

УДК 629.052.4: 631.372

**АНАЛИЗ ИНДУКЦИОННЫХ МЕТОДОВ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ НАВИГАЦИИ**

А.Т. Калюжный

Новосибирский государственный аграрный университет
E-mail: atik@ngs.ru

Калюжный Анатолий Тимофеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электрификации и автоматизации сельского хозяйства Новосибирского государственного аграрного университета.
E-mail: atik@ngs.ru

Область научных интересов: механизация и автоматизация мобильных процессов растениеводства, сельскохозяйственная навигация, электроника.

Выполнен анализ индукционных методов определения местоположения сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов при движении над подземным проводником с током. Установлены математические описания основных технических параметров устройств местоопределения, реализующих рассматриваемые методы.

Ключевые слова:

Индукционная сельскохозяйственная навигация, местоопределение, вектор напряженности магнитного поля.

Введение

Технический прогресс последних десятилетий, вызванный успехами микроэлектроники и вычислительной техники, практически не коснулся такой важной отрасли, как механизация мобильных процессов растениеводства в сельском хозяйстве.

Сейчас, как и сто лет назад, сохраняется ручное управление машинно-тракторными агрегатами (МТА). Тракторист, находясь в кабине трактора, подвергается воздействию всего комплекса неблагоприятных факторов, что не способствует ни сохранению здоровья, ни престижности профессии механизатора.

Дефицит механизаторов и стремление повышать их производительность труда толкают тракторостроителей на создание все более мощных тракторов – уже появились сельскохозяйственные тракторы с массой более 20 тонн и мощностью двигателя более 300 кВт. Но сельскохозяйственное поле, почва – живой организм, обладающий ограниченной несущей способностью. Появление на нем сверхтяжелых машин неизбежно приводит к машинной деградации почвы, что ухудшает условия произрастания растений и снижает их урожайность, способствует водной эрозии почвы и снижению её потенциального плодородия. Последующая обработка уплотненной почвы увеличивает тяговое сопротивление почвообрабатывающих машин и орудий, снижает топливную экономичность МТА. Ситуацию усугубляет возможность эффективного использования таких тракторов только при выполнении энергоемких операций типа пахоты – на других, менее энергоемких операциях, основная часть мощности двигателя расходуется на самопередвижение трактора.

Второй путь использования большой мощности двигателя трактора – повышение рабочих скоростей МТА. Но при этом возрастает тяговое сопротивление агрегатируемых машин и выполняемая трактором механическая работа, равная произведению пройденного расстояния на возросшее тяговое усилие. Соответственно возрастает удельный (на единицу площади) расход топлива, снижается топливная экономичность МТА. А также заметно ухудшаются условия труда тракториста, повышается его утомляемость и снижается точность вождения, что ухудшает качество выполнения полевых работ и снижает урожайность. Повышается буксование водителей трактора – часть мощности двигателя расходуется на истирание шин и почвы; последнее создает предпосылки для ветровой эрозии почвы.

Давно и хорошо известен альтернативный путь повышения производительности труда механизаторов, свободный от перечисленных недостатков сверхмощных тракторов. Он заключается в автоматизации МТА на уровне, обеспечивающем выполнение полевых сельскохоз-

ственных работ без непосредственного участия человека, что позволяет оптимизировать параметры трактора по критериям топливной экономичности и предотвращения деградации почвы, добиваясь повышения производительности труда увеличением количества агрегатов, контролируемых одним диспетчером.

Широкомасштабные работы в области автоматизации МТА проводились во второй половине прошлого столетия в СССР, итогом которых стало понимание всей сложности проблемы, поскольку решение задачи автоматизации управления движением МТА следует искать не в теории автоматического управления стационарными процессами, а в навигации – науке о методах и средствах определения местоположения и управления движением подвижных объектов [1]. Понимание, что только развитая сельскохозяйственная навигация может стать основой для успешной автоматизации мобильных процессов растениеводства. Причем разрабатывать необходимо все направления сельскохозяйственной навигации: спутниковую радиотехническую, телевизионную обзорно-сравнительную, оптическую, механическую, индукционную – в сельскохозяйственном производстве используется более тысячи наименований машин и орудий, и для каждого конкретного случая их применения необходимо иметь возможность выбрать наилучшее решение задачи автоматизации управления движением МТА.

В настоящее время для облегчения условий труда на зарубежных тракторах большой мощности устанавливают системы спутниковой навигации, повышающие точность ручного вождения. Реальную конкуренцию спутниковой радионавигации в сельскохозяйственном производстве может составить навигация индукционная (электронавигация), применявшаяся еще в годы Первой Мировой войны для проводки судов среди минных полей, защищающих морские порты от неприятеля [2]. Несомненным преимуществом индукционных устройств местоопределения МТА является автономность, помехоустойчивость, высокая точность. А также простота конструкции, обеспечившая их появление и работоспособность еще сто лет назад, когда об электронике никто и не помышлял.

Суть индукционных методов местоопределения МТА заключается в закладке в подпахотный слой почвы изолированных проводов, совпадающих с требуемой траекторией движения, и питания проводов переменным током, создающим в окружающем пространстве переменное магнитное поле. Измеряя на тракторе напряженность этого поля в одной или нескольких точках, можно по измеренным значениям определять отклонение датчиков напряженности от провода, следовательно – отклонение МТА от требуемой траектории.

В зависимости от взаимного положения проводника с током и приемника магнитного поля все индукционные методы местоопределения можно разделить на две группы [3–5]. К первой относятся методы местоопределения МТА при движении непосредственно над проводом или с незначительным боковым смещением от него. Ко второй группе относятся методы местоопределения МТА относительно провода, удаленного на десятки метров.

Несмотря на перспективность, методы индукционной сельхознавигации до настоящего времени не нашли широкого практического применения, что можно объяснить отсутствием достаточно полных знаний об их потенциальных возможностях, отсутствием методики расчета соответствующих индукционных устройств местоопределения МТА. В настоящей статье делается попытка в какой-то мере устранить этот пробел применительно к методам местоопределения первой группы.

