

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.

УДК 631.3:519.8

АНАЛИЗ ДАЛЬНОМЕРНЫХ МЕТОДОВ ИНДУКЦИОННОЙ СЕЛЬХОЗНАВИГАЦИИ

А.Т. Калюжный

Новосибирский государственный аграрный университет

E-mail: atik@ngs.ru

Выполнен анализ индукционных методов определения местоположения сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов относительно удаленного проводника с током. Установлены математические описания основных технических параметров устройств местоопределения, реализующих рассматриваемые методы.

Ключевые слова:

Индукционная навигация, местоопределение, изофаза, квазиволновое магнитное поле.

Введение

Сельскохозяйственная навигация – новое и вместе с тем достаточно развитое научное направление в наземной навигации. Новое – поскольку до настоящего времени остается непризнанным. Старое, поскольку устройства для автоматического направления движения пахотных агрегатов создавались одновременно с тракторами, а в 30-е годы прошлого столетия производились в промышленных масштабах [1].

За прошедшие годы предложено и экспериментально проверено большое количество всевозможных устройств местоопределения (УМО) сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов (МТА) при движении на гоне. Из них индукционные УМО являются одними из наиболее универсальных, автономных и достаточно простых в эксплуатации.

В [2] выполнен анализ методов местоопределения МТА при движении непосредственно над проводом. Такие методы могут найти применение при движении по стационарным траекториям или с незначительным смещением относительно провода. Их недостатком является необходимость закладки под пахотный слой почвы изолированных проводов. Ниже анализируются амплитудный и фазовый методы определения местоположения относительно провода, удаленного до нескольких десятков метров. В сочетании с методами [2] они позволяют организовать местоопределение и автоматическое управление движением МТА по произвольным траекториям в пределах всего сельскохозяйственного поля при расстояниях между проводами до 40 метров.

1. Амплитудный метод местоопределения МТА

Местоопределение в магнитном поле бесконечного провода

Индукционный амплитудный метод местоопределения МТА является аналогом радиотехнического дальномерного метода. Для его описания совместим ось ОХ прямоугольной системы координат ОХУZ с подземным прямолинейным проводом бесконечной длины, направив ось ОZ вертикально. Тогда расстояние r от точки наблюдения поля с координатами $(y; z)$ до провода:

$$r = \sqrt{y^2 + z^2}.$$

Согласно закону полного тока, напряженность магнитного поля, создаваемого током I в этой точке:

$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{I}{2\pi\sqrt{y^2 + z^2}}.$$

Алгоритм формирования сигнала траекторного рассогласования амплитудным методом как разности между измеренным и требуемым значениями напряженности [3. С. 107]:

$$\delta = H - C_k = \frac{I}{2\pi\sqrt{y^2 + z^2}} - C_k, \quad (1)$$

где $C_k \equiv 1/r_o$ – компенсационный сигнал, соответствующий напряженности в месте требуемого нахождения МТА (точнее – датчика напряженности магнитного поля).

Переходная характеристика УМО, т. е. зависимость сигнала траекторного рассогласования от бокового смещения, описывается уравнением (1). Динамическую чувствительность УМО определим дифференцированием (1) по y :

$$K = \frac{d\delta}{dy} = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{y}{\sqrt{(y^2 + z^2)^3}}. \quad (2)$$

Согласно (2), чувствительность амплитудных УМО равна нулю при $y = 0$ и $y \rightarrow \infty$. Для определения координаты y экстремальной точки, которой соответствует максимальная чувствительность, необходимо решить уравнение:

$$\frac{dK}{dy} = \frac{\sqrt{y^2 + z^2}^3 - 3y^2\sqrt{y^2 + z^2}}{(y^2 + z^2)^3} = 0$$

Откуда $y_{\text{экстр}} = \sqrt{0,5z^2} = 0,707z$.

Недостатком метода является низкая помехоустойчивость УМО к галопированию и крену трактора. Это объясняется тем, что алгоритм (1) обеспечивает соблюдение условия $r = \sqrt{y^2 + z^2} = r_o = \text{const}$, результатом чего является зависимость координаты y от z . Нетрудно убедиться, что изменение координаты z на величину Δz изменяет боковое смещение y на Δy :

$$\Delta y \approx \frac{z}{y} \Delta z.$$

В табл. 1 приведены расчетные значения напряженности магнитного поля H (строка 2) и динамической чувствительности УМО (строка 3) в относительных единицах. В строке 4 указан требуемый коэффициент усиления сигнала δ траекторного рассогласования, обеспечивающий стабильность зоны нечувствительности системы автоматического траекторного управления МТА независимо от расстояния y до провода. В строке 5 приведены требуемые относительные значения компенсационного сигнала, обеспечивающие необходимое боковое смещение y .

Таблица 1. Зависимость величины напряженности H и чувствительности УМО (в относительных единицах) от приведенного расстояния y/z .

y/z	0	0,250	0,500	0,707	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	10,000
H , о. е.	100	97,00	89,44	81,65	70,70	44,72	31,62	24,25	19,61	9,95
$K_{y,z}$, о. е.	0	22,82	35,78	38,48	35,35	17,89	9,49	5,70	3,77	0,98
$K_{(1)}/K_y$			0,99	0,92	1,00	1,98	3,72	6,20	9,38	36,00
C_k					1,000	0,630	0,447	0,343	0,277	0,141

Анализ данных табл. 1 показывает, что изменение бокового смещения от $y = z$ до $y = 10z$ снижает чувствительность УМО в $35,35/0,98 = 36$ раз. Поэтому для перехода с траектории $y = z$ на $y = 10z$ необходимо не только уменьшить величину компенсационного сигнала C_k в $1/0,141 = 7,1$ раз, но также увеличить коэффициент усиления выходного сигнала δ в 36 раз; последнее обеспечит одинаковую ширину зоны нечувствительности системы траекторного управления МТА на расстоянии $y = z$ и $y = 10z$.

Источником погрешности местоопределения является нестабильность тока провода и компенсационного сигнала. Можно показать, что изменение тока в $K_i = I_2/I_1$ раз вызывает абсолютную погрешность местоопределения Δy :

$$\Delta y \approx (y^2 + z^2)(K_i^2 - 1)/(2y). \quad (3)$$

Аналогичное влияние оказывает нестабильность компенсационного сигнала C_k .

В качестве примера в табл. 2 приведены значения абсолютной и относительной погрешности местоопределения при изменении тока на 1 %.

Таблица 2. Зависимость приведенной к высоте z погрешности местоопределения от величины бокового смещения при изменении тока в проводе на 1 %

y/z	0,75	1	2	3	4	5	6
$\Delta y/z$	0,020650	0,019900	0,024970	0,033320	0,042490	0,051990	0,061660
$\Delta y/y, \%$	2,753333	1,990000	1,248500	1,110667	1,062250	1,039800	1,027667

Уравнение (3) позволяет определить допустимую нестабильность тока K_i по допустимой погрешности местоопределения Δy в точке с координатами (y, z) :

$$K_i = \sqrt{\frac{2y(\Delta y)}{y^2 + z^2}} + 1.$$

Если датчик напряженности установлен в продольной вертикальной плоскости трактора, то крен сопровождается боковым перемещением датчика в сторону крена на расстояние, пропорциональное его высоте над землей. Смещение датчика относительно продольной плоскости в сторону провода увеличивает влияние крена; минимальное влияние наблюдается при расположении провода, центра вращения датчика и самого датчика на одной линии.

