

АВТОВОЖДЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАКТОРОВ

Калюжный А.Т.

Новосибирский государственный аграрный университет, г.Новосибирск

Ключевые слова: электронавигация, беспилотный трактор, безлюдная технология, система автовождения, местоопределение, навигационный индуктор.

Аннотация. Обоснована актуальность автоматизации сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов, обеспечивающая выполнение полевых работ без участия тракториста. Показана роль систем координат и обоснован способ их привязки к местности при помощи подземных токонесущих проводов. Выполнен анализ точности программирования требуемых и определения фактических траекторий индукционными методами. Приведена методика расчета индукционных устройств местоопределения повышенной точности, сообщается о составе экспериментального образца индукционной системы автовождения самоходных сельскохозяйственных машин и агрегатов.

AUTOMATIC DRIVING OF UNMANNED TRACTORS

Kaluzhnyi A.T.

Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk

Keywords: electric navigation, unmanned tractors, unmanned technology, automatic driving, position finding, navigating inductor.

Abstract. The urgency of automation of agricultural machine-tractor units for field work without the participation of a tractor driver is substantiated. The role of coordinate systems is shown and the method of linking them to the terrain with the help of underground current-carrying wires is substantiated. The analysis of the accuracy of programming the required trajectories and determining the actual ones by induction methods is carried out. The method for calculating induction positioning devices of increased accuracy is presented. Reports on the composition of an experimental model of an induction system for autonomous driving of self-propelled agricultural machines and units.

Актуальность темы

Применение в растениеводстве тракторов большой мощности способствует повышению производительности труда трактористов и сокращению сроков выполнения полевых работ, но сопровождается усилением машинной деградации почвы и снижением её плодородия [1], делает труд трактористов более напряженным и утомительным [2], снижает топливную экономичность машинно-тракторных агрегатов (МТА) [3].

Известен альтернативный путь повышения производительности труда трактористов, не требующий применения тяжелых тракторов большой мощности. Он заключается в автоматизации МТА на уровне, обеспечивающем выполнение полевых работ без непосредственного участия человека. Что позволяет ликвидировать тяжелый и вредный для здоровья труд трактористов на поле, оптимизировать массу и рабочую скорость тракторов по критериям экологической безопасности и топливной экономичности, увеличивать производительность труда увеличением количества МТА, работающих под наблюдением одного диспетчера.

На поле тракторист решает разные задачи, требующие автоматизации. Из них наиболее сложной, препятствующей созданию тракторов-роботов, является управление траекторией движения МТА с точностью, соответствующей агротехническим требованиям на качество полевых работ.

Работы по решению задачи автовождения МТА продолжаются более ста лет; в настоящее время находят практическое применение системы автовождения со спутниковыми агронавигаторами. Такие системы существенно улучшают условия труда трактористов, делая его менее напряженным и утомительным, но не позволяют покидать кабину трактора вследствие низкой технологической надежности. Навигационные спутники удалены от МТА на 20 тыс. км, что делает системы автовождения с спутниковыми агронавигаторами сложными и дорогостоящими, а значения координат места нахождения МТА – вероятностными, не соответствующими фактическим.

Ниже приводится альтернативное решение проблемы определения точного местонахождения МТА, основанного на измерении расстояний ≈ 2 м.

Обоснование системы координат

Автоматизация управления траекторией включает решения 3-х задач:

- программирование требуемой траектории движения;
- формирование сигнала траекторного рассогласования, как разности между программируемой плановой траекторией и фактической;
- изменение направления движения МТА для снижения рассогласования.

Программирование траектории и формирование сигнала рассогласования осуществляются в местной системе координат OXYZ, ось OX которой параллельна требуемому направлению движения МТА, OZ направлена вертикально, а OY – в направлении траекторного рассогласования.

Известны только три способа привязки систем координат к местности:

- точкой и направлением;
- двумя точками;
- физической линией по всей длине траектории.

Точкой и направлением система координат задается оптическими средствами, например - лучом лазера. Вследствие большой длины гона, неровностей макрорельефа, влияния пыли и тумана этот способ непригодный для создания беспилотных тракторов.

Задание систем координат двумя точками применяется в радионавигации. Однако при наземном расположении навигационных точек точность местоопределения недопустимо низкая, так как в приземном слое скорость распространения радиоволн зависит от состояния растительного покрова и от влажности воздуха. Размещение навигационных точек на спутниках делает системы автовождения неавтономными, что несущественно при наличии человека в кабине трактора, но делает растениеводство заложником обстоятельств, не зависящих от механизаторов.