Местоопределение машинно-тракторных агрегатов по величине модуля вектора напряженности магнитного поля

Основные параметры метода

Согласно закону полного тока, напряженность H , создаваемая током I бесконечного прямолинейного провода, обратно пропорциональна расстоянию r до провода:

$$H = \frac{I}{2\pi r}.$$

Измеряя напряженность на расстояниях a слева и справа от продольной оси трактора, по измеренным значениям H_1 и H_2 можно сформировать сигнал тракторного рассогласования (отклонения оси трактора от провода) δ согласно алгоритму:

$$\delta = H_1 - H_2.$$

Для математического описания методов местоопределения МТА совместим с проводом ось OX прямоугольной системы координат $OXYZ$, направив ось OZ вертикально. Тогда алгоритм (передаточная характеристика) УМО по величине модуля вектора напряженности магнитного поля опишется уравнением:

$$\delta = H_1 - H_2 = \frac{I}{2\pi\sqrt{(a+y)^2 + z^2}} - \frac{I}{2\pi\sqrt{(a-y)^2 + z^2}},$$

где z – расстояние между плоскостью проводов и датчиками напряженности; $2a$ – расстояние между точками измерения напряженности (навигационная база измерений); y – отклонение середины базы $2a$ от плоскости XOZ .

С целью упрощения записи далее будем принимать $I = 2\pi$ ампер. Тогда:

$$\delta(y) = \frac{1}{\sqrt{(a+y)^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(a-y)^2 + z^2}}. \quad (1)$$

На рис. 1 показана передаточная характеристика $\delta(y)$ и её составляющие при $a = z$. Как видно, максимальное значение сигнал тракторного рассогласования δ принимает при боковом смещении $y \approx a$.

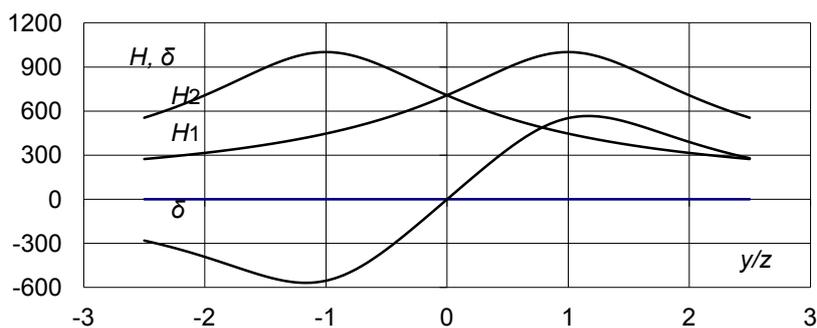


Рис. 1. Формирование сигнала тракторного рассогласования δ по измеренным значениям напряженности H_1 и H_2

Статическая чувствительность УМО равна отношению сигнала тракторного рассогласования к вызвавшему его боковому отклонению МТА от нейтрального положения:

$$K_{ст} = \delta/y.$$

На рис. 2 приведена зависимость статической чувствительности УМО (в относительных единицах) от полубазы a/z (цифры возле графиков) и приведенного (к высоте z) бокового смещения МТА y/z .

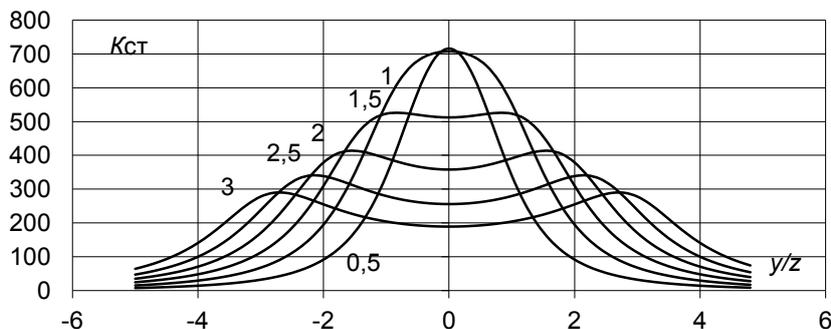


Рис. 2. Зависимость статической чувствительности УМО от полубазы a/z и бокового смещения y/z

Динамическая чувствительность УМО равна отношению приращения сигнала $\Delta\delta$ к вызвавшему его приращению Δy при $\Delta y \rightarrow 0$:

$$K_{\text{дин}} = \frac{d\delta}{dy} = \frac{a-y}{\sqrt{(a-y)^2 + z^2}^3} - \frac{a+y}{\sqrt{(a+y)^2 + z^2}^3}. \quad (2)$$

Зависимость динамической чувствительности УМО от значения координаты y/z приведена на рис. 3; цифрами обозначена приведенная к высоте z длина полубазы a/z .

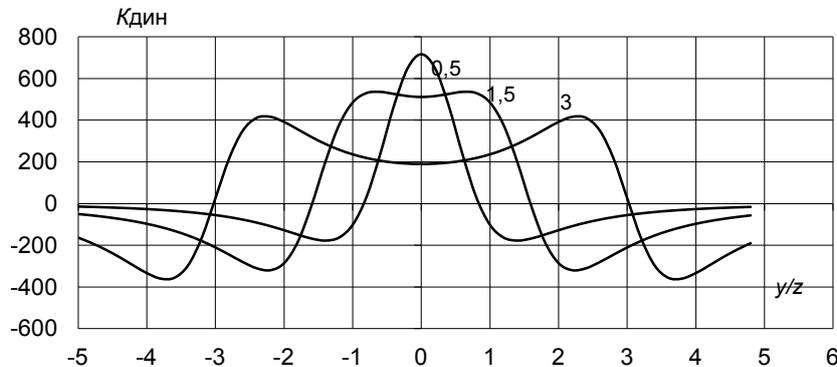


Рис. 3. Зависимость динамической чувствительности УМО от полубазы a и бокового отклонения y/z

Графики динамической и статической чувствительности близки при $y < a$. При дальнейшем увеличении y статическая чувствительность монотонно снижается, в то время как динамическая меняет знак.

Важным параметром УМО является ширина рабочей зоны, то есть максимально допустимое отклонение МТА от провода, при котором сохраняется надежный «захват» провода системой автоматического траекторного управления МТА. В качестве критерия ширины рабочей зоны можно принять отклонения от провода, при которых динамическая чувствительность положительная. Кривые на рис. 3 показывают, что ширина рабочей зоны равна или несколько превышает размер полубазы a .