Метод можно реализовать, измеряя не модуль, а проекцию вектора напряженности. Но в этом случае сигнал траекторного рассогласования будет определяться не только геометрическим местом нахождения датчика, но и его пространственной ориентацией. Можно предположить, что определенная комбинация места нахождения датчика и его ориентации позволит снизить влияние крена на сигнал рассогласования, однако этот вопрос требует дополнительных исследований.

Местоопределение в магнитном поле провода конечной длины

Выше предполагался провод бесконечной длины. Для провода конечной длины, согласно закону Био-Савара, справедливо:

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

где β_1 и β_2 – углы между перпендикуляром к проводу и направлениями на концы провода, измеренные в точке наблюдения магнитного поля [4].

Разместим начало системы координат OXYZ в середине провода длиной $L = 2l$. Тогда для напряженности в произвольной точке с координатами (x, y, z) уравнение (4) принимает вид:

$$H = \frac{I}{4\pi\sqrt{y^2 + z^2}} \left(\frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + y^2 + z^2}} + \frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2 + y^2 + z^2}} \right). \quad (5)$$

Анализ (5) показывает, что при соблюдении условия $l \gg r = \sqrt{y^2 + z^2} = \text{const}$ изменение координаты x точки наблюдения поля от $x = 0$ до $x = l$ снижает напряженность в 2 раза. Другими словами, на краю провода восстановить исходное значение напряженности можно, уменьшив расстояние r до провода в два раза. Но так как высота z при этом остается постоянной, то изменение координаты y более двукратного. В качестве примера в табл. 3 приведены координаты точек равноточных линий (РСЛ) напряженности при $L = 2l = 1000$ м на высоте $z = 0$ и $z = 2$ м.

Таблица 3. Координаты точек РСЛ; x – расстояние от середины провода

x , м	0	300	400	450	470	480	490	495	500
$y(z = 0)$, м	5,000	5,000	4,998	4,990	4,980	4,930	4,770	4,382	2,500
$y(z = 2)$, м	5,000	5,000	4,996	4,986	4,963	4,912	4,700	4,230	1,800
$y(z = 2)$, м	10,000	9,990	9,970	9,900	9,741	9,477	8,677	7,580	4,690

Данные табл. 3 показывают, что если расстояние между смежными проводами $B = 20$ м, то на расстоянии 50 м до конца провода «клин» между смежными проходами при переориентации МТА на соседний провод может достигь $(20 - 2 \times 9,9) = 0,2$ м. И даже на расстоянии 100 м до конца провода клин может составить $(20 - 2 \times 9,97) = 0,06$ м.

Местоопределение в магнитном поле заземленного провода

При создании магнитного поля током заземленного на концах провода измеряемое значение напряженности равно векторной сумме напряженностей, создаваемых током провода и заземлителей. Для определения формы РСЛ суммарного магнитного поля, создаваемого прямым током в проводе и обратным током в земле, удобно пользоваться следующей методикой:

- разложить векторы напряженности, создаваемые током провода и заземлителя, на составляющие по осям проекций ОХ, ОУ и ОZ;
- алгебраически (с учетом направлений) сложить одноименные проекции;
- определить модуль вектора напряженности суммарного поля Н:

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}. \quad (6)$$

Поперечные составляющие H_y полей, создаваемых током провода и заземлителей, направлены встречно. Поэтому напряженность суммарного поля ниже напряженности поля, создаваемого током провода. В результате искривление РСЛ суммарного поля на высоте 2 м увеличивается, за исключением непосредственной близости от заземлителя, табл. 2.

Результаты вычисления координат точек РСЛ заземленного провода 1000 м с учетом заземлителя на высоте $z = 2$ м приведены в табл. 4.

Таблица 4. Координаты точек РСЛ провода $L = 1000$ м на высоте $z = 2$ м с учетом магнитного поля тока заземлителя

x , м	0	300	350	400	430	450	470	480	490	495	500
y , м	5	4,982	4,972	4,952	4,926	4,889	4,803	4,695	4,388	3,933	2,853
y , м	10	9,967	9,947	9,906	9,850	9,772	9,579	9,336	8,724	8,012	6,533

Местоопределение в магнитном поле прямоугольной петли

Магнитное поле можно создавать при помощи изолированной от земли петли, что исключает заземлители и их отрицательное влияние на суммарное магнитное поле. Но при этом добавляется влияние магнитного поля, создаваемого током остальных сторон петли [5].

Пусть длина прямоугольной петли $L = 2l$, а ширина $B = 2b$. Разместим начало прямоугольной системы координат ОХУZ в центре петли, направив ось ОХ параллельно длинной стороне, а ось ОZ – вертикально. Тогда напряженность суммарного магнитного поля в точке М с произвольными координатами (y ; z), рис. 1:

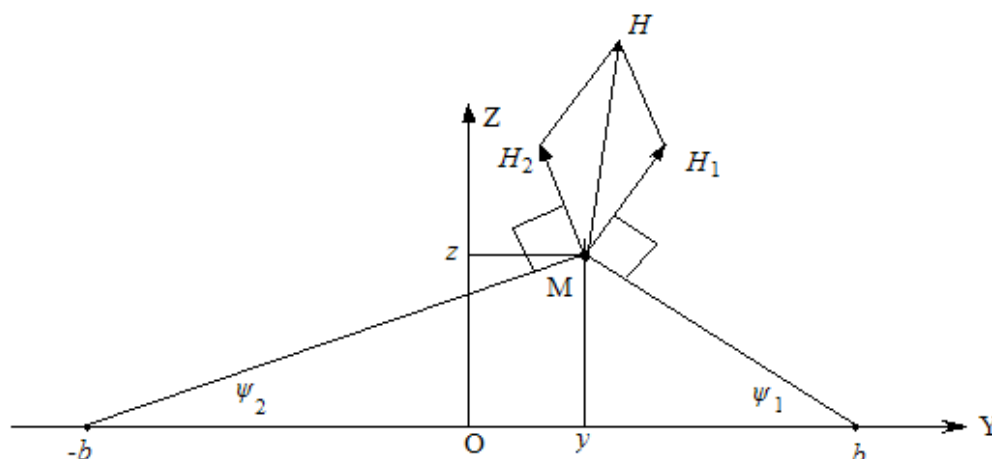


Рис. 1. Формирование суммарного поля прямого и обратного токов петли

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + 2H_1H_2 \cos(\psi_1 + \psi_2)},$$

где H_1 и H_2 – действующие значения напряженностей, создаваемых прямым и обратным током; $(\psi_1 + \psi_2)$ – угол между векторами напряженности H_1 и H_2 .

Результаты вычисления напряженности вдоль оси ОУ бесконечно длинной петли шириной $B = 40$ м на высоте $z = 2$ м приведены в табл. 5.

