона. Направляющая поверхность  $3$  представляет совокупность геометрических мест нахождения ведущей точки трактора [5, с. 14], при которых выходное напряжение чувствительного элемента  $4$  не создает сигнала тракторного рассогласования  $\delta$  на выходе устройства местоопределения. Форма и место нахождения направляющей поверхности  $3$  зависит одно-



**Рис. 1. Функциональная схема формирования сигнала траекторного рассогласования:**

- 1 – ориентир, осуществляющий привязку системы координат к местности; 2 – система координат; 3 – направляющая поверхность, программирующая траекторию МТА; 4 – чувствительный элемент датчика траекторного рассогласования; 5 – усилительно-вычислительное устройство; 6 – задатчик траектории; 7 – алгоритм формирования сигнала траекторного рассогласования

временно от системы координат 2 и алгоритма 7 формирования сигнала рассогласования. Наладка программы осуществляется задатчиком 6 исходных данных алгоритма.

Фактическая траектория МТА определяется направляющей поверхностью 3, которая в общем случае является геометрическим местом точек, расстояние до которых измеряется чувствительным элементом 4 датчика траекторного рассогласования. Выходное напряжение датчика поступает на вход усилительно-вычислительного устройства 5, с выхода которого снимается сигнал  $\delta$  траекторного рассогласования.

Габаритные размеры МТА значительные, и его отдельные точки перемещаются по разным траекториям. Поэтому программируется и контролируется траектория только одной – «ведущей» – точки, которая совпадает с чувствительным элементом либо находится за пределами МТА [6, с. 45]. Совокупность возможных мест нахождения ведущей точки, соответствующих нулевому сигналу траекторного рассогласования, образует направляющую поверхность. Линия пересечения этой поверхности горизонтальной плоскостью, в которой расположена ведущая точка, является «направляющей линией», описывающей кинематическую траекторию МТА. Представление о программировании траектории одновременно на местности и на МТА [3] справедливо лишь постольку, поскольку направляющая поверхность зависит от системы координат на местности и от алгоритма формирования сигнала траекторного рассогласования устройством местоопределения МТА.

### *Системы координат сельскохозяйственной навигации*

Возможны различные варианты задания систем координат; для программирования траекторий МТА на гоне практическое применение имеют два варианта:

- двумя и более удаленными «опорными» точками;
- непрерывной или прерывистой линией по всей длине гона.

В работе С.П. Гельфенбейна [3, с. 123] «следовое» местоопределение относительно следа предыдущего прохода и «координатное» – относительно удаленных точек – противопоставляются. В действительности никакого противопоставления между ними нет – существует различие в типах ориентиров, используемых для привязки систем координат к местности, но не в принципах формирования сигнала траекторного рассогласования.

Линейные ориентиры в виде физических линий могут совпадать с геометрическими направляющими линиями при условии, что устройство местоопределения оборудовано механическим датчиком, чувствительный элемент которого копирует линейный ориентир.

Физическим явлением, используемым механическими датчиками, является силовое воздействие ориентира на чувствительный элемент, которое может вызывать нарушение контакта и потерю ориентира. Более высокой технологической надежностью обладают устройства местоопределения с бесконтактными датчиками, чувствительный элемент которых реагирует на электромагнитную или акустическую энергию, излучаемую или отражаемую линейными ориентирами.

Линейные ориентиры в виде следа одного из предыдущих проходов МТА не обладают универсальностью и долговечностью, поэтому малопригодны в качестве основных для роботизированных МТА без человека. Однако могут находить применение в качестве дополнительных при возделывании пропашных культур, когда определение местоположения ведущей точки МТА относительно направляющей поверхности не гарантирует необходимой слитности траекторий рабочих органов технологических машин-орудий вследствие искривления предыдущего прохода динамическими возмущениями.

Более высокой технологической надежностью обладают специально создаваемые стаци-

онарные ориентиры, не зависящие от проходов МТА, например, в виде подземных токонесущих проводов [2, 3, 9, 10]. Такие ориентиры обладают всеми необходимыми качествами: четкостью, универсальностью, автономностью, стабильностью, долговечностью, помехоустойчивостью. Для обнаружения подземных проводов используется физическое явление магнитной индукции, сущность которого заключается в появлении электрического напряжения на выходе катушки индукционного преобразователя при изменении магнитного потока через витки катушки. При движении МТА катушка перемещается над проводом и ее выходное напряжение реагирует на миллиметровые отклонения от провода, что обеспечивает точность, недостижимую другими средствами. Гоновые провода укладываются по всей длине гона с шагом до 10–15 метров, который ограничивается конструктивными соображениями.