Реально «потеря» провода системой траекторного управления происходит при более значительном удалении от провода, когда статическая чувствительность достигает некоторого минимального порога, значение которого определяется алгоритмом работы автоматического регулятора траекторного управления. Но гарантированный возврат МТА в нейтральное положение имеет место только при положительных значениях динамической чувствительности.

Выше предполагалось, что измерительная база $2a$ с датчиками напряженности симметрична продольной оси трактора. В действительности она может располагаться несимметрично трактору, и тогда он смещается относительно провода в противоположную сторону; величину смещения можно регулировать механическим перемещением базы $2a$ относительно продольной оси трактора в ту или другую сторону.

Механическое перемещение базы сопровождается увеличением выходного сигнала одного из датчиков напряженности и снижением второго. Такое же изменение можно обеспечить электрическим путем, изменяя усиление выходных сигналов датчиков напряженности. Тогда алгоритм (1) можно записать в виде:

$$\delta(y) = \frac{1}{\sqrt{(a+y)^2 + z^2}} - \frac{K}{\sqrt{(a-y)^2 + z^2}},$$

где K – отношение коэффициентов усиления левого и правого каналов УМО.

В качестве примера на рис. 4 приведены передаточные характеристики УМО при $a = 3z$ и $K = 1; 2; 4$ (цифры возле графиков).

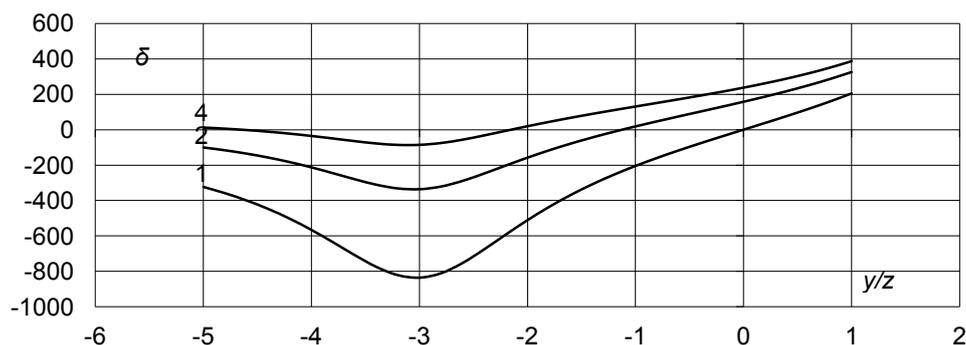


Рис. 4. Смещение передаточной характеристики вдоль оси ОУ изменением отношения коэффициентов усиления датчиков напряженности

Графики на рис. 4 показывают, что отношение коэффициентов усиления $K_1/K_2 = 4$ перемещает нейтральное положение базы в боковом направлении на $2,15z$. Например, если $z = 2$ и $a = 6$ м, то при $K_1/K_2 = 4$ нейтральное положение базы смещается на $4,3$ м. При этом ширина рабочей зоны составит 2 м в одну сторону и 10 м – в другую.

Смещать нейтральное положение базы можно, формируя сигнал траекторного рассогласования согласно алгоритму:

$$\delta = H_1 - H_2 + H_0. \quad (3)$$

Так, в приведенном выше примере для смещения нейтрального положения базы на $2,2z$ следует задать $H_0 \approx 600$ относительных единиц.

Помехоустойчивость метода

Под действием внешних факторов или старения коэффициенты передачи датчиков напряженности могут изменяться неодинаково, в результате чего возникнет мультипликативная погрешность местоопределения Δy . Величину погрешности можно определить, решив уравнение:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{(a+y)^2 + z^2}} - \frac{K}{\sqrt{(a-y)^2 + z^2}} = 0.$$

Решения этого уравнения для некоторых значений $K = K_1/K_2$ и a/z приведены в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость мультипликативной погрешности местоопределения от отношения коэффициентов передачи $K = K_1/K_2$ каналов измерения напряженности и полубазы a/z

a/z	0,5	1	1,5	2	2,5	3	
Мультипликативная погрешность, $\Delta y/z$							
$K = K_1/K_2$	1,01	0,012	0,01	0,011	0,012	0,014	0,017
	1,02	0,025	0,02	0,0214	0,025	0,029	0,033
	1,03	0,037	0,0295	0,032	0,037	0,043	0,049

Аддитивная погрешность местоопределения связана с дрейфом нуля схемы сравнения H_1 и H_2 и определяется переходной характеристикой УМО – чем круче характеристика, тем больше допустимый дрейф нуля при той же допустимой погрешности местоопределения.

Помехоустойчивость УМО к ориентационным помехам определяется, прежде всего, чувствительностью к крену трактора, сопровождаемому поворотом базы $2a$ вокруг центра вращения, которым обычно является точка контакта одного из движителей трактора с почвой. Анализ показывает, что крен трактора (базы $2a$) вокруг точки на поверхности земли на угол χ аналогичен смещению трактора в сторону, противоположную направлению крена, на расстояние Δy , равное:

$$\Delta y = t_0 \sin \chi,$$

где t_0 – расстояние от провода до поверхности земли, рис. 5.

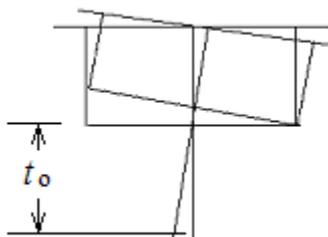


Рис. 5. Влияние крена МТА на формирование сигнала тракторного рассогласования

Глубина закладки провода t_0 порядка 1 м; угол крена χ не превышает 6° , поэтому при отсутствии корректировки крен может вызывать погрешность местоопределения до $\pm 0,1$ м независимо от высоты базы над землей или её длины $2a$.

Галопирование трактора изменяет высоту z базы $2a$. Изменение высоты не смещает положение точек, удовлетворяющих условию $\delta = 0$, но, согласно (2), влияет на чувствительность УМО. Последнее может несколько увеличить частоту срабатывания исполнительных механизмов рулевого управления трактора на границе рабочей зоны.

