

Новосибирский государственный аграрный университет

На правах рукописи

Калюжный Анатолий Тимофеевич

**РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ
ИНДУКЦИОННОЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
НАВИГАЦИИ**

Специальность 05.13.05

Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск 2017

Оглавление

Введение.....	9
Глава 1.....	9
ОБОСНОВАНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ НАВИГАЦИИ	14
1.1.Определение термина	14
1.2.«Навигация» в широком значении	15
1.3.«Навигация» в узком значении.....	16
1.4. Принципы местоопределения объектов управления.....	17
1.4.1.Позиционные методы местоопределения.....	17
1.4.1.Местоопределение методами счисления пути	20
1.4.2.Обзорно-сравнительные методы местоопределения.....	21
1.5. Современное состояние сельскохозяйственной навигации	22
1.6. Перспективы сельскохозяйственной навигации.....	25
1.7. Способы программирования плановых траекторий МТА.....	26
1.8. Методы местоопределения МТА	28
1.9. Неподвижные и подвижные направляющие линии	30
1.10. Важные понятия сельскохозяйственной навигации.....	32
1.11. Навигационные возможности явления магнитной индукции	35
Выводы по гл. 1	42
Глава 2. АНАЛИЗ НАВИГАЦИОННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ	45
Введение.....	45
2.1.Магнитное поле бесконечного проводника с током	45
2.2.Магнитное поле проводника конечной длины	49
2.3.РСЛ модуля вектора напряженности вне плоскости проводов.....	55
2.4. Градиенты модуля вектора напряженности и его проекций.....	57
2.5. Магнитное поле тока заземлителей	59
2.5.1. Обратный ток в земле	59
2.5.2. Магнитное поле обратного тока.....	60

2.6. Суммарное магнитное поле прямого и обратного токов	61
2.7. Магнитное поле Г-образного проводника.....	66
2.8. Магнитное поле двух проводников с синфазными токами	70
2.9. Суммарное поле 2-х противофазных токов.....	73
2.10. Магнитное поле прямоугольной петли.....	75
2.11. Суммарное магнитное поле двух петель	78
2.12. Навигационные поля сложных источников	82
2.12.1. Параллельное включение гоновых проводов.....	83
2.12.2. Последовательное включение гоновых проводов зигзагом	84
2.12.3. Последовательно-петлеобразное включение гоновых проводов.....	85
2.12.4. Источник магнитного поля «двойной зигзаг»	85
2.12.5. Навигационный индуктор «зигзаг в петле»	88
2.13. Поле петли непрямоугольной формы	89
2.14. Влияние земли на переменные магнитные поля.....	90
2.14.1. Электрические свойства земли	91
2.14.2. Магнитное поле токов индукции в земле	92
2.14.3. Магнитные числа нормального магнитного поля	93
Выводы по главе 2.....	97
Глава 3. АНАЛИЗ НАВИГАЦИОННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ	
МОБИЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ	100
3.1. Поле круговой рамки в сферической системе координат.....	100
3.2. Магнитное поле рамки в прямоугольной системе координат.....	104
3.3. Равносигнальные линии проекций вектора напряженности	107
3.4. Форма магнитных силовых линий рамки.....	109
3.5. Суммарное поле двух горизонтальных рамок	112
3.6. Поле противофазных рамок	114
3.7. Магнитное поле квадратной рамки.....	116
Выводы по главе 3.....	116

Глава 4. АНАЛИЗ КВАЗИВОЛНОВОГО НАВИГАЦИОННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	118
Введение.....	118
4.1. Создание квазиволнового магнитного поля.....	118
4.2. Квазиволновое поле в плоскости проводов конечной длины	122
4.3. Поле над плоскостью бесконечных проводов	124
4.4. Изофазы в вертикальной плоскости YOZ	128
4.5. Квазиволновое поле при фазовом сдвиге токов 120°	131
4.6. Таблица нормированных данных квазиволнового поля	132
4.7. Квазиволновое поле 2-х петель	134
4.8. Квазиволновое поле 2-х рамок	134
Выводы по главе 4.....	135
Глава 5. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ МТА В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ	137
5.1. Навигационные параметры и алгоритмы	137
5.2. Местоопределение по модулю вектора напряженности.....	140
5.2.1. Алгоритм местоопределения	140
5.2.2. Чувствительность устройств местоопределения	141
5.2.3. Помехоустойчивость УМО по модулю вектора напряженности...	144
5.2.3.1. Влияние мультипликативной погрешности	144
5.2.3.2. Влияние аддитивной погрешности	146
5.2.3.3. Влияние неустойчивости тока индуктора.....	147
5.2.3.4. Влияние крена трактора	147
5.2.3.5. Влияние галопирования трактора	148
5.2.3.6. Влияние рыскания трактора.....	148
5.2.3.7. Влияние типа источника навигационного магнитного поля.....	149
5.2.4. Местоопределение относительно срединной линии 2-х проводников с синфазными токами	152