Таблица 5. Распределение напряженности поперек длинной петли при $B = 40$ м, $z = 2$ м

y	0	5	10	15	20	25	30	35	40
ψ_1	0,1000	0,1326	0,1974	0,3805	1,5708	2,7610	2,9442	3,0090	3,04191
ψ_2	0,1000	0,0798	0,0666	0,0571	0,0500	0,044	0,0400	0,0363	0,03332
H_1	49,7500	66,0820	98,0580	185,7000	500,0000	185,700	98,0580	66,0820	49,7519
H_2	49,7500	39,8730	33,2600	28,5250	24,9690	22,2000	19,9840	18,1700	16,6574
H	99,0100	105,3900	130,4500	211,8800	501,8700	164,9000	78,3840	48,0280	33,1495

В выбранной системе координат точки с координатами $y < 20$ м расположены внутри петли, с координатами $y > 20$ м – снаружи. Данные табл. 5 показывают, что напряженность внутри петли более равномерная, чем снаружи на таком же расстоянии от провода. Поэтому чувствительность УМО при местоопределении МТА снаружи петли выше, чем внутри.

Результаты вычисления координат РСЛ снаружи и внутри петли 1000×40 м на высоте 2 м приведены в табл. 6; здесь координата x отсчитывается от середины петли, а Δy – от провода.

Таблица 6. Координаты точек РСЛ ± 5 и ± 10 м снаружи и внутри петли 1000×40 м (Δy измеряется от провода)

x, м	0	300	350	400	430	450	470	480	490	500
Δy , м	-10	-10,020	-10,050	-10,110	-10,240	-10,470	-11,335	-13,360		
	-5	-5,006	-5,010	-5,030	-5,060	-5,116	-5,290	-5,600	-7,220	
	5	4,995	4,990	4,977	4,952	4,911	4,802	4,656	4,260	2,333
	10	9,987	9,974	9,938	9,857	9,689	9,357	8,908	8,018	5,374

Снижение влияния краевых эффектов

Как видно из рассмотренных примеров, краевые эффекты приводят к заметному искривлению РСЛ, что в случае их использования в качестве программы движения снижает точность местоопределения МТА. Повысить прямолинейность РСЛ можно посредством выноса окончаний токонесущего провода за пределы рабочего участка МТА на десятки метров, что не всегда возможно. Более универсальный, но и более сложный способ обеспечения высокой ста-

бильности бокового смещения МТА относительно провода заключается в изменении компенсационного сигнала в функции продольной координаты x согласно закону изменения напряженности вдоль требуемой траектории МТА. Так, уравнение (5) позволяет формировать величину компенсационного сигнала по исходным данным и измеряемому значению пройденного пути x . При этом необходимая точность измерения координаты x определяется допустимым отклонением формируемого сигнала рассогласования от требуемого значения. Например, при движении МТА вдоль прямой $\Delta y = 10$ м снаружи петли 1000×40 м (табл. 6) изменение продольной координаты МТА от $x = 480$ м до $x = 481$ м искривляет РСЛ на $0,07$ м, поэтому ошибка $\Delta x = 1$ м может вызывать ошибку местоопределения $\Delta y = 0,07$ м.

Другие варианты амплитудного метода

Недостатком рассмотренного метода является снижение помехоустойчивости к внешним электромагнитным помехам по мере удаления от провода вследствие ухудшения соотношения сигнал/шум. Этот недостаток можно устранить, осуществляя переход агрегата на смежный проход изменением не компенсационного сигнала C_k , а силы тока I .

В табл. 7 приведены результаты расчета требуемого тока и коэффициента усиления сигнала траекторного рассогласования δ при местоопределении с постоянным компенсирующим сигналом.

Таблица 7. Зависимость требуемого тока провода и коэффициента усиления сигнала рассогласования от бокового смещения МТА относительно провода y/z

y/z	0,75	1	2	3	4	5	7	10
I/I_1	0,884	1,000	1,580	2,236	2,915	3,606	5,000	7,106
K/K_1	1,042	1,000	1,250	1,667	2,125	2,600	3,571	5,050

Если, например, $z = 2$ м и расстояние между смежными проводами $B = 20$ м, то для смещении МТА с 2 до 10 м ток провода следует увеличить в 3,606 раз. При этом для сохранения постоянной ширины зоны нечувствительности системы траекторного управления, усиление сигнала траекторного рассогласования δ необходимо увеличить в 2,6 раза.

Аналогичный результат, кроме отношения сигнал/шум, обеспечивает изменение величины коэффициента передачи измерительного датчика напряженности при неизменных токе и компенсирующем сигнале.

Двухчастотный амплитудный метод местоопределения

Смежные провода можно питать токами разной частоты, а на МТА измерять и сравнивать напряженности, создаваемые каждым током. Такой двухчастотный метод обеспечивает более высокую точность, когда дестабилизирующие факторы оказывают одинаковое влияние на оба канала измерения.

Пусть расстояние между смежными бесконечными проводами $B = 2b$. Напряженности, создаваемые токами каждого провода на высоте z и на расстоянии y от срединной линии:

$$H_1 = \frac{I_1}{2\pi\sqrt{(y+b)^2 + z^2}}; \quad H_2 = \frac{I_2}{2\pi\sqrt{(y-b)^2 + z^2}}.$$

Отношение напряженностей:

$$N = \frac{H_1}{H_2} = \frac{I_1}{I_2} \frac{\sqrt{(y-b)^2 + z^2}}{\sqrt{(y+b)^2 + z^2}}.$$

При $I_1 = I_2$ алгоритм перехода на очередной гон со смещением $y = y_o$:

$$\delta = H_1 - N_o H_2 = \frac{I_1}{2\pi\sqrt{(b+y)^2 + z^2}} - N_o \frac{I_2}{2\pi\sqrt{(b-y)^2 + z^2}},$$

где $N_o = \frac{H_1}{H_2} = \frac{I_1}{I_2} \frac{\sqrt{(b-y_o)^2 + z^2}}{\sqrt{(b+y_o)^2 + z^2}} = \text{const}$; y_o – требуемое боковое смещение МТА относительно первого провода.

Чувствительность УМО, реализующих метод отношений:

$$K = \frac{d\delta}{dy} = \frac{I_1}{2\pi} \frac{b+y}{[(b+y)^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{I_2}{2\pi} \frac{b-y}{[(b-y)^2 + z^2]^{3/2}}.$$

Так, если $I_1 = I_2 = I$ и $y = 0$, то $K_{\min} = 8I/(2\pi B^2)$, что примерно в 2 раза больше, чем по первому варианту одночастотного метода.

К достоинствам метода следует отнести отсутствие накоплений ошибок местоопределения по мере приближения МТА к срединной линии, которая сохраняет прямолинейность по всей своей длине.

Одночастотный двухканальный метод

Предыдущий метод отношений можно реализовать на одной частоте, если оба провода питать попеременно, а на тракторе измеренные значения разделять с помощью коммутатора по левому и правому каналам. При этом компенсируются нестабильности не только магнитного поля, но и параметров приемника магнитного поля.

