

Калюжный Анатолий Тимофеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электрификации и автоматизации сельского хозяйства Новосибирского государственного аграрного университета, г. Новосибирск.
E-mail: atik@ngs.ru
Область научных интересов: автоматизация мобильных процессов растениеводства.

УДК 629.114.2.05

АНАЛИЗ ИНДУКЦИОННЫХ МЕТОДОВ ВЗАИМНОЙ НАВИГАЦИИ ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

А.Т. Калюжный

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

Рассматриваются индукционные методы определения взаимного положения ведущего и ведомого машинно-тракторных агрегатов в переменном магнитном поле, создаваемом горизонтальной рамкой с током.

Ключевые слова:

Сельскохозяйственная навигация.

Введение

На этапе перехода от ручного управления машинно-тракторными агрегатами (МТА) к полностью автоматическому (диспетчерскому) может найти применение групповой метод работы нескольких автоматизированных МТА под наблюдением одного оператора. Группа состоит из ведущего МТА с трактором-лидером и одного или нескольких ведомых МТА с тракторами-дублерами, копирующими (дублирующими) траекторию впереди идущего трактора. Это позволяет использовать более простые и менее дорогостоящие средства автоматизации, более тщательно контролировать окружающую обстановку и состояние всех МТА, оперативно устранять появляющиеся отклонения от нормального режима работы. При этом оператор, находясь в комфортных условиях в кабине трактора-лидера и возложив наиболее трудоемкую работу – управление движением – на автоматику, основное внимание может уделять качеству выполнения полевых работ. При необходимости он может оперативно изменять настройки режимов работы МТА, диагностировать их техническое состояние, вызывать требуемую техническую помощь. При диспетчерском управлении автоматическими МТА дублирующее вождение может применяться для организации групповых переездов МТА по нестационарным траекториям.

Ниже проведен анализ индукционных методов определения взаимного положения двух МТА в магнитном поле катушки, выполненной в виде горизонтальной круговой рамки и содержащей несколько десятков или сотен витков изолированного провода.

1. Магнитное поле круговой рамки

На расстояниях от круговой рамки, превышающих её наибольший размер, модуль вектора напряженности магнитного поля в сферической системе координат описывается уравнениями [1]:

$$H_r = 2M \cos \theta / r^3, \quad (1)$$

$$H_\theta = M \sin \theta / r^3, \quad (2)$$

где:

H_r и H_θ – нормальная (радиальная) и тангенциальная (касательная) составляющие (проекции) вектора напряженности $\mathbf{H}$, рис. 1;

r – расстояние между центром рамки и точкой N наблюдения поля;

θ – зенитный угол, измеряемый между аксиальной осью OZ рамки и направлением на точку наблюдения поля;

$M = IWS/4\pi$ – магнитный момент рамки;

$I = I_{\max} \sin \omega t$ – ток рамки;

W – количество витков рамки;

S – площадь среднего витка рамки;

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота тока рамки;

f – циклическая (цикл = период) частота тока рамки.

Вектор напряженности магнитного поля круговой рамки не зависит от азимутального угла точки наблюдения поля, т. е. от угла между осью OX и проекций радиуса-вектора r на плоскость XOY .

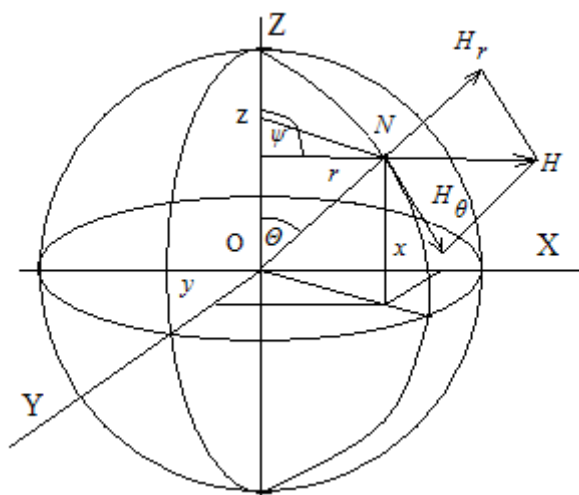


Рис. 1. Напряженность магнитного поля рамки в сферической системе координат

Для точек экваториальной плоскости XOY , совпадающей с плоскостью рамки, зенитный угол $\theta = 90^\circ$, поэтому радиальная составляющая H_r отсутствует и напряженность содержит только тангенциальную составляющую H_θ :

$$H = M/r^3.$$

Равносигнальные линии (РСЛ) напряженности образуют в плоскости рамки концентрические окружности, центр которых совпадает с центром рамки. Радиус РСЛ с модулем вектора напряженности $H = \text{const}$:

$$r = \sqrt[3]{M/H}.$$

В меридиональной плоскости XOZ , которая проходит через аксиальную ось OZ рамки, зенитный угол $0 \leq \theta \leq 360^\circ$ и, согласно (1) и (2), равносигнальные линии радиальной и тангенциальной составляющих вектора напряженности образуют парные, соприкасающиеся в центре рамки, замкнутые кривые, рис. 2.

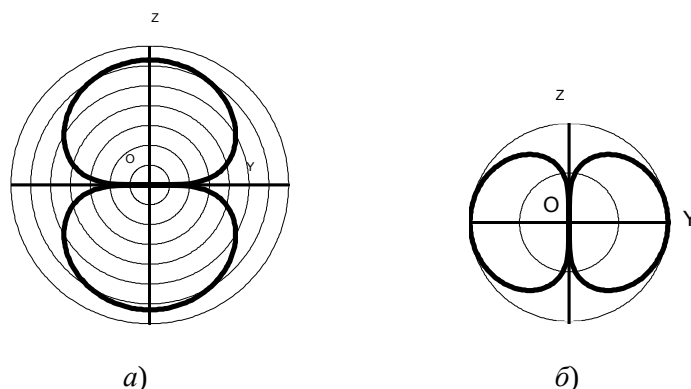


Рис. 2. Форма РСЛ нормальной (а) и тангенциальной (б) составляющих вектора напряженности магнитного поля рамки

Для точек на оси OZ угол $\theta = 0$, поэтому модуль вектора напряженности H_r вдоль этой оси в два раза больше, чем для точек экваториальной плоскости на таком же расстоянии от центра рамки.