Рыскание, сопровождаемое изменением курсового угла трактора, не создает сигнала рассогласования лишь в том случае, если центром вращения является середина базы. В действительности центр вращения трактора расположен вне базы, поэтому рыскание трактора сопровождается формированием сигнала тракторного рассогласования. Но его влияние скорее положительное, чем отрицательное, так как позволяет формировать команды управления механизмом поворота трактора с упреждением, предотвращая уход трактора с заданного курса и повышая устойчивость системы автоматического тракторного управления.

Изменение тока провода пропорционально снижает чувствительность УМО, но не смещает направляющую линию трактора $\delta = 0$. Исключение составляют устройства, реализующие алгоритм (3), поскольку для них уменьшение тока провода аналогично пропорциональному увеличению сигнала H_0 .

Местоопределение МТА в магнитном поле провода конечной длины

Вышеизложенное относилось к бесконечно длинному проводу. Реальные провода обладают конечной длиной, и вблизи их окончаний наблюдаются краевые эффекты, вызываемые как конечной длиной провода, так и магнитным полем, создаваемым обратным током цепи.

Напряженность магнитного поля проводника конечной длины описывается законом Био–Савара:

$$H = \frac{I}{4\pi r} (\sin\beta_1 + \sin\beta_2), \quad (4)$$

где β_1 и β_2 – углы между перпендикуляром к проводнику и направлениями на его концы, измеренные в точке М наблюдения магнитного поля, рис. 6; $r = OM$.

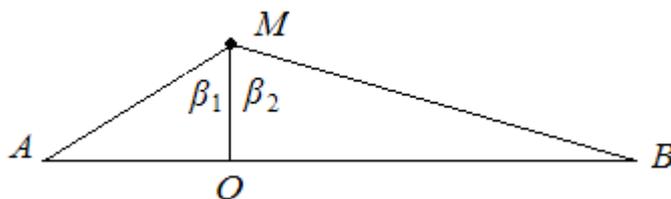


Рис. 6. Определение напряженности магнитного поля проводника конечной длины

Пусть $AO = OB = x$. Тогда $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ и $H \equiv \sin\beta$. Если принять за 100 % напряженность, создаваемую током бесконечного провода, то 50 % напряженности формирует участок, «види-

мый» с точки измерения под углами $\pm\beta = \arcsin(0,5) = \pm 30^\circ$. 70,7 % напряженности формирует участок, видимый под углами $\pm 45^\circ$, а 90 % – под углами $\pm 64^\circ$. Приняв допустимую погрешность измерения напряженности 1 %, бесконечным можно считать провод, видимый под углами более $\pm 82^\circ$. При этом он простирается в обе стороны от точки наблюдения поля на расстояния, превышающие 7-кратное расстояние r между проводом и точкой наблюдения поля [6].

Одним из краевых эффектов является снижение напряженности вследствие уменьшения угла β в формуле (4). Так, снижение чувствительности на 10 % наблюдается при $\beta = \arcsin(0,8) = 53^\circ$, что имеет место при $x = 1,335\sqrt{a^2 + z^2}$ до конца провода. Если, например, $a = z = 2$ м, то снижение чувствительности и увеличение зоны нечувствительности системы тракторного управления на 10 % произойдет на расстоянии 3,8 м до конца провода.

Для замыкания цепи тока можно использовать землю, вводя в неё ток при помощи заземлителей. В этом случае магнитное поле обладает симметрией относительно вертикальной плоскости XOZ. Если же магнитное поле создается током изолированной от земли петли, то симметричность нарушается вследствие влияния полей остальных сторон петли и точка с максимальной напряженностью смещается внутрь петли. В качестве примера на рис. 7 показан график напряженности на высоте $z = 2$ м, на расстоянии 50 м до конца петли 1000×40 м; координата y измеряется от провода.

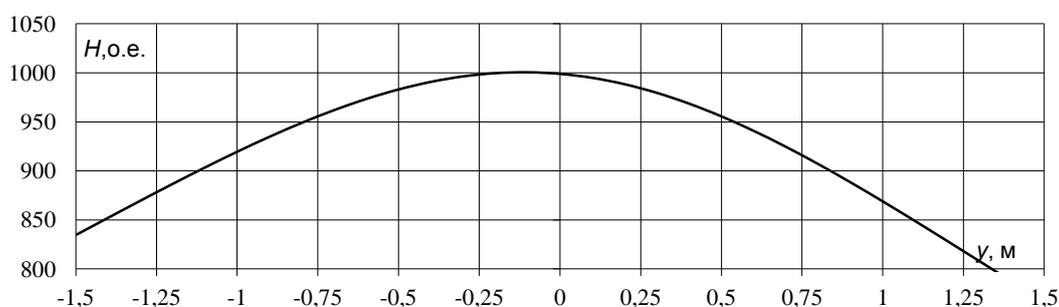


Рис. 7. Распределение напряженности магнитного поля над стороной петли 1000×40 м

Местоопределение машинно-тракторных агрегатов по величине проекции вектора напряженности магнитного поля на поперечную ось трактора

Выше рассматривался разностно-амплитудный метод местоопределения по величине модуля вектора напряженности магнитного поля. Технически проще измерять проекцию вектора напряженности на то или иное направление, например – на горизонтальную ось OY, параллельную поперечной оси трактора.

Поскольку угол ψ между вертикалью и вектором напряженности магнитного поля:

$$\psi = \arctg \frac{z}{y} = \arcsin \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}} = \arccos \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}},$$

то величина проекции H_y :

$$H_y = H \sin \psi = \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}} \cdot H.$$

Передаточная характеристика УМО, измеряющих проекцию вектора напряженности на поперечную ось трактора:

$$\delta = \frac{z}{(y-a)^2 + z^2} - \frac{z}{(y+a)^2 + z^2}.$$

На рис. 8 приведена передаточная характеристика $\delta(y)$ УМО при $a = 1,5 z$. Там же приведены графики выходных сигналов датчиков напряженности H_{y1} и H_{y2} , поясняющие формирование сигнала $\delta = H_{y1} - H_{y2}$.