Местоопределение в магнитном поле синфазных токов

В [5] показано, что за пределами петли магнитное поле равно разности полей, создаваемых прямым и обратным токами, поэтому градиент напряженности в направлении оси ОУ системы координат и чувствительность более высокие, чем внутри петли. Их можно еще более повысить, располагая МТА между двумя проводами с синфазными токами, где напряженность магнитного поля равна разности напряженностей, создаваемых каждым током.

Суммарное магнитное поле синфазных токов описывается теми же зависимостями, что и противофазными токами (внутри петли), но направление одного из векторов напряженности меняется на противоположное. В итоге вертикальные составляющие векторов напряженности направлены встречно, а горизонтальные – согласно.

На рис. 2 приведены графики чувствительности амплитудных методов местоопределения в магнитном поле синфазных токов бесконечно длинных проводов по величине модуля вектора напряженности (1) и проекции вектора напряженности на вертикальную ось (2) при $B = 20$ м, $z = 2$ м.

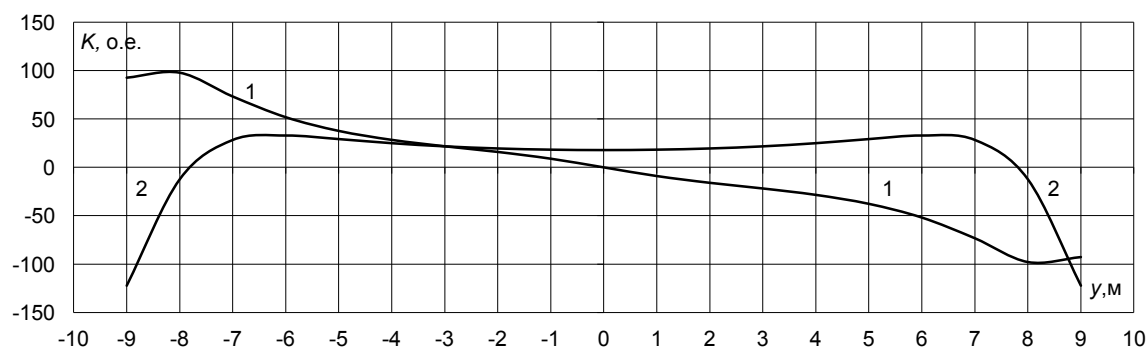


Рис. 2. Зависимость чувствительности УМО от бокового смещения при местоопределении в магнитном поле синфазных токов по величине модуля напряженности (1) и проекции вектора напряженности на вертикальную ось (2) при $B = 20$ м, $z = 2$ м

График 2 на рис. 2 показывает, что определение местоположения по величине вертикальной проекции вектора магнитного поля обеспечивает высокую стабильность чувствительности в широком диапазоне изменения бокового смещения МТА. Но зависимость результатов

измерений проекции вектора напряженности от крена трактора требует корректировки результата измерений по величине угла крена либо размещения датчика напряженности в маятниковом подвесе.

2. Фазово-временной способ местоопределения МТА

В дальней радионавигации широкое применение находит фазовый метод измерения расстояния до источника радиоизлучения, основанный на измерении времени распространения радиоволны от источника до приемника. Для применения этого метода в сельскохозяйственной навигации необходимо снизить фазовую скорость индукционного магнитного поля в тысячи раз, что достигается питанием смежных проводов токами одной частоты, сдвинутыми по фазе, например, на 90° [6]. При этом расстояние между проводами фазовый фронт суммарного магнитного поля проходит за время, равное четверти периода тока в проводах. Так, если частота тока 50 Гц и расстояние между проводами 40 м, то среднее значение фазовой скорости между ними составит 8 м/мс, или 8 км/с; фиксируя время перехода напряженности через нулевой значение с точностью 1 мкс, можно определять место МТА между проводами с точностью до 1 см.

Местоопределение в плоскости проводов

При питании 2-х смежных бесконечно длинных проводов токами I_1 и I_2 напряженность магнитного поля, создаваемого в плоскости проводов на расстоянии y от срединной линии:

$$H_1 = \frac{I_1}{2\pi(b-y)}; \quad H_2 = \frac{I_2}{2\pi(b+y)},$$

где $b = 0,5B$ – половина расстояния между проводами.

Пусть $I_1 = I_2 = 2\pi$, а сдвиг токов по фазе составляет 90° . Тогда величина H и фаза φ напряженности суммарного поля, создаваемого токами в плоскости проводов:

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2} = \frac{\sqrt{2b^2 + 2y^2}}{b^2 - y^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{H_2}{H_1} = \arctg \frac{b-y}{b+y}, \quad (6)$$

где φ – фазовый сдвиг суммарного магнитного поля относительно тока в первом проводе.

Согласно (6), перемещение точки наблюдения поля между проводами от $y=b$ до $y=-b$ изменяет фазовый сдвиг φ от 0 до 90° . Зависимость скорости изменения фазы при изменении координаты y определяется дифференцированием (6) по y :

$$\frac{d\varphi}{dy} = \frac{1}{1 + \left(\frac{b-y}{b+y}\right)^2} \frac{2b}{(b+y)^2} = \frac{b}{b^2 + y^2} \text{ (рад/м)}.$$

Учитывая, что $\varphi = \omega t$, $d\varphi/dt = \omega$, $dt = d\varphi/\omega$, мгновенная линейная скорость перемещения фазового фронта между проводами:

$$V = \frac{dy}{dt} = \omega \frac{dy}{d\varphi} = \omega \frac{b^2 + y^2}{b}.$$

На рис. 3 показаны при нормированных значениях $b = \pm 1$, $\omega = 1$ зависимости от боковой координаты y :

- фазового сдвига φ напряженности суммарного поля (градусов);
- величины (модуля) вектора напряженности H суммарного поля (относительных единиц);
- мгновенной скорости перемещения фазового фронта V (%).

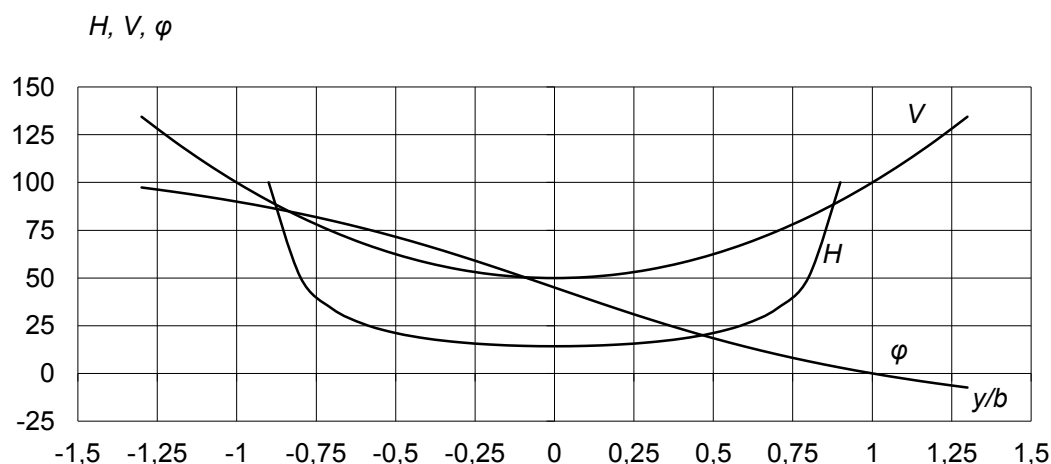


Рис. 3. Параметры квазиволнового магнитного поля в плоскости проводов

Как видно, фазовый сдвиг φ напряженности суммарного поля меняется от 90° до 0° при изменении координаты точки наблюдения поля от $y = -b$ до $y = b$. Скорость V фазового фронта изменяется между проводами в два раза. В диапазоне $-0,5b < y < 0,5b$ величина (модуль) напряженности H суммарного поля изменяется незначительно, т. е. поле достаточно равномерное.