Угол ψ между осью OZ рамки и вектором напряженности в меридиональной плоскости:

$$\psi = \theta + \operatorname{arctg} \frac{H_\theta}{H_r} = \theta + \operatorname{arctg}(0,5 \operatorname{tg} \theta).$$

Изменение зенитного угла θ на $d\theta$ изменяет угол ψ на $d\psi$, причем

$$\frac{d\psi}{d\theta} = 1 + \frac{2}{3 \cos^2 \theta + 1}.$$

Вблизи оси OZ рамки $\theta \approx 0$, поэтому здесь $d\psi \approx 1,5 d\theta$. Вблизи плоскости рамки $\theta \approx 90$, поэтому $d\psi \approx 3 d\theta$, т. е. изменению зенитного угла θ на 1° соответствует изменение пространственного угла ψ на 3° .

Модуль напряженности магнитного поля в меридиональной плоскости в полярной системе координат описывается уравнением:

$$H = \sqrt{H_r^2 + H_\theta^2} = \frac{M}{r^3} \sqrt{\sin^2 \theta + 4 \cos^2 \theta} = \frac{M}{r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}.$$

Откуда уравнение равносигнальных линий (РСЛ) $H = \text{const}$ в полярной системе координат:

$$r = \sqrt[3]{\frac{M}{H} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}} = K \sqrt[6]{1 + 3 \cos^2 \theta}.$$

На рис. 3 показаны РСЛ модуля вектора напряженности в меридиональной плоскости, напряженность которых различается в 3 и 9 раз.

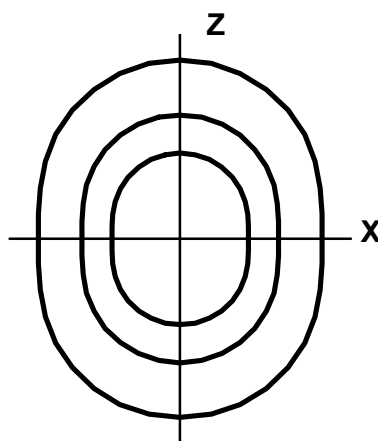


Рис. 3. Форма РСЛ модуля вектора напряженности в меридиональной плоскости рамки

2. Определение взаимного положения МТА при движении шеренгой

Измерение интервала

Совместим начало прямоугольной системы координат OXYZ с центром рамки и направим ось OX параллельно продольной оси лидера, а ось OY – горизонтально в боковом направлении; при движении агрегатов шеренгой датчик напряженности магнитного поля, установленный на дублёре, располагается вблизи оси OY, рис. 4.

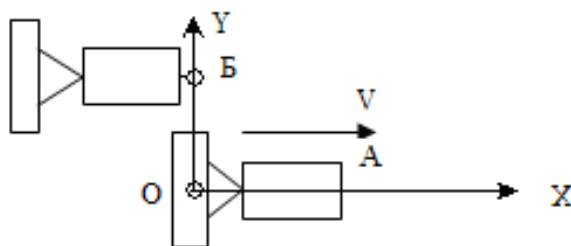


Рис. 4. Взаимное положение лидера (А) и дублера (Б) при движении шеренгой

Если датчик напряженности находится в плоскости рамки, то $\theta = 0$, поэтому алгоритм формирования сигнала траекторного рассогласования:

$$\delta = H - H_0 = \frac{M}{\sqrt{x^2 + y^2}^3} - H_0,$$

где H_0 – требуемое (опорное, плановое) значение напряженности, соответствующее $\delta = 0$.

Динамическая чувствительность K устройств местоопределения обратно пропорциональна четвертой степени интервала y :

$$K = \frac{d\delta}{dy} = 3M \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}^5}.$$

Будем определять положение лидера на местности местонахождением рамки, а дублера – местонахождением датчика напряженности. Тогда при изменении дистанции x взаимное перемещение агрегатов осуществляется по дуге окружности, радиус r которой равен требуемому расстоянию между рамкой и датчиком напряженности. При этом отклонение Δy ведомого агрегата от прямой линии составит:

$$\Delta y = r - \sqrt{r^2 - x^2} \approx x^2/(2y).$$

Так, если $y = 10$ м, то изменение дистанции x в диапазоне $x = \pm 2$ м вызывает погрешность местоопределения $\Delta y \approx 4/20 = 0,2$ м, или $\pm 0,1$ м от срединной линии $y = 9,9$ м.

Следствием кубической зависимости напряженности от расстояния r является низкая чувствительность устройств, реализующих этот метод, к изменению магнитного момента (тока) рамки: изменение напряженности магнитного поля на 1 % изменяет расстояние r на 0,33 %.

В процессе движения агрегатов меняются их углы крена, галопирования и рыскания. При измерении модуля напряженности изменение пространственной ориентации датчика напряженности не оказывает влияния на результат измерения и не вызывает дополнительной погрешности местоопределения. В то же время крен рамки изменяет зенитный угол $\theta = 90^\circ$ на величину угла крена, который может достигать 6° . Величина погрешности местоопределения при этом может достигать значения

$$\Delta y = 100 (\sqrt[6]{1 + 3(\cos 84^\circ)^2} - 1) = 0,54 \%,$$

что при $y = 10$ м увеличит интервал до $y = 10,054$ м.

Галопирование рамки изменяет высоту и/или наклон рамки, что практически не влияет на измеряемое значение модуля вектора напряженности, поскольку угол θ не меняется или меняется незначительно.

Поскольку вектор напряженности перпендикулярен к плоскости рамки, то измерение модуля можно заменить измерением его проекции на вертикальную ось дублера, что технически проще. При этом изменится влияние крена; крен дублера на 6° уменьшит измеряемое значение напряженности на 0,55 %, а расстояние между агрегатами – на 0,18 %.