Задание систем координат физическими линиями в виде следа предыдущего прохода МТА применяется при ручном управлении траекторией движения. Храня в памяти программу движения, тракторист на основании собственных знаний и опыта мысленно формирует команды управления рулевым

механизмом трактора и мышечной силой реализует их. Эти же операции можно выполнять техническими средствами, однако следовые ориентиры систем координат не обладают необходимыми четкостью, контрастностью, долговечностью и универсальностью. Эти недостатки отсутствуют при задании систем координат стационарными физическими линиями, из которых наиболее удобными являются подземные токонесущие провода. Укладываемые на глубине до 1м, провода надежно защищены от повреждений и могут использоваться десятки лет [4, 5]. Интервал между проводами может достигать 10м и более, что снижает удельные затраты на провод до 2-3-х тыс. р./га. Укладка провода ножевым приспособлением на базе культиватора-глубококорыхлителя или чизельного плуга может выполняться механизаторами. Срок окупаемости затрат на укладку проводов составит 1-2 сезона при сроке службы проводов многие десятилетия.

Переменный ток создает электромагнитное поле, параметры которого зависят от расстояния до тока. Выделяют три зоны:

- зона индукции, распространяется на расстояние, равное длине электромагнитной волны;
- промежуточная зона, в диапазоне расстояний 1-3 длины волны;
- зона излучения, расстояния более 3-х длин волны.

Частота тока подземных проводов ограничивается затуханием тока по длине провода, поэтому не может превышать несколько десятков килогерц, что соответствует длине волны электромагнитного поля несколько километров. Расстояние между подземным проводом и магнитной антенной устройства местоопределения МТА около 2-х метров, что соответствует зоне индукции. При этом для измерений используется явление магнитной индукции, сущность которого заключается в появлении электрического напряжения на выводах электрической катушки - магнитной антенны - при изменении магнитного потока через витки катушки. Поэтому системы автовождения МТА, использующие токонесущие провода, получили название «индукционных», а систему подземных проводов, создающих навигационное магнитное поле, правомерно называть «навигационным индуктором».

Анализ индукционных систем автовождения МТА

Впервые явление магнитной индукции использовали для управления движением морских судов в годы Первой Мировой войны [6]; в сельском хозяйстве большие надежды на него возлагали в третьей четверти прошлого века, когда индукционные системы автовождения разрабатывались во многих странах мира. При этом большого успеха достигли ученые Редингского университета (Англия), разрабатывавшие систему Auto-track и планировавшие приступить к её серийному производству в 1972 году [7]. Однако система не нашла практического применения, что дало повод для сомнений и неверия в перспективность индукционных систем автовождения МТА.

Более глубокие теоретические исследования [8] показали, что для сомнений и неверия нет оснований, так как фактические возможности явления магнитной индукции для определения местоположения МТА известны недостаточно и не используются.

Принципиальным заблуждением всех создателей индукционных систем автовождения было убеждение, что подземные провода являются программой движения. А так как провода стационарные, то и программу движения изменить невозможно - МТА движутся по траекториям, определяемым конфигурацией проводов и не зависящим от желания людей.

В действительности провода только осуществляют привязку системы координат к местности, а программа движения хранится на МТА в виде алгоритма формирования сигнала траекторного рассогласования. Что позволяет, изменяя алгоритм, менять программы движения.

Магнитное поле линейного провода векторное, модуль вектора напряженности H одиночного провода описывается законом «полного тока»:

$$H = \frac{I}{2\pi r}, \quad (1)$$

где I - ток провода, r - расстояние между проводом и точкой наблюдения магнитного поля.

В прямоугольной системе координат $OXYZ$, ось OX которой совмещена с проводом, OZ направлена вертикально, а OY – в направлении траекторного рассогласования, проекции вектора напряженности на оси системы координат описываются уравнениями [8]:

$$H_x = 0; H_y = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{z}{z^2 + y^2}; H_z = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{y}{z^2 + y^2}. \quad (2)$$

В системе Auto-track сигнал траекторного рассогласования δ формировался «амплитудно-фазным» методом непосредственно по модулю и фазе проекции H_z , и принимал нулевое значение при $y = 0$ независимо от коэффициента передачи магнитной антенны и последующего усиления сигнала. Что является достоинством амплитудно-фазных устройств местоопределения.