По мере удаления точки наблюдения поля от проводов (увеличения координаты y) отношение $(b-y)/(b+y)$ стремится к ± 1 , а фазовый сдвиг — к -45° или к 135° , поэтому максимальная разность фаз наиболее удаленных точек с противоположных сторон проводов может достигать 180° . В табл. 8 приведены основные параметры магнитного поля в плоскости проводов в зависимости от бокового смещения y точки наблюдения поля при расстоянии между проводами $B = 40$ м, токе $I_1 = I_2 = 2\pi$ А и частоте 50 Гц.

Таблица 8. Зависимость напряженности H , фазового сдвига φ и фазовой скорости V от значения координаты y точки наблюдения поля

y , м	-15	-10	0	10	20	40	80	120
H , мА/м	202,03	105,41	70,71	105,40	—	52,70	19,44	12,29
φ , град	81,870	71,565	45,000	18,430	0	-18,430	-30,960	-35,540
V , км/с	9,8125	7,8500	6,2800	7,8500	12,5600	31,4000	106,8000	232,4000

Как видно, фазовая скорость тем больше, чем дальше точка наблюдения поля от провода, т. е. наблюдается эффект «разбегающихся галактик»; при $y \gg b$ фазовая скорость пропорциональна квадрату расстояния до проводов.

Перемещение фазового фронта суммарного поля между проводами аналогично перемещению радиоволны, что позволяет назвать такое поле «квазиволновым». Его отличие от радиоволны заключается в низкой скорости перемещения фазового фронта между проводами — в рассмотренном выше примере она $\sim$ в $(24...48)10^3$ раз ниже скорости радиоволны. Вторая особенность квазиволнового поля заключается в зависимости фазовой скорости от координаты точки наблюдения поля, что не позволяет отождествлять его с известными «бегущими» или «вращающимися» магнитными полями, применяемыми, например, в линейных и вращающихся электродвигателях.

Низкая фазовая скорость квазиволнового магнитного поля позволяет с высокой точностью измерять расстояния до проводов. Пусть, например, в рассмотренном выше примере точка наблюдения поля расположена на срединной линии, т. е. $y = 0$. На частоте 50 Гц это соответствует запаздыванию времени перехода напряженности через нулевое значение относительно тока в проводах на ± 2500 мкс. При фазовой скорости 6,28 км/сек изменение координаты y на $\pm 0,05$ м изменит временной сдвиг напряженности на ± 8 мкс, т. е. до 2492 мкс относительно тока в первом проводе и 2508 мкс — во втором. Не представляет затруднений измерение отрезка

времени в 2500 мкс с погрешностью менее 1 мкс, что обеспечит местоопределение МТА с погрешностью менее 1 см.

Квазиволновое магнитное поле вне плоскости проводов

Вне плоскости проводов векторы H_1 и H_2 не совпадают ни в пространстве, ни во времени (по фазе), поэтому векторное сложение действующих или амплитудных значений напряженности H_1 и H_2 невозможно. Но оно возможно применительно к мгновенным значениям напряженности h_1 и h_2 :

$$h_{\Sigma} = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + 2h_1h_2 \cos(\psi_2 - \psi_1)}, \quad (7)$$

$$\varphi = \arctg \frac{h_1 \sin \psi_1 + h_2 \sin \psi_2}{h_1 \cos \psi_1 + h_2 \cos \psi_2}. \quad (8)$$

где h_{Σ} , h_1 , h_2 – мгновенные значения напряженности составляющих квазиволнового поля; ψ_1 и ψ_2 – пространственные углы между вертикалью и векторами напряженности H_1 и H_2 [4]: $\psi = \arctg[z/(b \pm y)]$.

Численное решение (7) и (8) показывает, что вне плоскости проводов результирующее магнитное поле эллиптически поляризованное, т. е. конец вектора напряженности h_{Σ} в течение периода описывает в пространстве эллипс. В качестве примера на рис. 4 приведена пространственная траектория конца вектора напряженности в точке с координатами $z = 2$ м, $y = 7$ м при $2b = 30$ м. Основные параметры этого эллипса при $I = 2\pi$ (ампер) приведены в табл. 9.

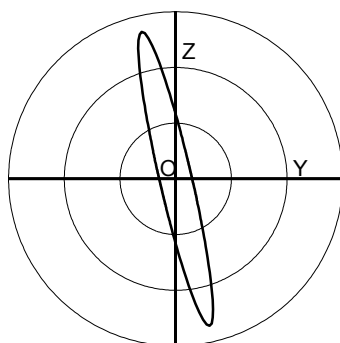


Рис. 4. Эллипс поляризации квазиволнового магнитного поля

Таблица 9. Основные параметры эллипса поляризации магнитного поля в точке с координатами $y = 7$ м, $z = 2$ м при $B = 30$ м

ωt , град	h_1 , мА/м	h_2 , мА/м	h_{Σ} , мА/м	ψ , град	Примечание
0	0	44,270	44,270	5,08	$\omega t = 0$; $h_1 = 0$
18,10	40,040	42,077	14,408	77,08	$h_{\Sigma} = h_{\min}$
19,51	43,026	41,728	14,781	90,00	$\psi = 90^\circ$
90,00	128,830	0	128,830	165,00	$\omega t = 90^\circ$; $h_2 = 0$
108,25	122,350	13,870	135,460	167,00	$h_{\Sigma} = h_{\max}$
173,40	14,800	43,980	58,100	180,00	$\psi = 180^\circ$
180,00	0	44,270	44,270	185,08	$\omega t = 180^\circ$
198,11	40,043	42,080	14,408	257,00	$h_{\Sigma} = h_{\min}$
199,51	43,026	41,730	14,781	270,00	$\psi = 270^\circ$
270,00	128,830	0	128,830	345,00	$\omega t = 270^\circ$
288,25	122,350	13,867	135,460	347,00	$h_{\Sigma} = h_{\max}$
353,40	14,800	43,980	58,100	360,00	$\psi = 0$
360,00	0	43,300	43,300	365,08	$\omega t = 360^\circ$

В течение периода фазовый угол $\varphi = \omega t$ и пространственный угол ψ изменяются на 360° . Однако зависимость между их значениями нелинейная, т. е. вектор h_{Σ} вращается с переменной угловой скоростью. Так, за время изменения фазы тока в проводах на угол $18,25^\circ$ от 90° до

$108,25^\circ$ пространственный угол ψ вектора напряженности h_Σ изменится на 2° от 165 до 167° , т. е. в 9,1 раза меньше. А при изменении фазы тока на $1,4^\circ$ от $\omega t = 199,51$ до $198,11^\circ$ пространственный угол ψ изменяется на 13° , т. е. в 9,3 раз больше. Поэтому в данной точке пространства мгновенная угловая скорость вращения вектора напряженности в течение периода меняется примерно в 90 раз.