Подземные провода могут питаться токами с частотой до нескольких килогерц. Увеличение частоты до сотен мегагерц позволяет заменить подземные провода антеннами удаленных коротковолновых радиопередатчиков и создавать системы координат средствами радионавигации. В качестве примера на рис. 2 показано задание прямоугольной системы координат OXYZ опорными точками 1 и 2, расположенными на расстоянии  $2b$  друг от друга, например, на поворотной полосе. По величине расстояний  $r_1$  и  $r_2$  между МТА и опорными точками можно вычислять боковое смещение  $y$  МТА относительно плоскости XOZ, проходящей перпендикулярно отрезку  $2b$  через его середину [7, с. 197]:

$$y = \frac{r_1^2 - r_2^2}{4b}.$$

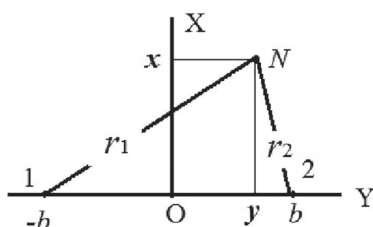


Рис. 2. Задание системы координат OXYZ опорными точками 1 и 2

В рассматриваемом примере траектория программируется геометрическим местом точек, для которых  $y = y_0$ , где  $y_0$  – наперед заданное значение, программирующее траекторию конкретного прохода МТА. Переход на смежный проход осуществляется изменением значения  $y_0$  на ширину захвата МТА. Алгоритм местоопределения, то есть формирования сигнала  $\delta$  траекторного рассогласования, для  $n$ -го прохода описывается уравнением:

$$\delta = \frac{r_1^2 - r_2^2}{4b} - (n-1)y_0, \quad (1)$$

где  $n$  – порядковый номер прохода, считая от плоскости XOZ.

Алгоритм местоопределения при движении по криволинейной траектории:

$$\delta = \frac{r_1^2 - r_2^2}{4b} - (n-1)y_0 \pm y(x),$$

где  $y(x)$  – программа изменения траектории по длине гона.

Радионавигационные опорные точки 1 и 2 можно расположить непосредственно на поле, что обеспечит автономность и универсальность системы координат, но не обеспечит необходимой точности вследствие зависимости скорости распространения радиоволн в приземном слое от состояния почвы, растительности, воздуха, отражений радиосигналов. Более высокую точность обеспечивают спутниковые агронавигаторы, использующие опорные точки на навигационных спутниках и корректирующие RTK-станции [8]. Однако спутниковые агронавигаторы не обладают необходимой автономностью, так как их работоспособность зависит не только от навигационных спутников, но и от станций слежения за спутниками, нарушения в работе которых может вызвать нарушения в своевременности выполнения полевых работ автоматическими МТА со спутниковыми агронавигаторами.

Таким образом, наиболее высокую технологическую надежность систем автовождения обеспечивают только системы координат, задаваемые стационарными линейными ориентирами в виде подземных проводов. Однако, как показал опыт создания таких систем во второй половине прошлого столетия, их недостатком является непредсказуемость фактических траекторий, которая наблюдалась при натурных испытаниях в поле.

## Результаты и обсуждение

### Программирование траекторий индукционными методами

Для выяснения и устранения причин несоответствия фактических траекторий с требуемыми рассмотрим местоопределение амплитудно-фазным методом, который использовали при проведении испытаний и алгоритм которого описывается уравнением [11, с. 113]:

$$\delta \equiv H_z = H \cos \psi = \frac{I}{2\pi} \frac{y}{y^2 + z^2}, \quad (2)$$

где  $H_z$  – проекция вектора напряженности на вертикальную ось  $OZ$  системы координат, (рис. 3);  $H = \frac{I}{2\pi r}$  – модуль вектора напряженности,  $\psi$  – угол наклона вектора напряженности к оси  $OZ$ ;  $I$  – ток провода;  $r = \sqrt{y^2 + z^2}$  – расстояние между проводом и датчиком траекторного рассогласования (индукционным преобразователем);  $y$  и  $z$  – прямоугольные координаты индукционного преобразователя в неподвижной системе координат  $OXYZ$ , ось  $OX$  которой совмещена с проводом, а  $OZ$  направлена вертикально.