При измерении проекции вектора напряженности на вертикальную ось дублера максимальное влияние крена имеет место при одновременном наклоне рамки и датчика проекции вектора напряженности в одну сторону. В качестве примера в табл. 1 приведены результаты расчета для угла крена $(90 - \theta)$ при значении интервала $y = 10$ м и дистанции $x = 0$.

Таблица 1. Влияние одностороннего наклона рамки и датчика проекции вектора напряженности на измеряемые параметры магнитного поля и на величину интервала r

$(90-\theta)^\circ$	0	1	2	3	4	5	6
θ°	90	89	88	87	86	85	84
H , о. е.	1000	1000,457	1001,825	1004,100	1007,273	1011,330	1016,257
ψ°	180	177,0006	174,0049	171,0164	168,0386	165,075	162,1288
$(\psi-\theta)^\circ$	0	2,999391	5,995138	8,98364	11,96138	14,92499	17,87122
H_θ , о. е.	1000	999,0862	996,3461	991,7828	985,4021	977,2116	967,2214
r , м	10	9,997	9,988	9,973	9,951	9,923	9,890

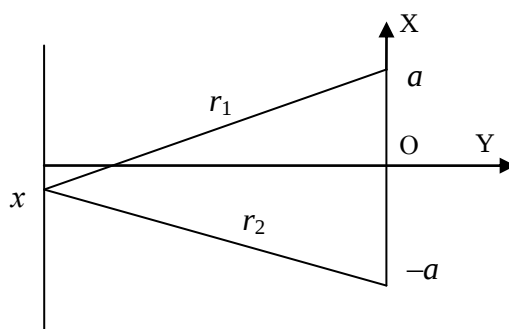
Наклон рамки и датчика проекции вектора напряженности в противоположные стороны изменяет угол между осью проекции и вектором напряженности на величину угла крена, т. е. в три раза меньше по сравнению с вариантом одностороннего крена. Соответственно, погрешность измерения бокового смещения составит при этом $10 - 9,988 = 0,012$ м.

Измерение дистанции

Для повышения точности траекторного управления дублера следует поддерживать дистанцию по возможности постоянной. С этой целью можно использовать разностно-амплитудный метод измерения, который позволяет формировать сигнал отклонения дистанции от требуемого значения по разности напряженностей, измеряемых на ведомом агрегате в точках a и $-a$, рис. 5. Опуская постоянные множители, алгоритм формирования сигнала рассогласования дистанции можно представить в виде:

$$\delta_d = H_1 - H_2 \equiv \frac{1}{r_1^3} - \frac{1}{r_2^3} = \frac{1}{\sqrt{(a-x)^2 + y^2}^3} - \frac{1}{\sqrt{(a+x)^2 + y^2}^3},$$

где H_1 и H_2 – значения модуля вектора напряженности в точках измерения.

**Рис. 5.** Разностно-амплитудный метод измерения дистанции при движении агрегатов шеренгой

Чувствительность устройств измерения дистанции, реализующих данный метод:

$$K_d = \frac{d\delta_d}{dx} \approx 6 \frac{a}{r^5}.$$

С целью повышения стабильности чувствительности базу измерения $2a$ целесообразно выбирать по возможности больше, например близкой к длине агрегата. Так, если $2a = 10$ м, то изменение бокового смещения (ширины захвата) агрегатов с 7 до 15 м изменит чувствительность не в 32, а только в 20 раз.

Устройство измерения дистанции может быть независимым от устройства измерения интервала. Поскольку взаимное боковое смещение ведущего и ведомого агрегатов равно ширине захвата агрегируемых машин, то, располагая рамку и датчик напряженности на их внутренних частях (рис. 6), можно измерять дистанцию амплитудным методом:

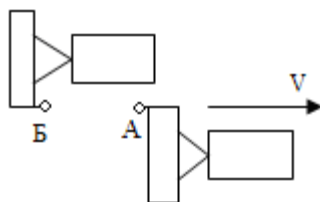


Рис. 6. Взаимное расположение рамки (А) и датчика напряженности (Б) при измерении дистанции амплитудным методом

Алгоритм формирования сигнала рассогласования дистанции амплитудным методом:

$$\delta_d = H - H_0 \equiv (1/x^3 - H_0),$$

где H_0 – компенсационный сигнал, равный напряженности при плановом значении дистанции.

Чувствительность амплитудных устройств измерения дистанции:

$$K_d = \frac{d\delta_d}{dx} \equiv \frac{1}{x^4}.$$

Таким образом, увеличение дистанции в 2 раза снижает чувствительность в $2^4 = 16$ раз.

Суммарно-амплитудные методы измерения интервала

Погрешность измерения интервала, вызываемую кривизной РСЛ модуля напряженности и изменением дистанции, можно существенно уменьшить, если создавать магнитное поле с помощью двух и более рамок с синфазными или противофазными токами.

Пусть расстояние между центрами двух одинаковых рамок равно $2a$, плоскости рамок совпадают и их магнитные моменты одинаковые. Тогда в прямоугольной системе координат ХОУ, начало которой расположено посередине между рамками, а ось ОХ проходит через центры рамок, напряженность H результирующего магнитного поля выразится уравнением:

$$H = H_1 + H_2 = M(r_1^3 + r_2^3)/(r_1 r_2)^3 = M \frac{\sqrt{y^2 + (a+x)^2}^3 + \sqrt{y^2 + (a-x)^2}^3}{\sqrt{(y^2 + (a-x)^2)}^3 \sqrt{y^2 + (a+x)^2}^3}.$$