5.2.5. Местоопределение относительно срединной линии 2-х проводников с противофазными токами	155
5.2.6. Двухчастотный метод местоопределения относительно срединной линии	155
5.3. Местоопределение по квадрату модуля напряженности	156
5.4. Местоопределение по проекции вектора напряженности на поперечную ось трактора	156
5.4.1. Местоопределение при движении над проводом	156
5.4.2. Местоопределение МТА между проводами.....	159
5.5. Местоопределение МТА по проекции вектора напряженности на вертикальную ось	161
5.6. Местоопределение по модулю проекции на вертикальную ось	164
5.7. Местоопределение по модулю проекции вектора напряженности на поперечную ось	165
5.8. Местоопределение по проекции вектора напряженности на произвольное направление.....	166
5.9. Одноточечный разностно-амплитудный метод	168
5.10. Амплитудно-фазный метод местоопределения	171
Выводы по главе 5.....	174
Глава 6. ДАЛЬНОМЕРНЫЕ МЕТОДЫ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	177
6.1. Амплитудный метод с изменяемым компенсационным сигналом....	177
6.2. Метод с изменяемым коэффициентом передачи магнитоприемника	181
6.3. Метод с изменяемой напряженностью	181
6.4. Двухчастотный разностно-амплитудный метод.....	181
6.5.Местоопределение импульсно-фазовым методом.....	183
6.5.1. Формирование опорной фазы магнитного поля	183
6.5.2. Определение фазы квазиволнового магнитного поля.....	186
6.6. Вычислительный метод местоопределения	188

6.7. Следовой индукционный метод местоопределения МТА	189
6.8. Определение места МТА на дистанции.....	189
6.9. Определение пространственной ориентации осей трактора	190
Выводы по главе 6.....	191
Глава 7. МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЕ МТА ПРИ ДУБЛЕРНОМ ВОЖДЕНИИ ШЕРЕНГОЙ.....	
193	193
Введение.....	193
7.1. Местоопределение в плоскости рамки	194
7.1.1. Определение интервала по модулю вектора напряженности	195
7.1.2. Определение интервала по проекции вектора напряженности на вертикальную ось	196
7.1.3. Многорамочный метод	198
7.1.4. Однорамочный суммарно-амплитудный метод.....	198
7.1.5. Двухчастотный суммарно-амплитудный метод	199
7.1.6. Вычислительный метод.....	200
7.1.7. Метод с программируемым компенсационным сигналом	202
7.2. Местоопределение в меридиональной плоскости рамки по модулю вектора напряженности при $\theta \approx 90^\circ$	202
7.2.1. Амплитудный метод	202
7.2.2. Двухрамочный суммарно-амплитудный метод	203
7.2.3. Двухчастотный суммарно-амплитудный метод	203
7.2.4. Однорамочный суммарно-амплитудный метод.....	203
7.3. Местоопределение в меридиональной плоскости рамки по модулю вектора напряженности при $\theta \approx 0^\circ$	204
7.3.1. Амплитудный метод	204
7.3.2. Двухчастотный суммарно-амплитудный метод	204
7.3.3. Одночастотный двухрамочный метод	206
7.4. Определение интервала в меридиональной плоскости по проекции вектора напряженности при $\theta \approx 90^\circ$	206