Сигнал рассогласования δ удобно выражать в процентах к модулю напряженности (1) на расстоянии $r = z = \text{const}$ от провода. Для Auto-track:

$$\delta \equiv H_z = 100 \frac{H_z}{H} = 100z \cdot \frac{y}{z^2 + y^2}, \%. \quad (3)$$

Сигнал рассогласования δ отсутствует при $y = 0$, т.е. при расположении антенны непосредственно над проводом. При $y = z$ сигнал достигает максимального значения, равного 50 %. Дальнейшее увеличение координаты y уменьшает сигнал δ . Так, $\delta = 9,9\%$ при $y = 0,1z$ и $y = 10z$.

В системе Auto-track навигационный индуктор состоял из 8-проводных секций [7]; провода секций соединялись последовательно-петлеобразно в очередности 1-5-2-6-3-7-4-8-1. С помощью коммутатора электропитание подавалось только на ту петлю, вдоль которой перемещался трактор. Расстояние между проводами 5,5м, ширина петли 22м.

Подставив в (3) значения $z = 2$ м, $y = 22$ м = $11z$, определим, что уровень помехи, создаваемой обратным током второй стороны петли, составляет 9%. И смещает траекторию антенны относительно рабочей стороны петли на $0,09z$, что при $z = 2$ м соответствует смещению траектории МТА относительно провода на $\Delta y = 0,18$ м.

При движении МТА вдоль проводов №№ 1-4 расстояния между траекториями равны расстоянию между проводами, так как все траектории смещаются в одну сторону. При движении вдоль проводов №№ 5-8 траектории смещаются в противоположную сторону. Поэтому между траекториями проводов № 4 и № 5 образуется огрех шириной $0,18 \times 2 = 0,36\text{м}$. Аналогично между проводами № 8 и № 9 происходит перекрытие траекторий на $0,36\text{м}$. Что недопустимо, тем более что величина смещения зависит также от расстояния z между антенной и плоскостью петли, которое изменяется, например, при галопировании трактора.

Технический уровень разработки снижали также необходимость коммутации проводов, движение МТА по фиксированным петлеобразным траекториям, несовершенство средств электроники и механизма поворота трактора, релейный алгоритм формирования команд управления рулевым механизмом и др.

За прошедшие 50 лет техника ушла далеко вперед и предоставляет широкие возможности для автоматизации процесса управления траекторией МТА с помощью физического явления магнитной индукции.

Повышение точности местоопределения МТА

Сравнение значений H_z и H_y в (2) показывает, что при $y \gg z$ проекция H_z убывает пропорционально y , а H_y - пропорционально квадрату y , т.е. более быстро. Поэтому методы местоопределения по горизонтальной составляющей магнитного поля H_y более помехоустойчивые к магнитным полям удаленных проводов, чем методы местоопределения по H_z .

Помехоустойчивым является «разностно-амплитудный», т.е. дифференциальный, метод местоопределения по разности проекций H_y в двух точках с разностью координат $y_1 - y_2 = 2a = \text{const}$:

$$\delta \equiv H_{y1} - H_{y2} = 100z \left(\frac{1}{(y-a)^2 + z^2} - \frac{1}{(y+a)^2 + z^2} \right). \quad (4)$$

Зависимость сигналов δ от расстояния до провода при местоопределении методами (3) и (4) показана на рисунке 1 при $z = 2\text{м}$ и $2a = 0,7\text{м}$. Как видно, при $y = 20\text{м}$ и местоопределении методом (4) смещение траектории $0,002\text{м}$, что в 100 раз меньше смещения при местоопределении методом (3).