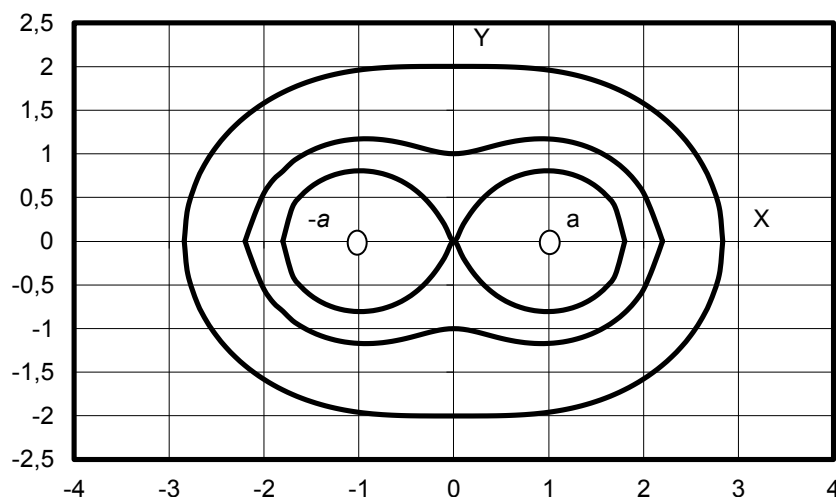


Рис. 7. Форма РСЛ модуля вектора напряженности двух синфазных рамок

Форма РСЛ $H = \text{const}$ зависит от местоположения точки на оси ОУ, через которую проходит данная РСЛ. Если $y_0 > 2a$, то РСЛ образуют овал, который при $y_0 \gg 2a$ превращается в окружность. При $0 < y_0 < 2a$ РСЛ принимают форму «овала с талией» («овала Кассини»); при $y_0 = 0$ РСЛ образует «восьмерку», рис. 7. При дальнейшем увеличении напряженности РСЛ

«восьмерка» превращается в две не соприкасающиеся друг с другом деформированные окружности вокруг каждой рамки.

В табл. 2 приведены координаты точек РСЛ в наименее искривленной части. Уровни напряженности смежных РСЛ отличаются в два раза; уровень $H = 32$ (относительные единицы) соответствует напряженности в начале системы координат ($x = 0, y = 0$). За относительную единицу расстояния принято $\frac{1}{2}$ расстояния $2a$ между центрами рамок ($a = 1$); начало координат совмещено с серединой базы $2a$.

Таблица 2. Координаты точек РСЛ суммарного магнитного поля двух рамок

x/a	Координаты y/a точек РСЛ при значениях напряженности H , отн. ед.					
	$H = 32$	$H = 16$	$H = 8$	$H = 4$	$H = 2$	$H = 1$
0	0	0,766	1,234	1,732	2,313	3,013
0,1	0,194	0,780	1,238	1,733	2,312	3,012
0,2	0,355	0,815	1,247	1,735	2,311	3,01
0,3	0,483	0,858	1,263	1,737	2,308	3,005
0,4	0,582	0,903	1,280	1,740	2,305	3,000
0,5	0,658	0,944	1,298	1,743	2,300	2,992
0,6	0,716	0,977	1,313	1,744	2,294	2,983
0,7	0,758	1,004	1,323	1,743	2,285	2,970
0,8	0,787	1,021	1,330	1,740	2,275	2,957
0,9	0,803	1,030	1,332	1,733	2,262	2,942
1,0	0,807	1,031	1,327	1,723	2,246	2,924
1,1	0,799	1,023	1,317	1,708	2,228	2,904
1,2	0,779	1,005	1,299	1,689	2,207	2,881
1,3	0,745	0,978	1,275	1,664	2,182	2,856
1,4	0,696	0,938	1,242	1,636	2,154	2,828
1,5	0,626	0,887	1,202	1,602	2,121	2,797
1,6	0,530	0,821	1,151	1,56	2,085	2,764
1,7	0,388	0,735	1,090	1,512	2,044	2,727
1,8	0	0,624	1,017	1,456	1,997	2,687

Данные табл. 2 показывает, что для РСЛ с $y_0 = 1,732a$ изменение координаты x в диапазоне $\pm 0,9a$ изменяет координату y не более чем на $\pm 0,35\%$. Располагая одну рамку впереди трактора-лидера, а вторую – на конце агрегируемой машины, значение базы $2a$ можно увеличить до 10 м и более. Тогда высокая точность измерения интервала будет сохраняться при изменении дистанции на ± 9 м и более.

Расширить диапазон значений y , при которых кривизна РСЛ не превышает заданного значения, можно при помощи третьей рамки в начале системы координат (рис. 8).

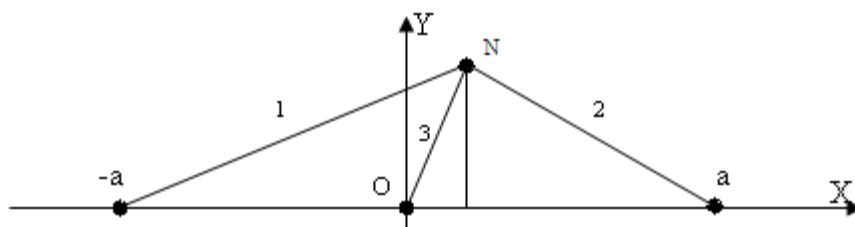


Рис. 8. Создание напряженности магнитного поля в точке N тремя рамками

В точке с координатами (x, y) напряженность магнитного поля H трех рамок:

$$H = \frac{1}{\sqrt{(a+x)^2 + y^2}^3} \pm \frac{M_3}{\sqrt{x^2 + y^2}^3} + \frac{1}{\sqrt{(a-x)^2 + y^2}^3}, \quad (3)$$

где M_3 – относительный (относительно крайних) магнитный момент средней рамки.

Результаты численного решения (3) показаны в табл. 3, где в первой строке приведены значения напряженности РСЛ суммарного поля, относительно которой определяется положение дублера. Во второй строке находятся требуемые относительные значения магнитного момента средней рамки; магнитные моменты крайних рамок равны и приняты за единицу.