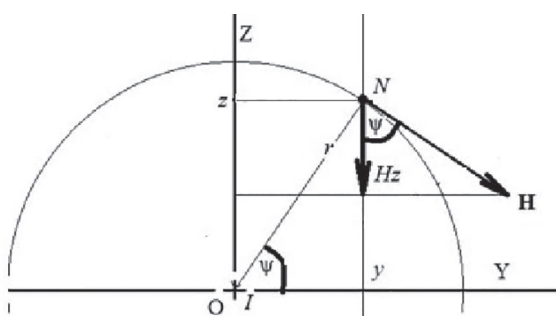


Рис. 3. Магнитное поле тока  $I$

Зависимость проекции  $H_z$  от координаты  $y$  для прямолинейного провода длиной 1000 м при  $z = 1,5$  м приведена на рис. 4.

Точкам направляющей поверхности соответствует условие  $H_z = 0$ . Уравнение (2) и график на рис. 4 показывают, что для одиночного провода это условие соблюдается при  $y = 0$ . Если токи протекают по двум и более проводам, то значение  $H_z$  при  $y = 0$  равно алгебраической сумме помех, создаваемых токами других проводов. В результате точка с  $H_z = 0$ , принадлежащая направляющей поверхности, смещается относительно рабочего провода на некоторое расстояние. Так, если ток протекает по двум проводам, расстояние между которыми  $B = 10$  м, то, как это видно на рис. 4,

величины  $H_z$  обоих проводов уравниваются на расстоянии  $\approx 0,2$  м от провода. Поэтому фактические траектории будут смещены относительно обоих проводов на 0,2 м в ту или другую сторону в зависимости от направленности токов – однонаправленные (синфазные) или встречные (противофазные).

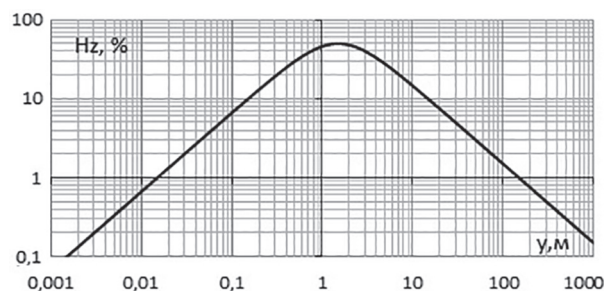


Рис. 4. Зависимость вертикальной составляющей вектора напряженности  $H_z$  бесконечного провода от координаты  $y$  точки наблюдения при  $z = 1,5$  м

Зависимость смещения точек направляющей поверхности от высоты  $z$  индукционного преобразователя над плоскостью проводов и расстояния  $2b$  между двумя проводами можно определить математически. Для этого необходимо приравнять к нулю алгебраическую сумму напряженностей, создаваемых противофазными (+) или синфазными (-) токами обоих проводов:

$$\delta = H_{z1} + H_{z2} \equiv \left( \frac{y+b}{(y+b)^2 + z^2} \pm \frac{y-b}{(y-b)^2 + z^2} \right) = 0.$$

Откуда получим уравнение линии сечения направляющей поверхности плоскостью  $ZOY$ :

$$y = \pm \sqrt{b^2 \pm z^2}.$$

Так, в рассмотренном примере  $2b = 10$  м,  $z = 1,5$  м, поэтому  $y_{1,2} = \pm 5,22$  м,  $y_{3,4} = \pm 4,78$  м.

График на рис. 4 показывает, например, что ток провода, удаленного на 100 м, смещает направляющую линию на 0,02 м. Это наблюдается на низких частотах, при которых можно пренебречь влиянием электропроводимости земли. На более высоких частотах происходит затухание  $H_z$  вследствие превращения энергии переменного магнитного поля в тепловую энергию нагрева грунта. Оценить степень затухания не представляется возможным, что делает фактические траектории МТА непредсказуемыми.