Изофазы в вертикальной плоскости YOZ

Для выяснения формы изофаз в вертикальной плоскости YOZ, перпендикулярной к проводам, впишем между проводами окружность, как показано на рис. 5, где I_1 и I_2 – провода с токами.

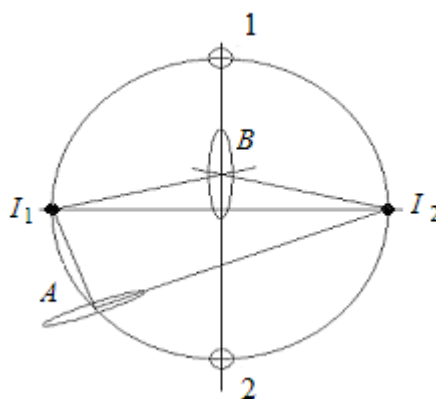


Рис. 5. Поляризация магнитного поля в вертикальной плоскости

Прямые, проведенные с любой точки дуги этой окружности к токам I_1 и I_2 , образуют между собой прямой угол. Поскольку векторы h_1 и h_2 перпендикулярны к этим прямым, то они тоже образуют между собой прямой угол. Поэтому большая ось эллипса поляризации A совпадает с направлением на удаленный проводник, а малая ось – на ближний. Фаза напряженности результирующего поля для всех точек дуги полуокружности постоянная и совпадает с фазой тока в ближнем проводе, поэтому окружность можно назвать «предельной», или «П-окружностью». В любой точке дуги П-окружности большая ось эллипса поляризации равна амплитудному значению напряженности, создаваемой током в ближнем проводе, а малая – в дальнем. Другими словами, в точках П-окружности большая ось эллипса поляризации обратно пропорциональна расстоянию до ближнего провода, а малая – до дальнего. Их отношение:

$$h_{\Sigma\min}/h_{\Sigma\max} = \sqrt{\frac{z^2 + (b-y)^2}{z^2 + (b+y)^2}}.$$

Вертикальная срединная линия 1–2 делит П-окружность на две части. Так как токи в проводах по модулю равны, то фазовый сдвиг напряженности результирующего поля во всех точках этой линии равен половине фазового сдвига токов в проводах, т. е. 45° . Вследствие равноправности левого и правого токов большая ось эллипса поляризации вертикальная (эллипс B на рис. 4).

При $\omega t = \pi/4 = 45^\circ$ модули обоих векторов и их проекции на горизонтальную и вертикальную оси равны, но горизонтальные проекции однонаправленные и суммируются, а вертикальные – разнонаправленные и вычитаются. Поэтому малая полуось эллипса поляризации равна удвоенному значению горизонтальной проекции вектора напряженности, создаваемой током одного проводника в этот момент времени:

$$h_{\Sigma\min} = 2\sin(45^\circ) \frac{I_m}{2\pi b} \sin\psi_1 = \sqrt{2} \frac{I_m}{2\pi b} \sin\psi_1.$$

Через 90° при $\omega t = (3/4)\pi = 135^\circ$ однонаправленными будут вертикальные проекции векторов напряженности, поэтому большая ось эллипса поляризации равна удвоенному значению проекции вектора напряженности на вертикальную ось:

$$h_{\Sigma\max} = 2\sin(135^\circ) \frac{I_m}{2\pi b} \cos\psi_1 = \sqrt{2} \frac{I_m}{2\pi b} \cos\psi_1.$$

Таким образом, вдоль срединной линии $h_{\Sigma\min}/h_{\Sigma\max} = \tan\psi_1 = \tan\psi_2 = z/b$, а эксцентриситет e эллипса поляризации:

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{z}{b}\right)^2}. \quad (9)$$

Точки пересечения П-окружности срединной линией, для которых $z = b$, назовем «полюсами изофаз». Расчет показывает, что все изофазы (линии одинакового фазового сдвига напряженности поля) начинаются в одном полюсе и заканчиваются в другом, рис. 6. Как видно, радиус кривизны изофаз превышает расстояния между точкой наблюдения поля и проводами, что повышает помехоустойчивость устройств местоопределения к галопированию трактора.

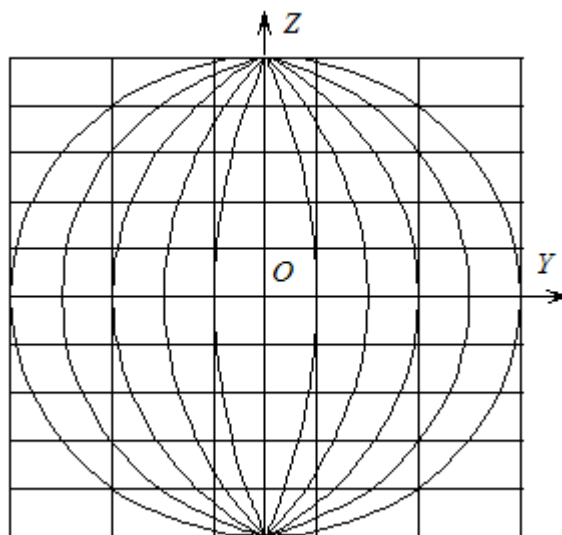


Рис. 6. Форма изофаз в вертикальной плоскости OYZ

Из (9) следует, что в полюсах магнитное поле обладает круговой поляризацией ($e = 0$), то есть мгновенное значение вектора напряженности постоянное, вектор напряженности вращается равномерно. При дальнейшем увеличении высоты ($z > b$) большая и малая оси эллипса поляризации меняются местами, т. е. большая ось располагается горизонтально.