Таблица 3. Координаты точек РСЛ суммарного магнитного поля трех рамок

H , о.е.	1379	454	179	76,85	33,25
M_3 , о.е.	0,672	0,380	0	-0,45	-0,810
x/a			y/a		
0	1	1,5000	2,0000	2,5000	3,0000
0,1	0,9994	1,5000	1,9995	2,5000	3,0001
0,2	0,9978	1,5004	1,9994	2,5001	3,0003
0,3	0,9960	1,5007	1,9990	2,5000	3,0006
0,4	0,9953	1,5007	1,9981	2,4996	3,0007
0,5	0,9961	1,4998	1,9961	2,4985	3,0003
0,6	0,9981	1,4976	1,9928	2,4964	2,9994
0,7	0,9999	1,4934	1,9877	2,4929	2,9974
0,8	0,9995	1,4865	1,9803	2,4877	2,9942
0,9	0,9952	1,4763	1,9703	2,4805	2,9896
1,0	0,9852	1,4622	1,9573	2,4710	2,9831
1,1	0,9682	1,4436	1,9409	2,4589	2,9748

Зависимость бокового смещения точек РСЛ $y_0 = 1,5a$ от магнитного момента M_3 и дистанции x показана на рис. 9. Как видно, уменьшение M_3 увеличивает допустимый диапазон изменения дистанции, но вместе с тем увеличивает погрешность местоопределения трактора-дублера.

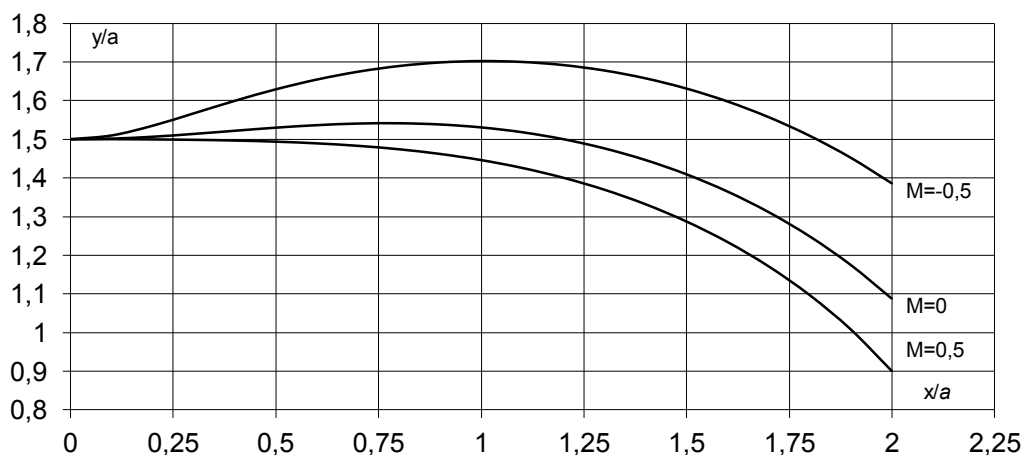


Рис. 9. Форма РСЛ суммарного магнитного поля трех рамок при различных значениях магнитного момента средней рамки

Однорамочный суммарно-амплитудный метод измерения интервала

Этот метод обеспечивает такое же качество местоопределения, как и предыдущий, но отличается от него созданием магнитного поля с помощью одной рамки и измерением напряженности в трех точках, расположенных аналогично положению рамок по предыдущему методу [2]. Применение одной рамки может упростить конструкцию навигационного устройства, а применение трех датчиков напряженности с регулируемыми коэффициентами передачи упрощает его переналадку.

Многочастотный суммарно-амплитудный метод измерения интервала

Отличается питанием рамок токами разной частоты, что позволяет отдельно измерять напряженности, создаваемые каждой рамкой; датчики напряженности могут быть разнесены в пространстве, что создает дополнительные предпосылки для повышения прямолинейности равносигнальных линий напряженности.

Вычислительный метод

Измеряя дистанцию амплитудным методом:

$$x = (1/H_d)^{1/3}$$

и вычисляя расстояние r до рамки по напряженности H_n , измеряемой датчиком интервала:

$$r = (1/H_n)^{1/3},$$

можно вычислять истинное значение взаимного бокового смещения агрегатов:

$$y = (r^2 - x^2)^{1/2} = [(1/H_n)^{2/3} - (1/H_d)^{2/3}]^{1/2}.$$

На практике нет необходимости извлекать квадратный корень из $(r^2 - x^2)$, поскольку условию $y = \text{const}$ соответствует $y^2 = \text{const}$. В этом случае алгоритм формирования сигнала траекторного рассогласования

$$\delta = y^2 - y_0^2 = (1/H_n)^{2/3} - (1/H_d)^{2/3} - y_0^2,$$

где y_0 – заданное (требуемое) значение интервала.

При этом чувствительность устройств измерения интервала не зависит от величины дистанции, но пропорциональна первой степени интервала, увеличение которого пропорционально увеличивает чувствительность:

$$K = \frac{d(y^2)}{dy} = 2y.$$

3. Местоопределение МТА при движении колонной*Разностно-амплитудный метод измерения интервала*

При движении колонной, когда траектория датчика напряженности совпадает с траекторией источника магнитного поля, интервал между ведущим и ведомым агрегатами можно определять разностно-амплитудным методом, аналогичным измерению дистанции при движении шеренгой:

$$\delta = H_1 - H_2. \quad (4)$$

При этом в обоих случаях алгоритм местоопределения, технические средства его реализации и параметры местоопределения одинаковые. Однако требования к навигационным устройствам разные, т. к. требуемая точность измерения интервала много выше, чем дистанции при движении шеренгой.