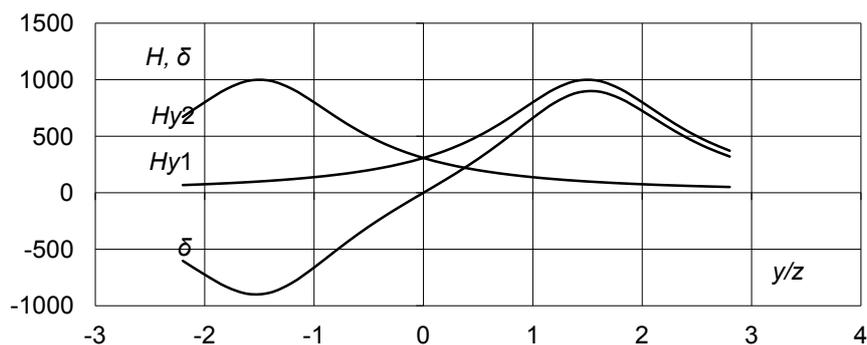


Рис. 8. Передаточная характеристика УМО, измеряющего проекцию вектора напряженности на поперечную ось трактора

Результаты расчета статической чувствительности $K_{ст} = \delta/y$ УМО приведены на рис. 9, где цифрами обозначена величина полубазы a .

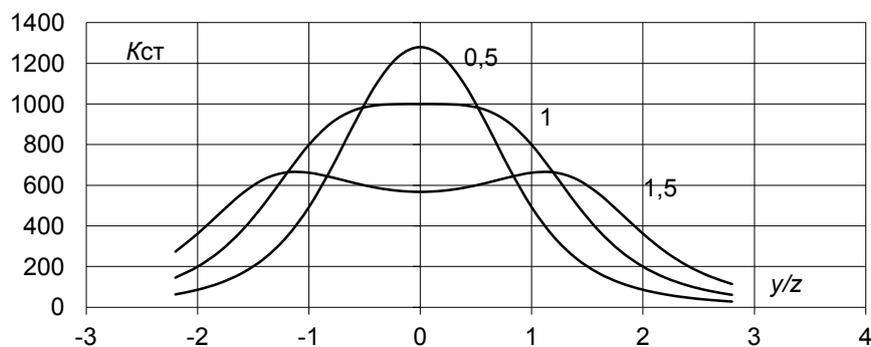


Рис. 9. Статическая чувствительность УМО при различной длине полубазы a/z

Динамическая чувствительность $K_{дин}$ УМО:

$$K_{дин} = \frac{d\delta}{dy} = -2z \left(\frac{y-a}{[(y-a)^2 + z^2]^2} - \frac{y+a}{[(y+a)^2 + z^2]^2} \right)$$

совпадает со статической при $y = 0$.

Зависимость динамической чувствительности от бокового смещения при $a = 1,5 z$ показана на рис. 10.

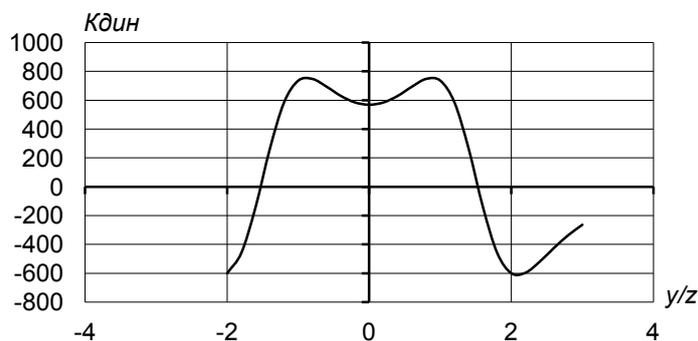


Рис. 10. Зависимость динамической чувствительности от бокового смещения при $a = 1,5 z$

Сравнение графиков на рис. 1, 2 и 3 с графиками на рис. 8, 9 и 10 показывает, что качество местоопределение по горизонтальной проекции вектора напряженности не уступает местоопределению по модулю вектора напряженности. Более того, при создании магнитного поля

с помощью изолированной петли местоопределение по проекции обладает преимуществом, так как обеспечивает независимость результатов измерения от магнитных полей, создаваемых остальными сторонами петли вследствие отсутствия у последних составляющих H_y .

Местоопределение по проекции вектора напряженности на вертикальную ось трактора

Величина проекции вектора напряженности на вертикальную ось:

$$H_z = H \cos \psi = \frac{y}{y^2 + z^2},$$

где y – отклонение датчика напряженности от оси OZ системы координат.

Непосредственно над проводом $y = 0$, поэтому вертикальная проекция H_z вектора напряженности равна нулю. Смещение датчика влево или вправо относительно провода на одинаковые расстояния создает на его выходе напряжения, значения которых одинаковые по величине, но отличаются по фазе на 180 градусов.

Поскольку датчики напряженности в исходном состоянии смещены вдоль оси OY на расстояния $\pm a$, то уравнение передаточной характеристики:

$$\delta = \frac{a + y}{(a + y)^2 + z^2} - \frac{a - y}{(a - y)^2 + z^2},$$

где y – боковое смещение середины базы $2a$ относительно провода.

На рис. 11 в качестве примера показана зависимость H_{z1} , H_{z2} , $\delta = H_{z1} - H_{z2}$, $K_{ст} = \delta/y$ от бокового смещения y/z при $a = 0,5 z$.

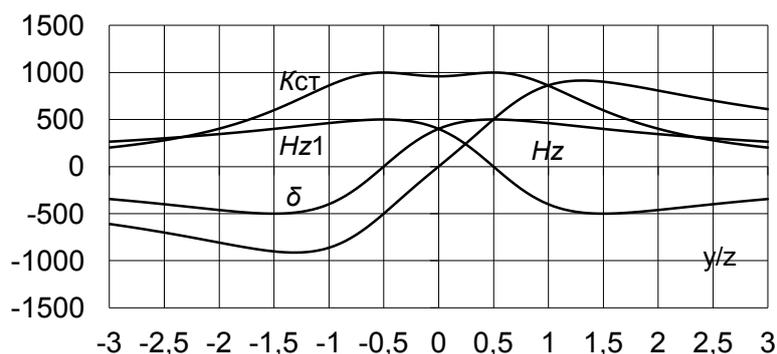


Рис. 11. Параметры разностно-амплитудных УМО по величине проекций вектора напряженности на вертикальную ось трактора при $a = 0,5 z$

Зависимости динамической чувствительности от размера полубазы a/z и бокового смещения y/z приведены на рис. 12. Они показывают, что при $a > 0,5 z$ наблюдается резкое снижение начальной чувствительности УМО, вплоть до нуля при $a = z$. Поэтому данный метод можно отнести к «короткобазовым»; УМО с базой $2a = 2$ м, предназначенное для работы при заглублении провода на 1 м и измерении напряженности на высоте 1 м над поверхностью земли, полностью потеряет работоспособность, если провод лежит на поверхности земли, так как его чувствительность упадет до нуля.