Местоопределение в плоскости проводов конечной длины

Выше предполагалось, что провода бесконечно длинные, т. е. не учитывался краевой эффект. Для определения влияния конечной длины проводов $L=2l$ разместим начало системы координат OXYZ в равноудаленной от проводов точке, рис. 7. Тогда напряженности, создаваемые токами $I = 2\pi$ (ампер) каждого провода в точке с координатами (x, y, z) описываются уравнениями [3]:

$$H_1 = \frac{I}{2(b-y)} (\cos\beta_1 + \cos\beta_2) = \frac{I}{2(b-y)} \left(\frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + (b-y)^2}} + \frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2 + (b-y)^2}} \right); \quad (10)$$

$$H_2 = \frac{I}{2(b+y)} (\cos\beta_3 + \cos\beta_4) = \frac{I}{2(b+y)} \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2 + (b+y)^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + (b+y)^2}} \right). \quad (11)$$

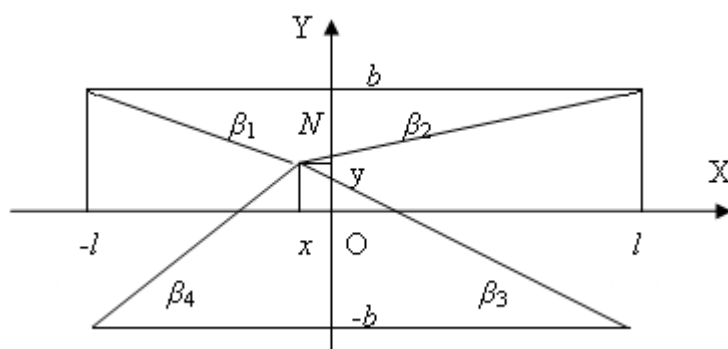


Рис. 7. К определению поля проводов конечной длины

Численное решение (8) с учетом (10) и (11) позволяет определить форму изофаз в плоскости XOY. В качестве примера в табл. 10 приведены координаты x и y изофазы, проходящей через точку с координатами $x = 0$, $y = 7,5$ м при $2l = 1000$ м и $2b = 30$ м.

Таблица 10. Координаты точек РСЛ в плоскости проводов длиной 1000 м при расстоянии между проводами 30 м; координата x измеряется от середины проводов

x , м	0	350	400	450	470	490	495	500
y , м	7,50	7,52	7,56	7,71	7,98	8,72	8,67	7,50

Как видно, форма изофазы заметно искривлена, что объясняется непропорциональным изменением напряженности, создаваемой токами каждого провода; прямолинейна только средняя изофаза $y = 0$.

В качестве обратного проводника может использоваться либо земля, либо обратный провод, образующий совместно с прямым проводом изолированную от земли петлю. Поэтому реальное навигационное магнитное поле представляет векторную сумму мгновенных векторов магнитных полей, создаваемых токами проводов и заземлителей в первом случае или прямоугольных петель – во втором. Вычислять мгновенное значение и направление вектора напряженности суммарного поля удобно по величине и направлению проекций каждого слагаемого на три взаимно перпендикулярные направления [4]. При этом суммарное магнитное поле состоит из восьми составляющих.

Измерение фазы эллиптически поляризованного магнитного поля

На рис. 4 показан график изменения модуля вектора напряженности в пространстве; на рис. 8 показан график изменения этого же вектора во времени.

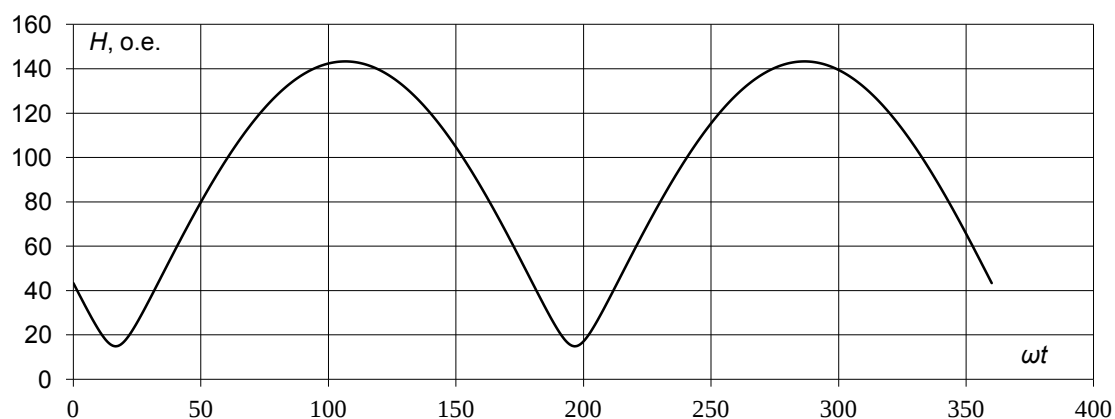


Рис. 8. График изменения модуля вектора напряженности в точке с координатами $y = 7$ м, $z = 2$ м при $B = 30$ м

Мгновенное значение модуля вектора напряженности эллиптически поляризованного магнитного поля описывается уравнением, аналогичным (6):

$$|h| = \sqrt{h_x^2 + h_y^2 + h_z^2},$$

$$\text{где } h_x = H_x \sin(\omega t + \varphi_x); h_y = H_y \sin(\omega t + \varphi_y); h_z = H_z \sin(\omega t + \varphi_z).$$

Поэтому справедливо:

$$|h| = 0,5 \sqrt{H_x^2 [1 - \cos 2(\omega t + \varphi_x)] + H_y^2 [1 - \cos 2(\omega t + \varphi_y)] + H_z^2 [1 - \cos 2(\omega t + \varphi_z)]}.$$

Как видно, подкорневое выражение представляет сумму трех синусоидальных величин с удвоенной частотой и некоторую постоянную составляющую. Поскольку сумма нескольких синусоидальных величин одной частоты также является синусоидой той же частоты, то квадрат модуля мгновенного значения вектора напряженности представляет синусоиду, частота которой равна удвоенной частоте тока. В качестве примера на рис. 9 приведен график квадрата модуля вектора напряженности, представленного на рис. 4 и 7.

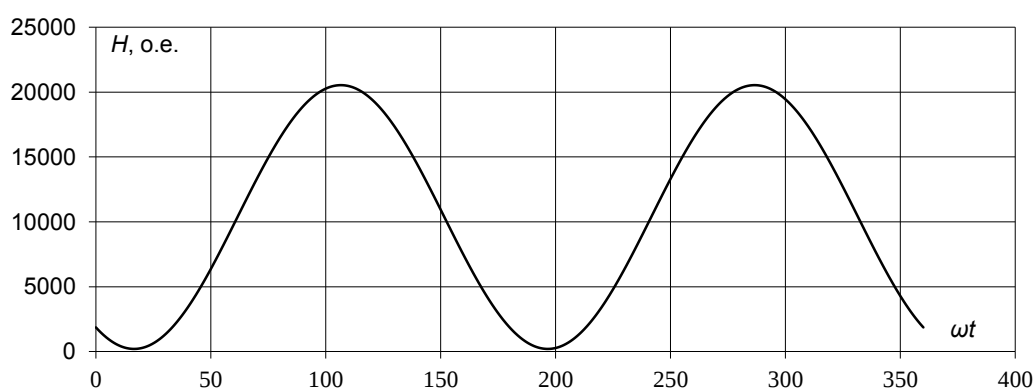


Рис. 9. График квадрата мгновенных значений модуля вектора напряженности в точке с координатами $y = 7$ м, $z = 2$ м при $B = 30$ м

Измерение фазы электрического сигнала, меняющегося согласно рис. 8, не представляет технических затруднений, поскольку разделение постоянной и переменной составляющих может быть выполнено при помощи одного лишь конденсатора. При этом также исключается необходимость в математической операции извлечения квадратного корня.