Пусть измерительная база (расстояние между двумя датчиками напряженности) $2a$ параллельна поперечной оси трактора-дублера. Расположим начало прямоугольной системы координат ОХУZ посередине между датчиками напряженности и направим ось ОХ параллельно продольной оси трактора, а ось ОУ совместим с базой $2a$. Пусть также коэффициенты передачи датчиков неодинаковы и равны K_1 и K_2 . Тогда, приняв $K_1 = 1$ о. е. и обозначив $K_2/K_1 = K$, уравнение (4) можно записать:

$$\delta = H_1 - KH_2 = \frac{1}{r_1^3} - \frac{K}{r_2^3} = \frac{1}{\sqrt{(a-y)^2 + x^2}^3} - \frac{K}{\sqrt{(a+y)^2 + x^2}^3}.$$

Линия возможного взаимного положения лидера и дублера удовлетворяет условию $\delta = 0$, поэтому для точек этой линии справедливо:

$$K = \sqrt{\frac{(y+a)^2 + x^2}{(y-a)^2 + x^2}}^3.$$

После возведения обеих частей в степень $2/3$ выражение приводится к виду

$$x^2 + y^2 - 2ay \frac{K^{2/3} + 1}{K^{2/3} - 1} + a^2 = 0 \quad (5)$$

и описывает окружность, центр которой лежит на оси ОУ в точке с координатами:

$$x_{ц} = 0; \quad y_{ц} = a \frac{K^{2/3} + 1}{K^{2/3} - 1},$$

причем радиус окружности $R = 2a \frac{K^{1/3}}{K^{2/3} - 1}$.

Согласно (5)

$$y = a \frac{K^{2/3} + 1}{K^{2/3} - 1} \pm \sqrt{a^2 \left[\left(\frac{K^{2/3} + 1}{K^{2/3} - 1} \right)^2 - 1 \right] - x^2}.$$

Решения этого уравнения числовым методом при $a = 1$ и разности коэффициентов передачи датчиков напряженности на 1, 2 и 3 % показаны на рис. 10.

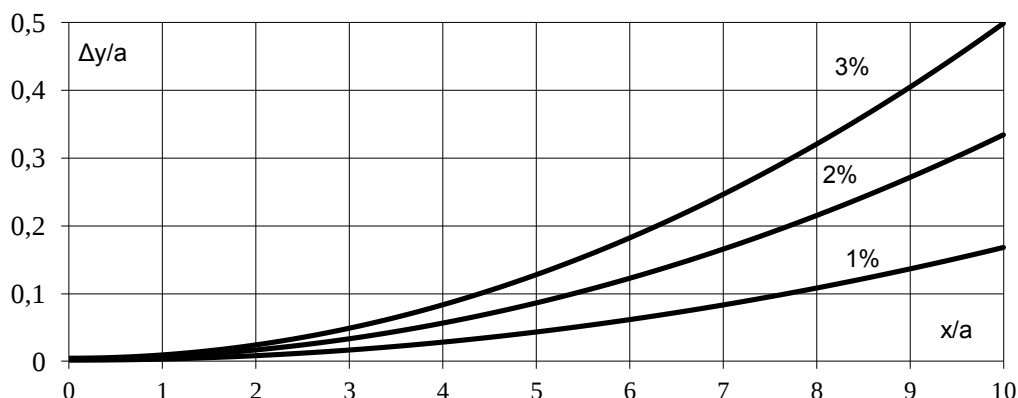


Рис. 10. Зависимость погрешности местоопределения Δy от дистанции x и отношения коэффициентов передачи датчиков напряженности

Начальная динамическая чувствительность УМО:

$$K = \frac{d\delta}{dy} = \frac{6a}{\sqrt{(a^2 + x^2)^5}}.$$

Крен базы вызывает боковое перемещение датчиков напряженности и сигнал погрешности местоопределения, который пропорционален высоте датчиков над землей.

Галопирование дублера оказывает одинаковое влияние на оба датчика напряженности, поэтому не вызывает дополнительной погрешности местоопределения.

Кинематическая траектория дублера

При идентичности левого и правого каналов измерения напряженности УМО сигнал траекторного рассогласования отсутствует, если перпендикуляр к середине базы $2a$ проходит через центр рамки. Изменение направления движения рамки в первый момент не отражается на измеряемых значениях напряженности, и ведомый агрегат сохраняет исходное направление движения. Однако по мере бокового смещения рамки в ту или другую сторону между центром рамки и перпендикуляром к середине базы появляется рассогласование, в результате чего направление движения дублера изменяется в сторону рамки.

Если ведущий агрегат движется по криволинейной траектории, то ведомый компенсирует рассогласования, перемещаясь по «линии погони», частным случаем которой является трактриса. Это обеспечивает сглаживание дублером искривлений траектории лидера, что по-

вышает прямолинейность прохода ведомого агрегата на рабочем гоне, однако может вызывать значительный «занос» при движении по дорогам и объезде препятствий [1].

Если ведущий агрегат меняет направление движения на 90° и перемещается прямолинейно вдоль оси ОХ, то ведомый устраняет появившееся рассогласование интервала y , приближаясь к установившемуся положению $y = 0$ по трактрисе, уравнение которой

$$D \ln \frac{D + \sqrt{D^2 - y^2}}{y} - \sqrt{D^2 - y^2} = x,$$

где D – дистанция между агрегатами.

Эта же формула описывает кинематическую траекторию дублера при «изломе» траектории лидера на произвольный угол α в прямоугольной системе координат ХОУ, ось ОХ которой совпадает с новым направлением движения лидера, а ось ОУ проходит через начальное место дублера.