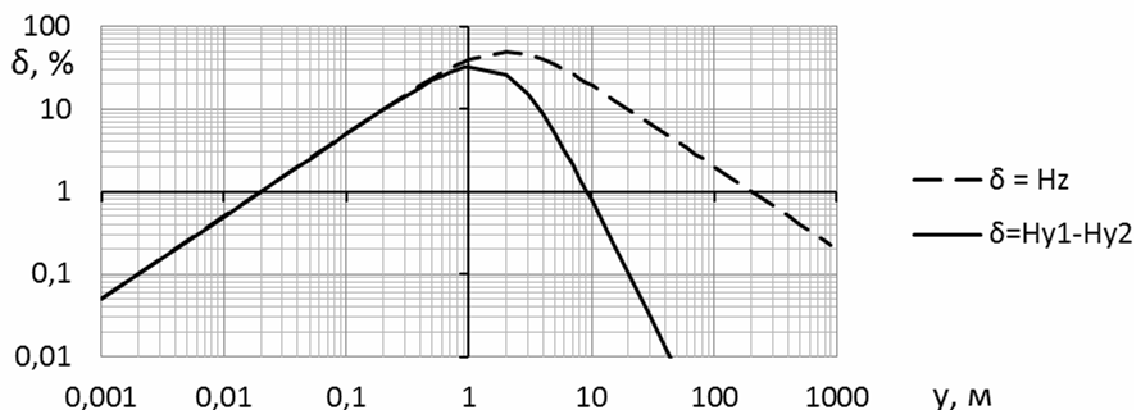


Рис.1. Зависимость $\delta = H_z$ и $\delta = H_{y1} - H_{y2}$ от расстояния y до провода

При реализации (4) смежные провода следует питать встречными, т.е. противофазными, токами. При этом срединная плоскость между проводами является плоскостью симметрии магнитного поля и может использоваться для местоопределения МТА аналогично проводу. Что позволяет удвоить интервал между проводами и снизить затраты на их укладку.

Структурная схема устройства местоопределения (УМО), реализующего (4), показана на рисунке 2, где обозначено: МА - магнитные антенны; У - усилители напряжения; В - выпрямители; СС - схема сравнения напряжений.

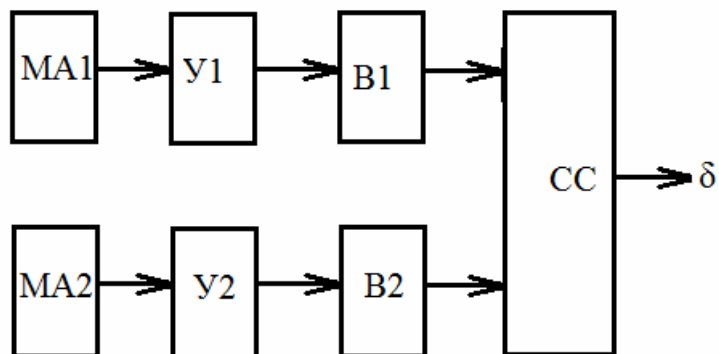


Рис. 2. Структурная схема УМО

По существу, УМО состоит из двух датчиков напряженности магнитного поля и схемы сравнения. Каждый датчик состоит из магнитной антенны МА, усилителя У и выпрямителя В. Точностные параметры датчиков не нормируются, но необходимо, чтоб оба датчика обладали одинаковыми коэффициентами передачи. Что достигается регулировкой усилителей У.

Методика расчета УМО МТА

Магнитные антенны могут быть в виде стержневых или рамочных катушек, электродвижущая сила (ЭДС) E которых пропорциональная суммарной площади S витков:

$$E = \mu \frac{I}{2\pi z} S \cdot 2\pi f ,$$

где $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнитная постоянная.

Настройка индуктивности L катушки в резонанс на рабочей частоте $\omega = 2\pi f$ осуществляется контурным конденсатором. Суммарная емкость C конденсатора и катушки определяется по формуле:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} .$$

Добротность резонансного LC-контура:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} ,$$

где R - активное сопротивление катушки магнитной антенны (МА).

Расчет катушки МА удобно выполнять по нормированным параметрам $I = 1\text{ А}$, $f = 1\text{ Гц}$, $z = 1\text{ м}$, $S = 1\text{ м}^2$, $Q = 1$. Тогда нормированная ЭДС витков катушки суммарной площадью 1 м^2 :

$$e = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I}{2\pi z} \cdot S \cdot 2\pi \cdot f = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ В} .$$

Максимальное значение выходного напряжения усилителей У (рис. 2):

$$U = (e \cdot I \cdot Q \cdot S \cdot k_{yc} \cdot f) / z,$$

где k_{yc} - коэффициент усиления усилителей.

Необходимая площадь витков катушки МА:

$$S = \frac{U \cdot z}{e \cdot I \cdot Q \cdot k_{yc} \cdot f}.$$

Пусть, например, $I = 10^{-2}$ А, $f = 10^4$ Гц, $z = 2$ м, $U = 5$ В, $Q = 50$. Эти значения являются исходными, выбираются в зависимости от конкретных условий. Значение k_{yc} выбирается с учетом стабильности и уровня собственных шумов усилителей. Пусть, например, $k_{yc} = 200$. Тогда требуемая суммарная площадь витков МА: $S = 5 \cdot 2 / (4 \cdot 3,14 \cdot 10^7 \cdot 10^{-2} \cdot 50 \cdot 200 \cdot 10^4) = 8 \text{ м}^2$.