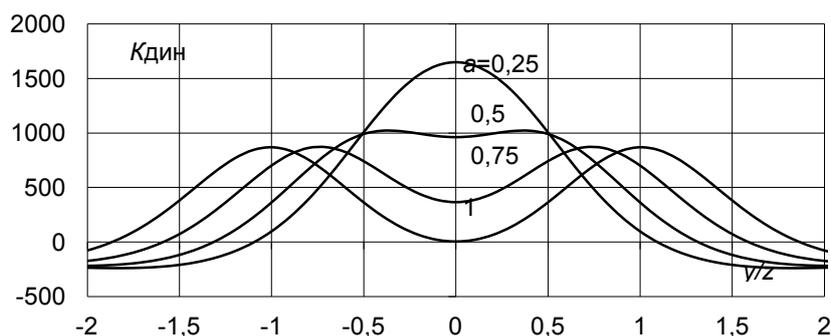


Рис. 12. Зависимость динамической чувствительности от величины полубазы a/z и бокового смещения y/z

Внутри петли вертикальная составляющая суммарной напряженности равна арифметической сумме вертикальных составляющих напряженностей, создаваемых током всех сторон петли, в то время как снаружи петли вертикальная составляющая напряженности, создаваемой током ближней стороны, отрицательная и вычитается. В результате нейтральное положение трактора, удовлетворяющее условию $\delta = 0$, смещается наружу петли. Величину смещения y для бесконечно длинной петли можно определить, решив уравнение:

$$\delta = \left(\frac{a+y}{(a+y)^2+z^2} + \frac{1}{B-a+y} \right) - \left(\frac{a-y}{(a-y)^2+z^2} - \frac{1}{B+a+y} \right) = 0,$$

где B – ширина петли.

Зависимость наружного смещения нейтрального положения МТА при $z = 2a = 2$ м от ширины B бесконечно длинной петли приведена в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость смещения нейтрального положения МТА от ширины B петли

$B, \text{ м}$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$y, \text{ м}$	0,40	0,21	0,14	0,1	0,08	0,07	0,06	0,05	0,045	0,04

Вследствие изменения полярности (фазы) выходного напряжения датчика напряженности при пересечении плоскости Oxz фактический алгоритм местоопределения МТА по рассматриваемому методу:

$$\begin{aligned} \delta &= |H_{z1}| - |H_{z2}| \text{ при } y < a, \\ \delta &= |H_{z1}| + |H_{z2}| \text{ при } y > a. \end{aligned}$$

Поэтому этот и подобные ему методы местоопределения можно назвать «разностно-суммарными»; в литературе они именуются «сравнение сигналов на переменном токе» [3].

Технически проще сравнивать модули выходных сигналов датчиков напряженности без учета фазы. В этом случае алгоритм местоопределения $\delta = |H_{z1}| - |H_{z2}|$ независимо от величины y , следствием чего является резкое снижение δ при $y > a$, рис. 13.

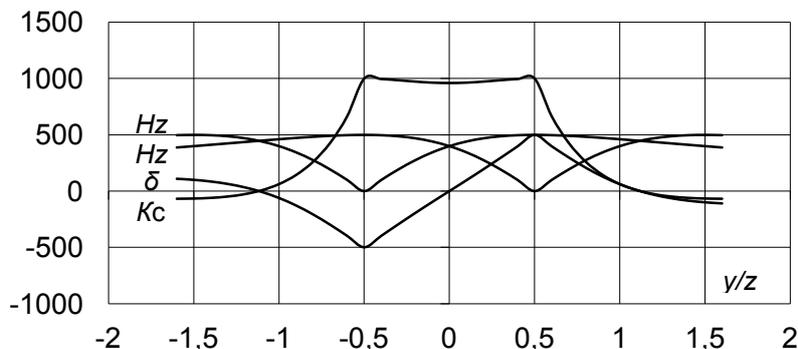


Рис. 13. Параметры УМО при $2a = z$ и измерениях модуля проекций вектора напряженности на вертикальную ось трактора, без учета направления проекции

Сравнение графиков на рис. 11 и 13 показывает, что при $|y| < 0,5a$ чувствительность в обоих случаях одинаковая. Различие характеристик наблюдается при $|y| > 0,5a$, когда направление вертикальной составляющей напряженности магнитного поля меняется на противоположное, однако не суммируется, как по предыдущему варианту, а вычитается. В литературе такой метод обозначается как «сравнение сигналов на постоянном токе» [3].

Местоопределение по проекции вектора напряженности на произвольное направление $\pm\gamma$

В общем случае оси проекций могут образовывать с вертикалью произвольные углы $\pm\gamma$, отличные от нуля и 90 градусов, рис. 14. В этом случае величина проекции вектора напряженности описывается уравнением:

$$H_y = H \cos(\psi - \gamma) = H \cos\psi \cos\gamma + H \sin\psi \sin\gamma = H_z \cos\gamma + H_y \sin\gamma.$$

Сигнал δ траекторного рассогласования:

$$\delta = \left(\frac{a+y}{(a+y)^2 + z^2} \cos\gamma + \frac{z}{(a+y)^2 + z^2} \sin\gamma \right) - \left(\frac{a-y}{(a-y)^2 + z^2} \cos\gamma + \frac{z}{(a-y)^2 + z^2} \sin\gamma \right).$$

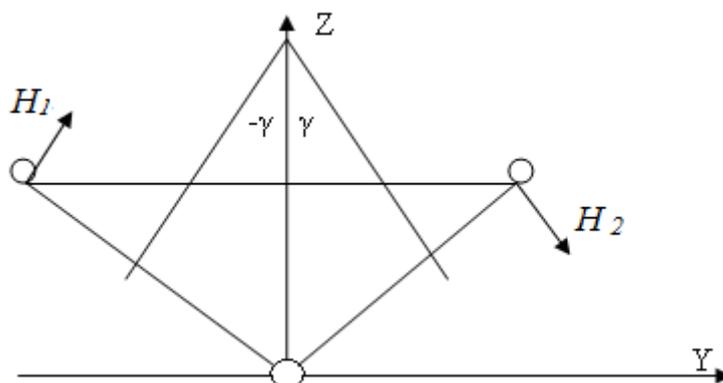


Рис. 14. Общий случай взаимного расположения векторов напряженности и осей проекции

На рис. 15 в качестве примера приведены параметры УМО при $a = 0,5 z$ и $\gamma = \pm 26,565^\circ$, когда аксиальные оси датчиков напряженности, выполненных в виде многовитковых катушек, нормально проходят через провод.