7.5. Определение интервала в меридиональной плоскости по проекции вектора напряженности при $\theta \approx 0$	208
7.6. Измерение дистанции между лидером и дублером.....	208
7.6.1. Измерение дистанции в магнитном поле горизонтальной рамки...	209
7.6.2. Измерение дистанции в магнитном поле вертикальной рамки	210
Выводы по главе 7.....	210
Глава 8. МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЕ МТА ПРИ ДУБЛЕРНОМ ВОЖДЕНИИ АГРЕГАТОВ КОЛОННОЙ.....	212
8.1. Местоопределение в плоскости рамки	212
8.1.1. Разностно-амплитудный метод местоопределения по модулю вектора напряженности	212
8.1.2. Двухрамочный метод местоопределения по модулю вектора напряженности	216
8.1.3. Разностно-амплитудный метод измерения интервала по проекции вектора напряженности на вертикальную ось	216
8.1.4. Импульсно-фазовый метод	217
8.2. Определения интервала в меридиональной плоскости рамки	218
8.2.1. Определение интервала разностно-амплитудными методами по модулю вектора напряженности при $\theta \approx 0$	218
8.2.2. Двухточечный разностно-амплитудный метод местоопределения по проекции вектора напряженности.....	220
8.2.3 Местоопределение по модулю проекции вектора напряженности .	223
8.2.4. Амплитудно-фазный метод местоопределения	224
8.3. Инверсные методы определения взаимного положения агрегатов ...	226
8.4. Кинематика дублерного вождения ведомого агрегата.....	227
8.5. Автономное управление траекторией ведомого агрегата.....	231
Выводы по главе 8.....	232
Краткое резюме	233

Предложения по использованию результатов работы	239
Заключение	241
Список литературы	241
Условные обозначения и сокращения	247
Приложение 1 УСЛОВИЯ ТРУДА СЕЛЬСКИХ МЕХАНИЗАТОРОВ	249
Условия труда механизатора	251
Условия труда в сельском хозяйстве и распространенность отдельных заболеваний.....	256
Гигиена труда в полеводстве	267
Приложение 2. МАШИННАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ПОЧВ	279
Проблема уплотнения грунтов ходовыми системами сельскохозяйственных машин	280
Воздействие автотранспортных средств на окружающую среду	284
Воздействие машин на почву.....	284
Результат выполнения НИР	286
Уплотняющее воздействие на почву тракторов кл.2 при возделывании картофеля	287
Приложение 3. Перечень описаний некоторых изобретений СССР в области индукционной сельскохозяйственной навигации.....	288

Введение

Работа изложена на 294 стр., включая 3 приложения на 44 страницах. Содержит 131 рисунок, 35 таблиц, библиографию из 36 наименований.

Актуальность темы. Важнейшим видом человеческой деятельности являются сельское хозяйство, в частности – растениеводство, как основной поставщик продуктов питания для людей и животных.

Современное растениеводство представляет высокомеханизированную отрасль, в которой основной объем трудоемких работ выполняют самоходные машины и машинно-тракторные агрегаты (МТА), управляемые механизаторами. Труд сельских механизаторов тяжелый. Запыленность и загазованность воздуха, шум, вибрации и удары на рабочем месте, физические и психофизиологические перегрузки, перепады климатических воздействий вызывают многочисленные профессиональные заболевания, Приложение 1. Это снижает престижность профессии и создает дефицит механизаторов, в результате чего даже в напряженные периоды полевых работ техника простаивает, увеличивая сроки выполнения полевых работ и снижая урожайность. Применение мощной высокопроизводительной техники не решает проблему дефицита механизаторов, так как сопряжено с целым рядом негативных последствий, в том числе – с машинной деградацией почвы, Приложение 2. Поэтому ручное управление МТА превратилось в «слабое звено» механизации, ограничивающее эффективность отрасли растениеводства.

Современный уровень развития электроники, приборостроения, автоматики позволяет успешно автоматизировать рутинные операции, выполняемые механизаторами на поле. Среди этих операций на первом месте по сложности и трудоемкости находится операция вождения МТА - управления траекторией движения на рабочем гоне и поворотной полосе.

Интенсивные работы по автоматизации вождения МТА проводились во второй половине прошлого века в СССР и других странах. Они позволили накопить большой экспериментальный материал, однако не привели к поло-

жительному результату, в том числе вследствие ошибочного выбора направления исследований, а именно – искали решения, аналогичные применяемым для автоматизации стационарных процессов. В действительности решение можно отыскать только в навигации – науке о методах и средствах управления движением управляемых подвижных объектов. Для чего необходимо иметь развитую сельскохозяйственную навигацию, как самостоятельное научное направление инструментальной навигации.