Устранить влияние магнитных полей, создаваемых токами нерабочих проводов, можно, выполнив провода коммутируемыми и питая ток только один рабочий провод. В середине прошлого века такое решение представляло сложную техническую задачу, поэтому не рассматривалось, но в настоящее время не вызывает затруднений.

Выполнение проводов коммутируемыми не устраняет вредного воздействия магнитного поля, создаваемого током обратного провода, замыкающего цепь тока. Устранить этот недостаток можно, используя землю для замыкания цепи тока. Это требует применения заземляющих устройств, что повысит трудоемкость укладки проводов, приведет к зависимости сопротивления токовой цепи и силы тока от электропроводимости земли.

Менее трудоемкие в изготовлении и более стабильные в работе индукторы без заземлителей. Электрическая схема коммутируемого индуктора «многолучевая звезда» показана на рис. 5. Гоновые провода индуктора подключаются к магистральным через коммутаторы таким образом, что токи в смежных проводах протекают встречно. Для создания системы координат следует замкнуть ключи 3-х смежных проводов, из которых рабочим является средний. Так, при замыкании ключей проводов № 5, 6, 7 рабочим является провод 6, а обратными провода 5 и 7. Однонаправленные токи проводов 5 и 7 создают над проводом 6 равные встречные магнитные поля, которые взаимно уничтожаются.

Магнитное поле, создаваемое токами проводов 5, 6 и 7, равно векторной сумме магнитных полей, создаваемых встречными токами двух петель, образованных проводами 5–6 и 6–7, что позволяет называть такой источник магнитного поля «двойной петлей». Распределение напряженности по ширине двойной петли  $2 \times 10$  м показано на рис. 6.

На рис. 7 приведены графики напряженностей  $H_z$ , создаваемых током одиночного провода и двойной петли  $2 \times 10$  м при  $z = 1,5$  м. Графики показывают, что взаимное смещение направляющих поверхностей двух проводов, расстояние между которыми, например, 30 м, равно 0,08 м, а взаимное смещение направляющих поверхностей средних проводов двойных петель, при том же расстоянии между ними, – 0,01 м. Увеличение расстояний с 30 до 60 м снижает смещение одиночных проводов

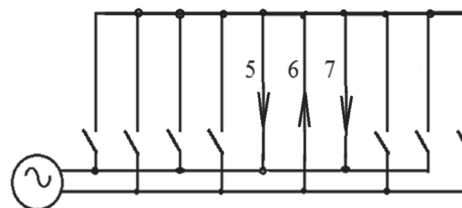


Рис. 5. Электрическая схема индуктора «многолучевая звезда»

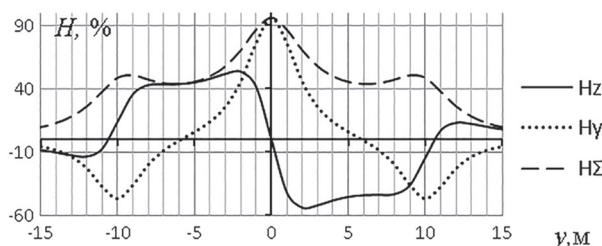


Рис. 6. Суммарное магнитное поле трех проводов при  $B = 10$  м,  $z = 1,5$  м

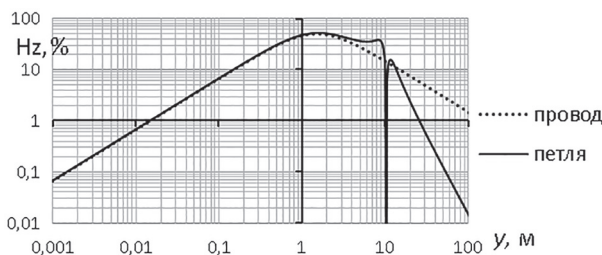


Рис. 7. Затухание модуля напряженности  $H_z$  одиночного провода и двойной петли  $1000 \cdot (2 \cdot 10)$  м при  $z = 1,5$  м

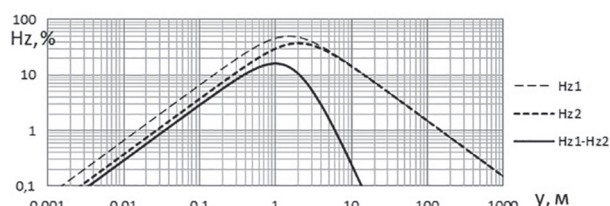
до 0,035 м, а двойных петель – до 0,001 м. Последнее решает проблему электромагнитной совместимости нескольких роботизированных МТА, работающих на одной частоте магнитного поля, если расстояние между ними превышает несколько десятков метров.