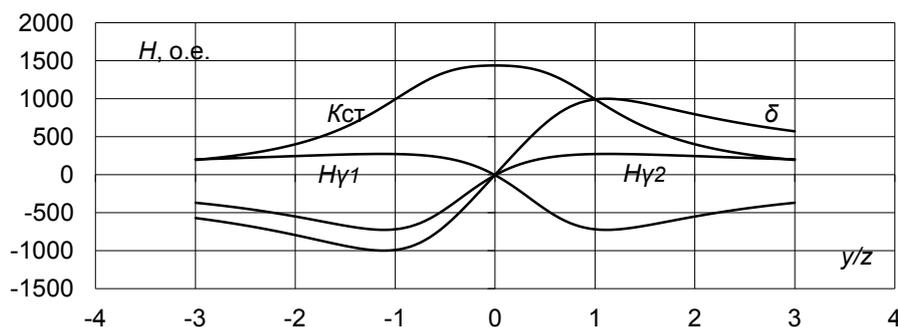


Рис. 15. Параметры УМО при выборе начальных направлений на провод в качестве осей проекций

Особенность этого варианта местоопределения в том, что при нейтральном положении МТА $H_{y1} = H_{y2} = 0$, что позволяет упростить исходную наладку УМО. Сигнал δ достигает максимального значения при $y = 1,1 z$, что обеспечивает достаточно широкую рабочую зону МТА при сравнительно короткой базе $2a = z$.

Увеличение угла γ до $\pm 60^\circ$ позволяет определять местоположение МТА без учета фазы, так как внутри рабочей зоны она не меняется, рис. 16.

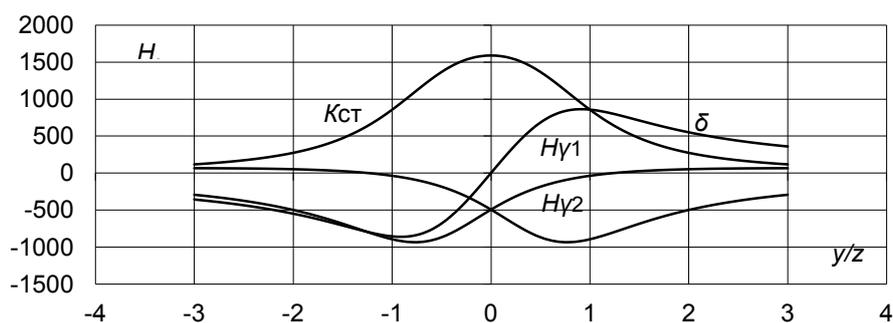


Рис. 16. Параметры УМО при $a = 0,5 z$ и углах проекций $\gamma = \pm 60^\circ$

Одноточечные методы местоопределения

На рис. 17 приведены параметры одноточечного разностно-амплитудного метода при $\gamma = 45^\circ$ и $2a = 0$; нулевое значение базы упрощает конструкцию УМО, уменьшая габаритные размеры антенного узла. Метод можно реализовать как с учетом фазы, так и без, поскольку изменение фазы происходит за пределами рабочей зоны, определяемой максимальными значениями сигнала δ .

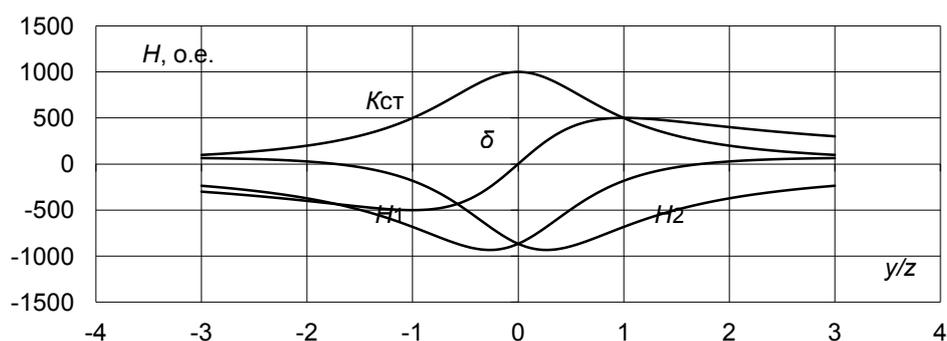


Рис. 17. Параметры одноточечного разностно-амплитудного УМО при $\gamma = \pm 45^\circ$

На рис. 18 показаны параметры УМО при $2a = 0$ и $\gamma = 0$.

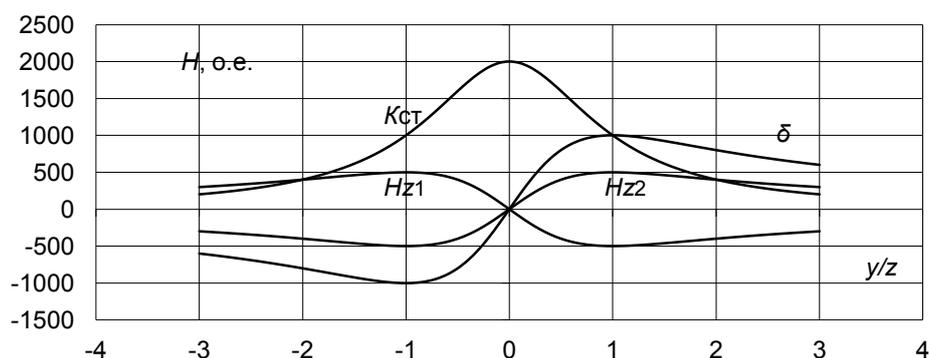


Рис. 18. Параметры односигнального УМО

Такой вариант можно реализовать только с учетом фазы сигналов, определяющей направление отклонения МТА от нейтрального положения. Сумма модулей равна их удвоенному значению, поэтому УМО может содержать только один датчик напряженности, выходное напряжение которого уже является сигналом тракторного рассогласования δ , без какого-либо

дополнительного математического преобразования. Поэтому такой метод правомерно назвать «односигнальным». Передаточная характеристика односигнальных УМО:

$$\pm\delta = H_z = \pm \frac{y}{y^2 + z^2};$$

знак сигнала определяется его фазой относительно тока, создающего магнитное поле.