В настоящее время процесс управления движением МТА ограничивается биологическими методами – тракторист визуально определяет место нахождения МТА, на основании собственного опыта и знаний принимает решения, силой мышц рук и ног воздействует на органы управления движением трактора; роботизация требует автоматизации местоопределения МТА.

Сельское хозяйство обладает широким набором физических явлений, которые могут быть использованы для местоопределения МТА. Среди них одно из ведущих мест принадлежит явлению магнитной индукции, на которое прежде возлагали большие надежды, Приложение 3. Однако эти надежды не оправдались, причиной чему стало отсутствие знаний о принципах построения соответствующих навигационных устройств местоопределения, отсутствие теории индукционной сельскохозяйственной навигации.

Настоящая НИР является поисковой, направлена на трансформацию фундаментальных знаний в области электродинамики, навигации, механизации растениеводства в форму, пригодную для использования в качестве исходных данных при проведении поисковых НИР по созданию конкретных индукционных устройств местоопределения МТА.

Научная цель исследования – формирование теории индукционной сельскохозяйственной навигации, как одного из направлений инструментальной навигации о методах и средствах программирования плановых, и определения фактических траекторий МТА в переменных магнитных полях с помощью явления магнитной индукции.

Практическая цель – получение знаний, необходимых для проведения поисковых НИР и разработки методик проектирования индукционных устройств местоопределения с заданными техническими параметрами.

Задачи исследования. Основные задачи исследования две:

1. изучить навигационные магнитные поля, создаваемые стационарными и мобильными источниками;
 2. исследовать методы программирования плановых и определения фактических траекторий МТА в навигационных магнитных полях;
- а также несколько сопутствующих:
3. обосновать сельскохозяйственную навигацию, как одно из направлений инструментальной навигации;
 4. оценить влияние электропроводимости земли на навигационные магнитные поля;
 5. составить перечень актуальных вопросов для развития индукционной сельхознавигации, не нашедших отражения в настоящей работе.

Научная новизна работы заключается в том, что полученные результаты расширяют существующие границы знаний как в области инструментальной навигации, так и в области механизации растениеводства, дополняя их новым научным направлением – индукционной сельскохозяйственной навигацией, как совокупностью знаний о программировании плановых и определении фактических траекторий роботизированных МТА с помощью явления магнитной индукции. А также в обосновании необходимости формирования сельскохозяйственной навигации, как научного направления, без которого невозможна успешная роботизация МТА.

Теоретическая значимость работы заключается в формировании индукционной сельскохозяйственной навигации, как нового научного направления, которое расширяет области знаний в инструментальной навигации и в механизации растениеводства; создан новый тип низкочастотного навигационного магнитного поля, обладающего волновыми свойствами –

квazиволновое поле, – которое может найти применение также в электроразведочной геофизике, электромеханике и др.

Практическая полезность работы в том, что полученные результаты позволяют планировать и целенаправленно проводить поисковые исследования по созданию конкретных индукционных устройств местоопределения, удовлетворяющих предъявляемым агротехническим требованиям.

Работа может быть использована в качестве аналога для разработки альтернативных направлений сельскохозяйственной навигации - радиотехнической, телевизионной, электромеханической и др., которые дополняют друг друга в различных условиях применения.

Методы исследования. В связи с многоплановостью работы, при проведении исследований использовались различные методы. В т. ч. аналогия, интуиция, мысленный и натурный эксперименты, математическое моделирование, числовой метод, визуализация результатов в графической форме.

Основным математическим приемом, способствовавшим получению новых знаний, стало описание магнитного поля параметрами вектора напряженности; представление вектора в виде проекций на три взаимно перпендикулярные направления существенно упростило анализ сложных магнитных полей, создаваемых несколькими источниками, и упростило синтез новых методов местоопределения МТА.