Коммутация проводов должна происходить при выходе МТА на поворотную полосу, что требует наличия канала связи между МТА и коммутаторами, усложняет эксплуатацию индуктора. Более просты в эксплуатации индукторы без коммутации, с одновременным питанием всех или значительного количества гоновых проводов. При этом устранить или значительно ослабить мешающее влияние магнитных полей нерабочих проводов можно вычитанием помех из суммарного сигнала помех и рабочего провода.

Как показывает уравнение (2), величина  $H_z$  по-разному зависит от координаты  $z$ : обратно-пропорциональна квадрату  $z$  при  $y \approx 0$  и практически не зависит от  $z$  при  $y \gg z$ . Это позво-

ляет существенно ослабить влияние помех, формируя сигнал траекторного рассогласования  $\delta$  как разность двух сигналов, сформированных при одинаковом значении координаты  $y$ , но разных значениях координаты  $z$ .

На рис. 8 показана зависимость напряженности магнитного поля от расстояния  $y$  до тока при  $z_1 = 1,5$  м и  $z_2 = 2$  м, а также разность этих составляющих. Как видно, при  $y = 10$  м,  $z_1 = 1,5$  м и  $z_2 = 2$  м смещение направляющих поверхностей 0,22 м и 0,41 м. Но если направляющую поверхность формировать по разности напряженностей, измеренных при  $z_1$  и  $z_2$ , то смещение такой поверхности менее 0,01 м при том же  $y = 10$  м.



**Рис. 8.** Зависимость вертикальной составляющей напряженности магнитного поля от расстояния  $y$  до источника и высоты  $z$  точки измерения

Результаты вычисления смещения направляющих поверхностей 10-проводного индуктора при расстоянии между проводами  $B = 7$  м и  $z_1 = 1,5$  м,  $z_2 = 2$  м приведены в таблице.

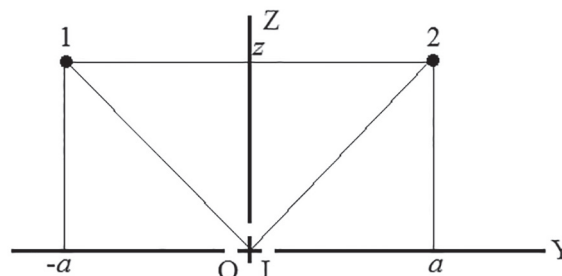
Рис. 3 показывает, что проекция вектора напряженности на поперечную ось  $OY$  системы координат описывается уравнением:

$$H_y = H \sin \psi = \frac{I}{2\pi} \frac{z}{y^2 + z^2}$$

и при  $y \gg z$  обратно пропорциональна квадрату расстояния  $y$  до провода. Поэтому  $H_y$  затухает значительно быстрее, чем  $H_z$ . Следовательно, построение направляющей поверхности с помощью проекции вектора напряженности на ось  $OY$  позволит снизить влияние удаленных проводов на форму направляющей поверхности. Алгоритм местоопределения относительно такой направляющей поверхности:

$$\delta = H_{y1} - H_{y2} = \frac{I}{2\pi} \left( \frac{z}{(y-a)^2 + z^2} - \frac{z}{(y+a)^2 + z^2} \right), \quad (3)$$

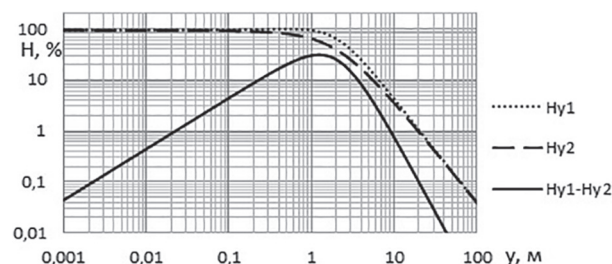
где  $2a$  – расстояние между точками измерения напряженности (рис. 9).