Увеличение k_{yc} или тока I , например, в 2 раза пропорционально уменьшит требуемую площади и количество витков. Что уменьшит индуктивность катушки и увеличит требуемую емкость C конденсатора в 4 раза. Уменьшение сопротивления R в 2 раза и индуктивности L в 4 уменьшит добротность Q и выходное напряжение антенного контура в 2 раза. Для восстановления начальной добротности следует увеличить диаметр провода катушки в 1,4 раза.

При проектировании антенны необходимо учитывать паразитную емкость катушки; собственная резонансная частота катушки должна превышать рабочую не менее чем в 2 раза. Что позволит повысить температурную стабильность антенного контура с помощью контурного конденсатора с отрицательным температурным коэффициентом емкости.

Усилители переменного напряжения типовые, с минимальным уровнем шума. Выпрямители и схема сравнения должны обладать минимальным пороговым напряжением и дрейфом нуля. Наладка устройства ограничивается настройкой резонансной частоты, уравниванием коэффициентов передачи датчиков напряженности и установкой нуля схемы сравнения.

Экспериментальная проверка УМО

Разработан экспериментальный образец УМО, реализующий (4). Расчетная сила тока $I = 10$ мА, расстояние $2a$ между антеннами 0,7м, расстояние z между МА и плоскостью проводов 2 м, циклическая (цикл=период) частота тока $f = 8,2$ кГц. Предусматривается расстояние между проводами индуктора 7м, на поворотных полосах все провода соединяются параллельно перемычками. Питание смежных проводов противофазными токами вторичных обмоток согласующих трансформаторов, первичные обмотки которых соединяются последовательно. Что обеспечивает высокую равномерность магнитного поля по длине и ширине индуктора.

Экспериментальная проверка УМО выполнялась в магнитном поле петли 10х4 м, при $2a = 0,6$ м, $z = 1$ м, $I = 3$ мА. Расчетная (Р) и экспериментальная (Э) передаточные характеристики показаны на рисунке 3. Для наглядности график Э смещен вправо на 0,2 м. Не полное совпадение экспериментальной кривой с расчетной объясняется изготовлением устройства «на коленке» и снятием характеристики до проведения пуско-наладочных регулировок, которые выполнялись по данным рисунка 3.

Изготовлен экспериментальный образец системы автовождения беспилотных МТА. В состав системы входят, кроме рассмотренного УМО, датчики и устройства управления машинно-тракторным агрегатом, рисунок 4.

Высокая точность определения местоположения МТА является необходимым, но не достаточным условием качественного автовождения МТА. Необходимо обеспечивать устойчивость системы автовождения в широком диапазоне изменения тяговых сопротивлений и скоростей движения.

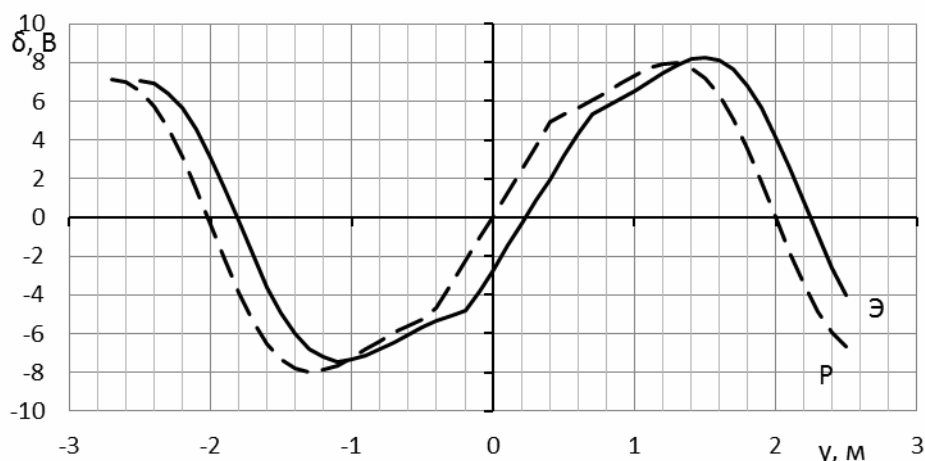
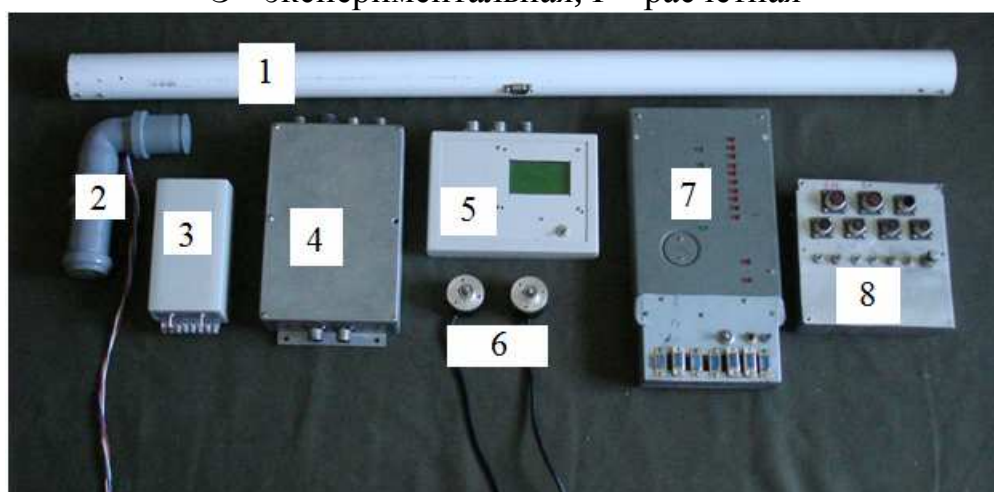