На защиту выносятся:

1. Теория индукционной сельскохозяйственной навигации, как совокупность знаний:
 - 1.1. о низкочастотных навигационных магнитных полях, создаваемых токами стационарных и магнитных индукторов;
 - 1.2. о методике расчета навигационных магнитных полей, создаваемых токами стационарных и мобильных индукторов произвольной формы;
 - 1.3. о методах программирования плановых траекторий МТА:

- 1.4. об алгоритмах формирования сигналов траекторного рассогласования МТА;
- 1.5. о методике определения основных технических параметров индукционных устройств местоопределения МТА.
2. Положение о необходимости формирования развитой сельскохозяйственной навигации, без которой невозможна успешная автоматизация мобильных процессов растениеводства, обеспечивающая выполнение полевых сельскохозяйственных работ роботизированными машинно-тракторными агрегатами без непосредственного участия человека.
3. Положение о наличии широких навигационных возможностей магнитной индукции, которые позволяют в сжатые сроки автоматизировать процесс местоопределения роботизированных МТА.
4. Положение о необходимости проведения дальнейших прикладных теоретических и экспериментальных исследований для дальнейшего совершенствования индукционной сельскохозяйственной навигации.

Достоверность результатов обеспечивается математическими доказательствами и геометрическими построениями. А также практическим опытом использования явления магнитной индукции для местоопределения морских и наземных объектов за последние сто лет.

Апробация. Результаты работы опубликованы в 10 источниках из перечня ВАК, докладывались на 16 Всесоюзных и Международных конференциях, опубликованы в материалах 6 Международных дистанционных конференциях, в 3 Интернет-ресурсах и 12 других источниках. По результатам исследований получено 8 авторских свидетельств и положительное решение о выдаче патента на изобретения; несколько заявок на выдачу патентов рассматривается в ФИПСе. Содержании диссертации опубликовано в 2-х монографиях, одна из которых издана зарубежным издательством.

Глава 1.

ОБОСНОВАНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ НАВИГАЦИИ

1.1. Определение термина

Термин «навигация» многозначный. Первоначальное значение - «хождение по морю» в отсутствие видимости береговой линии [1]; в начале XX столетия этим термином обозначали плавание судов в видимости берега, в отличие от «мореходной астрономии», применявшейся в открытом море [2].

После появления авиации термин «навигация» распространили на вождение летательных аппаратов [3], поскольку методы определения места нахождения для морских и воздушных судов имели много общего. Термин не относили к вождению объектов, траектории которых жестко фиксированы, например, автомобилей или железнодорожных составов [4].

Изучением навигационных способностей животных с целью совершенствования технических устройств местоопределения занимается наука навигационная бионика [5]. Признавая за животными способность к определению места нахождения и управления своим движением, термин «навигация» в настоящее время распространили на любые управляемые подвижные объекты [6].

Термином «навигация» обозначают не только процесс управления движением и науку о методах и средствах определения параметров и управления движением, но также календарный период, в течение которого осуществляется судоходство в том или ином регионе. В последнее время, в связи с развитием компьютерных технологий, термин «навигация» применяют для обозначения процесса поиска информации, что зачастую не имеет никакого отношения к управлению движением подвижных управляемых объектов.

1.2. «Навигация» в широком значении

Термин «навигация» применяют в широком и в узком значениях. В широком значении «навигация» – процесс управления движением подвижных объектов, примерно синоним «вождения». А также наука о методах и средствах управления движением, задачами которой являются [7]:

1. Программирование плановой траектории движения.
2. Исполнение (контроль) программы траекторного управления, и формирование сигнала траекторного рассогласования.
3. Задание движения, т.е. преобразование сигналов траекторного рассогласования в команды управления скоростью и направлением движения объектов управления.

Навигация – наука прикладная, решает конкретные вопросы управления движением конкретных объектов в конкретных условиях. В зависимости от типа управляемых объектов, навигация в широком значении, как наука и как процесс, разделяется на морскую и речную, воздушную и космическую, наземную и подземную. Поэтому, учитывая специфику движения сельскохозяйственных машин и агрегатов, правомерно выделить из наземной навигации самостоятельное научное направление «навигация сельскохозяйственная», как науку о методах и средствах не только ручного, но прежде всего автоматического управления движением самоходных сельскохозяйственных машин и агрегатов в процессе выполнения ими полевых работ [8]. При этом не исключено, что в будущем в сельскохозяйственной навигации выделятся, например, такие направления, как навигация почвообрабатывающих и уборочных агрегатов, навигация колесных и гусеничных машин, навигация на равнинной местности и в горных условиях, и др.