**Рис. 9.** Положение точек 1 и 2 измерения напряженности относительно токонесущего провода в точке O

На рис. 10 показана зависимость составляющих алгоритма (3) от координаты  $y$  середины измерительной базы при  $2a = 1$  м,  $z = 1,5$  м.

Сравнение графиков на рис. 8 и 10 показывает, что качество местоопределения двухуровневым и двухточечным методами примерно одинаковое. Более того, оба метода могут быть реализованы одним устройством: для перехода от одного алгоритма к другому достаточно повернуть измерительную базу в плоскости  $YOZ$  на  $90^\circ$  и отрегулировать расстояние между индукционными преобразователями.



**Рис. 10.** Составляющие разностно-амплитудного метода местоопределения по проекции вектора напряженности на поперечную ось при  $2a = 1$  м,  $z = 2$  м

Таблица

Смещения направляющих поверхностей 10-проводного индуктора

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$y, \text{ м}$	0	7	14	21	28	35	42	49	56	63
$\Delta y, \text{ м}$	-0,014	0,0017	0	0	0	0	0	0	-0,0017	0,014

### *Измерения в полярной системе координат*

Программирование траекторий выполняется в неподвижной системе координат; при этом определение фактического места нахождения МТА возможно в неподвижной и подвижной системах. Так, независимо от места формирования сигнала тракторного рассогласования, местоопределение, согласно алгоритму (1), осуществляется в неподвижной системе координат. Если система задана линейными ориентирами по всей длине гона, то определять местоположение МТА можно в подвижной системе координат, начало которой расположено на МТА, а ось  $Ox$  параллельна продольной оси трактора. Как правило, при этом измеряется полярная координата – полярный угол.

Различие между местоопределением в неподвижной и подвижной системах координат состоит в том, что в первом случае сигнал рассогласования зависит только от места нахождения датчика рассогласования и не зависит от его пространственной ориентации в горизонтальной плоскости. Во втором случае устройство местоопределения реагирует как на место, так и на пространственную ориентацию датчика, поворот которого вокруг вертикальной оси изменяет сигнал тракторного рассогласования. Поэтому местоопределение амплитудно-фазным методом происходит в неподвижной системе координат, а определение угловой ошибки тракторного управления – курсового угла  $\alpha$  – в подвижной полярной системе:

$$\alpha = \frac{d\delta}{ds} = \frac{1}{V} \frac{d\delta}{dt},$$

где  $\alpha$  – угол между требуемым направлением и вектором скорости МТА;  $V$  – скорость линейного перемещения МТА;  $t$  – время.

В полярной системе координат определяется угол бокового скольжения  $\chi$ , измеряемый между продольной осью и вектором линейной скорости трактора. При отсутствии угловой погрешности угол бокового скольжения можно измерять непосредственно по величине проекции вектора напряженности на продольную ось трактора:

$$\chi \equiv H_x = H \sin \chi.$$

Для измерения угла  $\chi$  можно использовать одноуровневое амплитудно-фазное устройство

местоопределения, расположив ось индукционного преобразователя параллельно продольной оси трактора.

### **Заключение**

1. Траектория МТА программируется в неподвижной прямоугольной системе координат уравнением, описывающим зависимость боковой координаты точек направляющей поверхности от продольной и вертикальной координаты. Система координат задается вещественными ориентирами; уравнение является алгоритмом формирования сигнала тракторного рассогласования.

2. Измерение координат фактической траектории возможно в неподвижной и подвижной прямоугольных системах координат, а также в подвижной полярной системе.

3. Системы координат должны обладать четкостью, долговременной стабильностью, автономностью, универсальностью, помехоустойчивостью, экономичностью. Этим требованиям удовлетворяют стационарные системы координат, задаваемые подземными токонесущими проводами.

4. Плоские вертикальные направляющие поверхности можно создавать несколькими способами:

- питая током только один (рабочий) провод;
- питая током три смежных провода с противофазными токами, из которых рабочим является средний;
- формируя сигнал тракторного рассогласования двухуровневым методом;
- формируя сигнал рассогласования разностно-амплитудным методом по величине проекции вектора напряженности магнитного поля на поперечную ось трактора.

5. Системы координат, задаваемые токонесущими проводами, позволяют определять направление продольной оси трактора в горизонтальной плоскости непосредственно по проекции вектора напряженности на эту ось. Что необходимо для приведения сигнала тракторного рассогласования к рабочим органам технологических машин-орудий.