Статическая чувствительность:

$$K_{ст} = \delta/y = 1/(y^2 + z^2).$$

Динамическая чувствительность:

$$K_{дин} = \frac{d\delta}{dy} = \frac{z^2 - y^2}{(z^2 + y^2)^2}.$$

Максимальное значение динамической чувствительности наблюдается при $y = 0$ и равно $1/z^2$. При $y = z$ динамическая чувствительность равна нулю; дальнейшее увеличение координаты y снижает сигнал траекторного рассогласования δ , и динамическая чувствительность меняет знак на отрицательный.

Отличие одноточечных методов местоопределения от двухточечных обусловлено тем, что сигнал траекторного рассогласования определяется прежде всего направлением вектора напряженности магнитного поля в точке измерения – величина вектора (модуль) имеет второстепенное значение, оказывая влияние только на чувствительность УМО.

При создании магнитного поля током петли нейтральное положение МТА одноточечных методов смещается наружу, при этом ось симметрии датчика напряженности не проходит через провод. Величину смещения Δy для бесконечно длинной петли можно определить, решив уравнение:

$$\frac{\Delta y}{\Delta y^2 + z^2} - \frac{B + \Delta y}{(B + \Delta y)^2 + z^2} = 0,$$

где B – ширина петли.

Решение этого уравнения при $z = 2$ м приведены в табл. 3.

Таблица 3. Зависимость наружного смещения МТА от ширины B петли

$B, \text{ м}$	5	10	20	30	40	60	80	100
$\Delta y, \text{ м}$	0,701	0,531	0,352	0,262	0,208	0,147	0,108	0,093

Сравнение данных табл. 2 и 3 показывает, что их данные практически совпадают, но в первом случае длина базы $2a = 2$ м, а во втором $2a = 0$.

Заключение

При перемещении МТА над проводом переходная характеристика УМО в общем случае может быть представлена уравнением:

$$\delta = K_1 H_1 - K_2 H_2 + H_0.$$

Если $K_1 = K_2 = 1$ и $H_0 = 0$, уравнения переходных характеристик принимают вид:

- при измерении модуля напряженности

$$\delta(y) = \frac{1}{\sqrt{(a+y)^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(a-y)^2 + z^2}};$$

- при измерении проекции вектора напряженности на поперечную ось трактора

$$\delta = \frac{z}{(a+y)^2 + z^2} - \frac{z}{(a-y)^2 + z^2};$$

- при измерении проекции вектора напряженности на вертикальную ось трактора, с учетом фазы

$$\delta = \frac{a+y}{(a+y)^2 + z^2} - \frac{a-y}{(a-y)^2 + z^2};$$

- при измерении проекции вектора напряженности на вертикальную ось трактора, без учета фазы

$$\delta = \left| \frac{a+y}{(a+y)^2+z^2} \right| - \left| \frac{a-y}{(a-y)^2+z^2} \right|;$$

- при измерении проекции вектора напряженности на вертикальную ось и $2a = 0$:

$$\delta = \frac{y}{y^2+z^2}.$$

- при измерении проекции вектора напряженности на произвольное направление γ , без учета фазы

$$\delta = \left| \frac{a+y}{z^2+(a+y)^2} \cos\gamma + \frac{z}{z^2+(a+y)^2} \sin\gamma \right| - \left| \frac{a-y}{z^2+(a-y)^2} \cos\gamma + \frac{z}{z^2+(a-y)^2} \sin\gamma \right|.$$

Зная уравнение переходных характеристик, можно на этапе проектирования УМО установить значения их технических параметров и выбрать оптимальные решения. Так, зная переходную характеристику, можно при реализации алгоритма (3) определить требуемое значение компенсационного сигнала H_0 , обеспечивающее необходимое боковое смещение МТА относительно провода, или допустимый дрейф нуля. Производная от уравнения переходной характеристики по боковому смещению позволяет определить чувствительность УМО в данной точке и выбрать необходимый коэффициент усиления выходного сигнала. Значения бокового смещения y , при которых производная меняет знак, определяют расчетную границу рабочей зоны.

В качестве источника магнитного поля может использоваться заземленный на концах провод или изолированная от земли петля. Создаваемые ими магнитные поля неодинаковые, поэтому уравнения переходных характеристик необходимо дополнять членом, учитывающим поля, создаваемые обратным током цепи.

При местоопределении по величине проекций вектора напряженности принципиальное значение имеет направление осей проекций. Правильный выбор осей проекций позволяет формировать сигнал траекторного рассогласования, содержащий курсовую составляющую, которая обеспечивает высокую устойчивость Системы автоматического траекторного управления МТА в широком диапазоне изменения тяговых усилий и скоростей движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Помыкаев И.И., Селезнев В.П., Дмитроченко Л.А. Навигационные приборы и системы / под ред. И.И. Помыкаева. – М.: Машиностроение, 1983. – 456 с.
2. Сакеллари Н. Навигация. – М.: Государственное военное издательство наркомата обороны союза ССР, 1936. – 363 с.
3. Литинский С.А. Автоматизация вождения самоходных машин (автоводители). – М.; Л.: Энергия, 1966. – 142 с.
4. Вулах Г.Я., Тимошенко В.С., Школьникова С.В. и др. Автоматическое и дистанционное управление промышленными тракторами. – М.: ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1972. – 83 с.
5. Гельфенбейн С.П. Терранавигация. – М.: Колос, 1981. – 207 с.
6. Калужный А.Т. Магнитное поле наземного проводника с током // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 11. – С. 15–18.

Поступила 29.04.2013 г.