3. Влияние электропроводимости земли

Выше влияние земли не учитывалось. Однако земля обладает конечным электрическим сопротивлением, поэтому под действием переменного магнитного поля в ней индуцируются вихревые токи, которые создают вторичное магнитное поле. Вектор напряженности этого поля имеет горизонтальную и вертикальную составляющие, т. е. направлен под углом ψ_2 к вертикали. А так как контуры вихревых токов обладают индуктивностью, то вектор напряженности вторичного магнитного поля отстает по фазе от тока провода на угол $90 < \varphi_2 < 180^\circ$.

Суммарное поле провода и вихревых токов в однородной земле принято называть «нормальным». Поскольку его составляющие – первичное и вторичное поля – не совпадают ни в пространстве, ни во времени, то нормальное поле эллиптически поляризованное.

Степень влияния проводимости земли на напряженность нормального магнитного поля принято характеризовать при помощи т. н. магнитных чисел, равных отношению напряженности на переменном токе к напряженности на постоянном токе [7]. Значения магнитных чисел на поверхности земли для бесконечного провода, лежащего на поверхности земли, приведены в табл. 11, где обозначено:

$\rho = 0,00281y \sqrt{f / \rho}$ – «приведенное расстояние» между проводом и точкой наблюдения поля;

y – расстояние между проводом и точкой наблюдения поля, м;

f – частота переменного магнитного поля, Гц;

ρ – «кажущееся» удельное сопротивление земли, Ом·м;

a_z, a_y – магнитные числа «активных» компонент вертикальной и горизонтальной составляющих вектора напряженности нормального магнитного поля;

b_z, b_y – магнитные числа «реактивных» компонент вертикальной и горизонтальной составляющих вектора напряженности нормального магнитного поля.

Таблица 11. Составляющие магнитных чисел для бесконечного наземного провода

p	a_z	a_y	b_z	b_y
0	1,000	0	0	0
0,1	0,998	–0,047	–0,008	–0,043
0,2	0,992	–0,094	–0,025	–0,079
0,3	0,983	–0,139	–0,047	–0,109
0,4	0,970	–0,183	–0,072	–0,132
0,5	0,954	–0,226	–0,098	–0,149
1,0	0,836	–0,405	–0,232	–0,169

Зная магнитные числа, можно вычислить мгновенные значения проекций активной и реактивной компонент магнитного поля на оси OY и OZ, угол наклона суммарного (нормального) поля к вертикальной или горизонтальной оси и его модуль. График зависимости модуля мгновенного значения вектора напряженности от угла наклона, построенный в полярной системе координат, показывает форму эллипса поляризации в пространстве. В качестве примера на рис. 9 приведена форма эллипса поляризации нормального магнитного поля при $p = 1$.

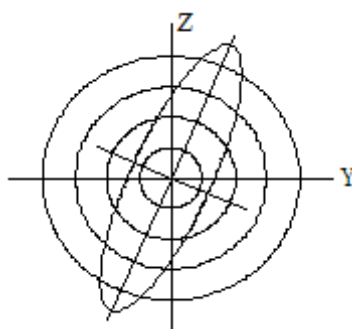


Рис. 10. Форма эллипса поляризации нормального магнитного поля при $p = k_y = 1$

Если $p \ll 1$, для определения магнитных чисел можно пользоваться следующими приближенными формулами [8]:

$$a_z = 1 - \pi p^2 / 16;$$

$$a_y = 0,4714p(1 - 0,2p^2);$$

$$b_z = -0,25p^2[\ln p - 1];$$

$$b_y = -(0,4714p - 0,125\pi p^2).$$

4. Заключение

Основной недостаток индукционных методов – необходимость закладки под пахотный слой почвы изолированных проводов, что повышает затраты на подготовку поля для работы на нем автоматических МТА и эксплуатационные расходы в связи с возможным повреждением проводов. Увеличение расстояния между проводами пропорционально снижает эти затраты – если в середине прошлого века расстояния между проводами принимались равными 1,4...2,0 м, то сейчас имеется реальная возможность увеличения этого расстояния в 10...20 раз, что заметно повышает перспективность индукционных методов местоопределения МТА для создания универсальных систем автоматического траекторного управления.

Индукционные методы позволяют определять положение МТА по величине напряженности магнитного поля, создаваемого токами проводов; отклонение МТА от требуемого положения определяется сравнением измеренного значения с требуемым. Требуемое значение в пределах одного гона может быть или постоянным, или переменным. Первый вариант позволяет создавать максимально простые устройства местоопределения, использующие в качестве программы движения МТА равносигнальные линии модуля вектора напряженности магнитного поля или линии равных фаз. Второй вариант требует применения вычислительной техники или запоминающих устройств, но обеспечивает высокую прямолинейность траекторий МТА при неоднородном по длине провода магнитном поле.

Использование квазиволнового магнитного поля, создаваемого сдвинутыми по фазе токами в смежных проводах, в качестве навигационного позволяет по измеренным временным интервалам фиксировать смещение МТА в ту или иную сторону с погрешностью до сотых и тысячных долей метра. При этом основным источником погрешности местоопределения становится нестабильность электрического сопротивления земли, изменяющая вихревые токи в земле и создаваемые ими вторичные магнитные поля. Предварительные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что влияние электрического сопротивления земли можно свести до приемлемых значений соответствующим выбором частоты магнитного поля. Так, можно утверждать, что при питании проводов токами промышленной частоты влияние нестабильности удельного сопротивления земли становится пренебрежимо малым.

Напряженность постоянного магнитного поля Земли на несколько порядков превышает напряженность навигационного магнитного поля, в результате чего вибрация датчиков напряженности сопровождается появлением на выходе датчиков напряжения помехи. Для её снижения необходимо применять средства амортизации, в том числе – от акустических воздействий; эта проблема практически решена в электроразведочной геофизике, где низкочастотные магнитные поля используют для поиска полезных ископаемых.

Источником электромагнитных помех является также бортовая электросеть трактора, что может потребовать её изменения.

Наконец, экспериментально установлено, что появление вблизи датчика напряженности массивных железных масс увеличивает индукцию магнитного поля и «отталкивает» от них трактор, оборудованный индукционной системой автовождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.А. Литинский. Первый опыт и перспективы автоматизации вождения машинно-тракторных агрегатов. – М.: Изд-во МСХ РСФСР, 1960. – 44 с.
2. Калюжный А.Т. Анализ индукционных методов сельскохозяйственной навигации // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 2 (8). – С. 19–32.
3. Гельфенбейн С.П. Основы автоматизации сельскохозяйственных агрегатов. – М.: Колос, 1975. – 383 с.
4. Калюжный А.Т. Магнитное поле наземного проводника с током // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 11. – С. 15–18.
5. Калюжный А.Т., Ляпин В.Г. Использование магнитного поля прямоугольной петли для сельскохозяйственной навигации // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – № 11. – С. 2–4.
6. Способ ориентации самоходных машин в переменном магнитном поле двух токонесущих проводов. А.С. СССР № 810112, заяв. 09.02.1977, опубл. 07.03.1981, БИ № 9.
7. Бурсиан В.Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. – Л.: Недра, 1972 – 368 с.
8. Электроразведка. Справочник геофизика / под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. Кн. 1. – М.; Недра, 1989. – 438 с.

Поступила 25.07.2013 г.