Если ведущий агрегат движется по дуге окружности радиусом R , то в установившемся режиме ведомый агрегат будет двигаться по дуге окружности радиусом $r = \sqrt{R^2 - D^2}$; переход от прямолинейного движения параллельно оси ОХ к движению по дуге окружности произойдет на расстоянии, равном дистанции D . Уравнение траектории дублера на участке перехода от прямолинейного движения к движению по дуге окружности можно определить следующим образом:

1. Координата y лидера (рамки):

$$y_{\text{л}} = \sqrt{R^2 - x_{\text{л}}^2};$$

2. Угол α между направлением движения дублера и осью ОХ (первоначальным прямолинейным направлением движения):

$$\alpha = \arctg(dy_{\text{л}}/dx) = \arcsin \frac{y'}{\sqrt{1 + (y')^2}};$$

3. Координата y дублера:

$$y_{\text{д}} = y_{\text{л}} - D \sin \alpha = y_{\text{л}} - D \frac{y'}{\sqrt{1 + (y')^2}};$$

4. Траекторию дублера на переходном участке описывает дифференциальное уравнение

$$y_{\text{д}} - \sqrt{R^2 - x_{\text{л}}^2} + D \frac{y'}{\sqrt{1 + (y')^2}} = 0.$$

Двухрамочный метод

Согласно известному принципу взаимности перемещений, рамку с током можно заменить датчиком напряженности, а датчики – двумя рамками с противофазными токами. Тогда сигнал траекторного рассогласования снимается непосредственно с выхода датчика напряженности, а операция вычитания двух напряженностей обеспечивается формированием вектора напряженности суммарного магнитного поля векторным сложением напряженностей каждой рамки. Если обе рамки лежат в одной горизонтальной плоскости, расстояние между ними $2a$ и отношение магнитных моментов равно K , то линия нулевой напряженности суммарного магнитного поля описывается уравнением (5). При $K = 1$ линия нулевой напряженности совпадает с нормалью к середине базы $2a$ и может использоваться в качестве физической направляющей линии, относительно которой определяется местоположение датчика напряженности.

Фазовый метод определения взаимного положения агрегатов

Существенным недостатком двухрамочного метода является снижение напряженности суммарного магнитного поля вследствие вычитания напряженностей, создаваемых током каждой рамки. Но сравнивать можно не только действующие, но и мгновенные значения напряженностей, для чего рамки следует питать сдвинутыми по фазе токами.

Пусть, например, рамки питаются токами одинаковой величины, сдвинутыми по фазе на 90° . Тогда напряженность в плоскости рамок в произвольной точке с координатами (x, y) :

$$H_1 = \frac{1}{\sqrt{(a-y)^2 + x^2}^3}; H_2 = \frac{1}{\sqrt{(a+y)^2 + x^2}^3}; H_\Sigma = \sqrt{H_1^2 + H_2^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{H_2}{H_1} = \arctg \sqrt{\frac{(a-y)^2 + x^2}{(a+y)^2 + x^2}},$$

где φ – фазовый сдвиг суммарного магнитного поля относительно тока в первой рамке.

Зависимость фазового сдвига от дистанции при различных значениях бокового смещения y/a показана на рис. 11.

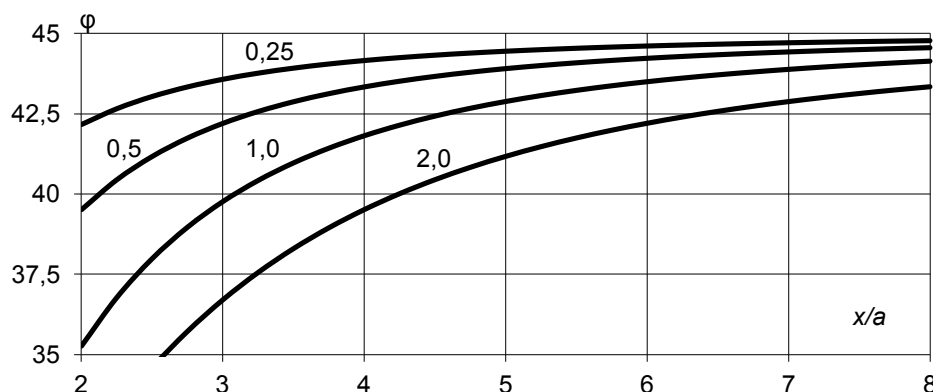


Рис. 11. Зависимость фазового сдвига от дистанции x/a и интервала y/a (цифры у графиков)

Изменение дистанции в два раза – от 3 до 6 м – снижает начальную чувствительность УМО с 5,7 до 1,54 град/м, т. е. в 3,7 раза.

Если магнитные моменты обеих рамок одинаковые, то изофаза $\varphi = 45^\circ$ представляет прямую, перпендикулярную к базе, или дугу окружности бесконечного радиуса, проведенную через середину базы. Изофазы с меньшими значениями фазового сдвига образуют окружности со стороны рамки с нулевой фазой, а с большими – со стороны рамки с фазой тока 90° градусов. В общем случае фазовый сдвиг результирующего магнитного поля в точке с координатами $(x; y)$:

$$\varphi = \arctg \frac{H_2}{H_1} = \arctg \frac{M_2}{M_1} \sqrt{\frac{(a-y)^2 + x^2}{(a+y)^2 + x^2}},$$

где M_2 и M_1 – магнитные моменты рамок.

Геометрическое место точек, координаты которых удовлетворяют условию $\varphi = \text{const}$, представляет окружность. Основные параметры некоторых из них приведены в табл. 4 при $M_2/M_1 = 2$, $a = 1$. Изменение отношения M_2/M_1 меняет значения фазового сдвига φ , однако форма изофаз, проходящих через одну и ту же точку $y_{\text{мин}}$, сохраняется неизменной.

Таблица 4. Параметры изофаз, проходящих через точки с координатами $(0; y_{\text{мин}})$ при $a = 1$

$y_{\text{мин}}$	φ , град	$y_{\text{мах}}$	R	$y_{\text{центра}}$
0	45,00000	∞	∞	∞
0,1	58,57043	10,0000	4,9500	5,0500
0,2	53,13010	5,0000	2,4000	2,6000
0,3	47,12110	3,3333	1,51665	1,81665
0,4	40,60129	2,5000	1,0500	1,4500
0,5	33,69007	2,0000	0,7500	1,2500
0,6	26,56505	1,6670	0,5335	1,1335
0,7	19,44003	1,4280	0,3640	1,0640
0,8	12,52881	1,2500	0,2250	1,0250
0,9	6,009006	1,1110	0,1055	1,0055

Круговая форма изофаз позволяет использовать их в качестве физических направляющих линий для определения взаимного положения агрегатов при движении не только колонной или шеренгой, но и «уступом», т. е. с интервалом, примерно равным дистанции.