Рис. 3. Передаточные характеристики устройства местоопределения:
Э - экспериментальная, Р - расчетная



1 - магнитоприемник, 2 - датчик поворотной полосы, 3 - генератор переменного напряжения.
4- устройство местоопределения, 5 - одометр (измеритель углов и расстояний), 6 - энкодеры (датчики вращения), 7 - управляющее устройство, 8 - регулятор тракторного управления

Рис. 4. Состав системы автовождения МТА

Проблема в том, что измеряемым параметром является линейное отклонение y , а управляемым – курсовой угол. При этом измеряемый параметр является интегралом от управляемого параметра - как известно, такие системы автоматического управления не обладают устойчивостью.

В современных системах автовождения со спутниковыми агронавигаторами для измерения курсового угла применяют гироскопы. Преимуществом индукционной системы является возможность прямого измерения курсового угла по величине проекции H_x вектора напряженности на продольную ось трактора. Так, пропорционально-интегральный закон управления обеспечивает

расположение катушек МА под углом к продольной оси трактора [9]. Существуют и другие способы повышения устойчивости САВ.

Дополнительную информацию можно получить по тел. 8(913)9458420 или по e-mail atik102@mail.ru.

Список литературы

1. Причина потери 30% урожая лежит на поверхности [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.agritimes.ru/articles/2031/prichina-poteri-30-urozhaya-lezhit-na-poverhnosti/>
2. Гришуткина С.В профпатологии лидируют сельские механизаторы со стажем // АГРО XXI [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.agroxxi.ru/selhoztehnika/stati/v-profpatologii-lidiruyut-selskie-mehanizatory-so-stazhem.html>
3. Топливная экономичность трактора [Электронный ресурс]. – URL: https://studref.com/350903/tehnika/toplivnaya_ekonomichnost_traktora
4. Литинский С.А. Автоматизация вождения самоходных машин (автоводители) // Библиотека по автоматике. Вып. 166. – Москва; Ленинград: Энергия, 1966. – 143 с. – URL: <https://booksee.org/book/561916>
5. Гельфенбейн С.П. Терранавигация. – М.: Колос, 1981. – 207 с.
6. Сакеллари Н.А. Навигация. Учебник для военно-морского училища им. М.Ф. Фрунзе и спец. Курсов командного состава МС РККА им. ЦИК Татарской ССР. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Государственное военное издательство наркома обороны СССР, 1936. – 364 с.
7. Клейн Ю.К. Развитие автоматического вождения тракторных агрегатов за рубежом. – М.: ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1972. – 67 с.
8. Калюжный А.Т. Электронавигация сельскохозяйственная индукционная. Теория: Монография. Новосиб. гос. аграр.ун-т – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2015. – 176 с.
9. Rushing Karl. Developing the Driverless Tractor // Agricultural Engineering. 1971. №5.

Сведения об авторе:

Калюжный Анатолий Тимофеевич – к.т.н., доцент, НГАУ, г.Новосибирск.