6. Системы координат, задаваемые подземными токонесущими проводами, позволяют определять направление вектора скорости МТА дифференцированием сигнала тракторного рассогласования по линейному перемещению. Это необходимо для повышения устойчивости систем автоматического вождения МТА.



## Литература

1. Помыкаев И.И., Селезнев В.П., Дмитроченко Л.А. Навигационные приборы и системы: учеб. пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1983. 456 с.
2. Литинский А.С. Автоматизация вождения самоходных машин (автоводители). М.-Л.: Энергия. 144 с.
3. Гельфенбейн С.П. Терранавигация. М.: Колос, 1981. 204 с.
4. Селезнев В.П., Селезнева Н.В. Навигационная бионика. М.: Машиностроение, 1987. 256 с.
5. Калоев А.В. Основы проектирования систем автоматического вождения самоходных машин. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
6. Маргвелашвили О.В. Автовожделение трактора с помощью фотооптической системы управления. Тбилиси: Мецниереба, 1974. 126 с.
7. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника; перевод с англ. под ред. К.Н. Трофимова. М.: Советское радио. 1978. Т. 4. 375 с.
8. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения. М.: Эко-Трендз, 2003. 326 с.
9. Вулах Г.Я., Тимошенко В.С., Школьников С.В., Курченков В.И. Автоматические и дистанционное управление промышленными тракторами. М.: ЦНИИТЭИ тракторосельхозмаш, 1972. 84 с.
10. Клейн Ю.К. Развитие автоматического вождения тракторных агрегатов за рубежом. М.: ЦНИИТЭИ тракторосельхозмаш, 1972. 67 с.
11. Калужный А.Т. Электронавигация сельскохозяйственная индукционная / Новосибир. гос. аграр. ун-т. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2015. 176 с.
2. Litinskij A.S. Avtomatizaciya vozhdeniya samohodnyh mashin (avtovoditeli) [Automation of driving self-propelled vehicle (autonomous driving)]. Moscow – Leningrad: Energiya Publ., 144 p.
3. Gel'fenbejn S.P. Terranavigaciya [Terranavigation]. Moscow: Kolos Publ., 1981. 204 p.
4. Seleznev V.P., Selezneva N.V. Navigacionnaya bionika [Navigation bionics]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987. 256 p.
5. Kalojev A.V. Osnovy proektirovaniya sistem avtomaticheskogo vozhdeniya samohodnyh mashin [Fundamentals of designing the automatic driving systems for self-propelled vehicles]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 152 p.
6. Margvelashvili O.V. Avtovozhdenie traktora s pomoshch'yu fotoopticheskoy sistemy upravleniya [Tractors autonomous driving using a photo-optical control system]. Tbilisi: Mecniereba Publ., 1974. 126 p.
7. Spravochnik po radiolokacii [Radar reference]. Pod red. M. Skolnika. Perevod s ang. pod red. K.N. Trofimova. T.4. Moscow: Sovetskoe radio Publ. 1978. 375 p.
8. Solov'yov YU.A. Sputnikovaya navigaciya i eyo prilozheniya [Satellite navigation and its applications]. Moscow: Eko-Trendz Publ., 2003. 326 p.
9. Vulah G. YA., Timoshenko V.S., Shkol'nikova S.V., Kurchenkov V.I. Avtomaticheskie i distancionnoe upravlenie promyshlennymi traktorami [Automatic and remote control of industrial tractors]. Moscow: CNIITEI traktorosel'hozmash Publ., 1972. 84 p.
10. Klejn YU.K. Razvitie avtomaticheskogo vozhdeniya traktornyh agregatov za rubezhom [The development of autonomous driving of tractor units abroad]. Moscow: CNIITEI traktorosel'hozmash Publ., 1972. 67 p.
11. Kalyuzhnyj A.T. Elektronavigaciya sel'skohozyajstvennaya indukcionnaya [Induction agricultural electric navigation]. Novosib. gos. agrar. un-t. Novosibirsk: IC NGAU «Zolotoj kolos» Publ., 2015. 176 p.

## References

1. Pomykaev I.I., Seleznev V.P., Dmitrochenko L.A. Navigacionnye pribory i sistemy [Navigation devices and systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 456 p.