4. Местоопределение МТА при движении агрегатов «уступом»

Пусть прямоугольная система координат XOY связана с базой $2a$ дублера и лидер находится в точке N с координатами (x, y) , рис. 12.

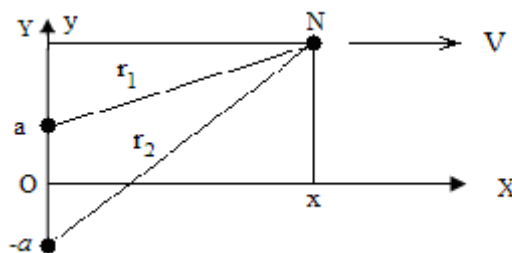


Рис. 12. Вычисление интервала между агрегатами

Тогда справедливо:

$$r_1^2 = x^2 + (y - a)^2;$$

$$r_2^2 = x^2 + (y + a)^2;$$

$$r_2^2 - r_1^2 = x^2 + (y + a)^2 - x^2 - (y - a)^2 = 4ay;$$

$$y = \frac{r_2^2 - r_1^2}{4a};$$

$$x = [r_1^2 - (y - a)^2]^{1/2}.$$

Так как $4a = \text{const}$ и $r = (H)^{1/3}$, то алгоритм вычисления интервала:

$$y = K(H_1^{2/3} - H_2^{2/3}),$$

где K – коэффициент, учитывающий конструктивные постоянные навигационного устройства определения местоположения лидера относительно горизонтальных осей дублера [3].

Положительным свойством метода вычислений является независимость результата вычислений от дистанции x . Это позволяет тракторам двигаться «уступом» с произвольным взаимным боковым смещением y в широком диапазоне изменения дистанции x . Погрешность измерения расстояний r_1 и r_2 вызывает погрешность Δy вычисления интервала:

$$\Delta y = y_1 - y_2 = \frac{r_{12}^2 - r_{11}^2}{4a} - \frac{r_{22}^2 - r_{21}^2}{4a}.$$

В [3] предложен способ оперативного программирования взаимного положения лидера и дублера при изменении дистанции между ними, обеспечивающий повышенную точность местоопределения. Он заключается в предварительном взаимном перемещении агрегатов в диапазоне возможного изменения дистанции и измерении напряженности в двух разнесенных в пространстве точках дублера. Одно из измеренных значений запоминается в ячейках памяти запоминающего устройства, адреса которых определяются измеренными значениями напряженности в другой точке дублера. В процессе дублерного вождения происходит обратный процесс – воспроизведение запомненных значений, которые используются в качестве плановых для сравнения с измеряемыми в первой точке, и формирование сигнала траекторного рассогласования как разности сравниваемых значений.

Достоинство такого программирования взаимного положения агрегатов в том, что все погрешности, включая влияние земли, обнуляются, и погрешность местоопределения определяется только нестабильностью параметров за время после программирования.

5. Влияние электрического сопротивления земли

Под действием переменного магнитного поля рамки в почве возникает ЭДС индукции и протекают токи индукции, которые создают вторичное магнитное поле, искажающее картину первичного магнитного поля. При этом напряженность вертикальной (тангенциальной) составляющей суммарного магнитного поля горизонтальной рамки описывается уравнением [4]:

$$H_{\theta} = \frac{M}{4\pi r^3} \left[1 + \frac{2\sqrt{2}}{15} p^2 - i \frac{p^2}{4} \left(1 - \frac{8\sqrt{2}}{15} p \right) \right],$$

где $p = 2,81 \cdot 10^{-3} r(f/\rho)^{1/2}$ – приведенное расстояние; f и ρ – частота магнитного поля (Гц) и удельное сопротивление земли (Ом·м); $i = \sqrt{-1}$ – символ реактивной компоненты тангенциальной составляющей магнитного поля.

Значения выражения в квадратных скобках (магнитного числа h) и угла $\Delta\psi$ отклонения вектора напряженности от нормали к плоскости рамки (угловых минут) для некоторых значений p приведены в табл. 5 [3].

Таблица 5. Зависимость магнитного числа и угла поворота вектора напряженности от приведенного расстояния точки наблюдения магнитного поля рамки

p	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
$ h $	1	1,0002	1,0013	1,0042	1,0094	1,0173	1,0279	1,0409	1,0562	1,0927
$\Delta\psi (^{\circ})$	0	8	29	60	96	134	171	203	229	254

Если принять максимально допустимое значение приведенного расстояния $p = 0,3$, удельное сопротивление земли $\rho = 30$ Ом·м, а расстояние между рамкой и точкой измерения напряженности $r = 10$ м, то максимально допустимая частота тока рамки $f = 3,4$ кГц. Но поскольку погрешность местоопределения связана не с абсолютной величиной вторичного магнитного поля, а только с его переменной частью, вызываемой неоднородностью земли, то реально частота магнитного поля может быть более высокой, что позволяет использовать малогабаритные датчики напряженности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калюжный А.Т. Магнитное поле кругового витка в зоне индукции // Инженерная служба села и задачи высокопроизводительного использования современной техники. Научные труды. ВАСХНИЛ, Сибирское отделение. – Новосибирск, 1979. – С. 48–53.
2. Калюжный А.Т., Емельянов М.В. Индукционное устройство для группового вождения широкозахватных тракторных агрегатов. – А.с. СССР № 829001; опубл. 15.05.1981, Б.И. № 18. Заявл. 30.11.1979.
3. Калюжный А.Т. Индукционная система дублирного вождения машинно-тракторных агрегатов. – А.с. СССР № 1246911; опубл. 30.07.1986, Б.И. № 28. Заявл. 04.10.1984.
4. Электроразведка. Справочник геофизика: в 2 кн. / Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко – Кн. 1. – М.: Недра, 1980. – С. 438.

Поступила 25.12.2013 г.