1.3. «Навигация» в узком значении

В узком значении термина «навигация», как процесс и как наука, не охватывает вопросы задания движения, поэтому её задачи ограничиваются программированием плановой траектории и измерениями параметров движения объектов управления (ОУ). Таких, как:

1. фактического места нахождения ОУ;
2. пространственной ориентации осей ОУ;
3. направления и величины вектора скорости ОУ, его ускорения;
4. угловых ускорений и скоростей ОУ;
5. времени движения;
6. пройденного пути.

Основной задачей навигации в узком значении является определение фактического места нахождения ОУ, и формирование сигнала траекторного рассогласования, как разности между фактическим и требуемым местом нахождения.

В зависимости от физических явлений, используемых для решения навигационных задач, выделяют навигацию радиотехническую и светотехническую, инерциальную и телевизионную, акустическую и воздушную, индукционную и электромеханическую, и т.д.

Для повышения точности и надежности местоопределения, на ответственных ОУ устанавливают навигационные комплексы, в состав которых входят несколько устройств местоопределения, которые используют различные принципы местоопределения и взаимно резервируют друг друга. Использование различных принципов местоопределения МТА перспективно и для растениеводства, отличающегося большим разнообразием типов МТА, видов возделываемых культур и условиями выполнения полевых работ.

В отличие от транспортных средств, где главным требованием является соблюдение графика движения, специфика управления движением МТА за-

ключается в необходимости траекторного управления с погрешностью не более сотых долей метра по всей длине гона, при габаритных размерах МТА до десяти метров и более. Причем качество управления в конечном итоге определяется траекторией движения рабочих органов технологических машин и орудий, которые могут быть навесными и прицепными, располагаться впереди, сбоку или сзади трактора, иметь с ним жесткую или гибкую механическую связь. Поэтому выбор точки МТА, траектория которой программируется, а местонахождение определяется, имеет принципиальное значение.

1.4. Принципы местоопределения объектов управления

В навигации известны три принципа, или способа определения места нахождения управляемых объектов, которые применимы и к сельскохозяйственным самоходным машинам и агрегатам:

1. позиционный;
2. счисления пути;
3. обзорно-сравнительный.

1.4.1. Позиционные методы местоопределения

Позиционные методы местоопределения движущихся управляемых объектов заключаются в создании на местности или в пространстве неподвижной измерительной системы координат, и определении численных значений координат движущихся объектов. При необходимости осуществляют преобразование координат, например – измеренные значения в местной системе координат преобразуют в географические координаты.

Геометрические размеры измерительной системы координат определяются размерами траектории движения объектов управления. Если размеры траектории значительные, то система координат строится, как правило, ра-

диотехническими средствами. При наличии прямой видимости между навигационными точками, с помощью которых создается система координат, и объектом управления, находят применение оптические средства.

Двумерную измерительную систему координат можно задать двумя способами:

- с помощью одной навигационной точки с известными координатами, и направления оси системы координат;
- с помощью двух навигационных точек с известными координатами.

В первом случае измеряются полярные координаты объекта управления. В двумерной системе - на поверхности земли - измеряемыми координатами является дальность r от навигационной точки до объекта управления, и полярный угол φ между осью системы координат и направлением на объект управления. При необходимости полярные координаты преобразуют в прямоугольные системы ОХУ, начало которой совмещено с полярным полюсом, а ось ОУ совмещена с полярной осью:

$$y = r \cdot \cos \varphi; \quad x = r \cdot \sin \varphi.$$

Рассмотренный метод определения координат реализуется однопозиционными угломерно-дальномерными радионавигационными комплексами.

Двухпозиционная прямоугольная измерительная система координат задается при помощи двух навигационных точек с известными координатами.

При этом измеряемыми геометрическими параметрами могут быть:

- 1) расстояния между навигационными точками и объектом управления;
- 2) углы между осью системы координат и направлениями на объект управления;
- 3) сумма расстояний от объекта управления до навигационных точек;
- 4) разность расстояний от объекта управления до навигационных точек.

Определение координат точки N позиционными методами поясняет рисунок 1.1, где точка O – начало полярной и прямоугольной систем координат.

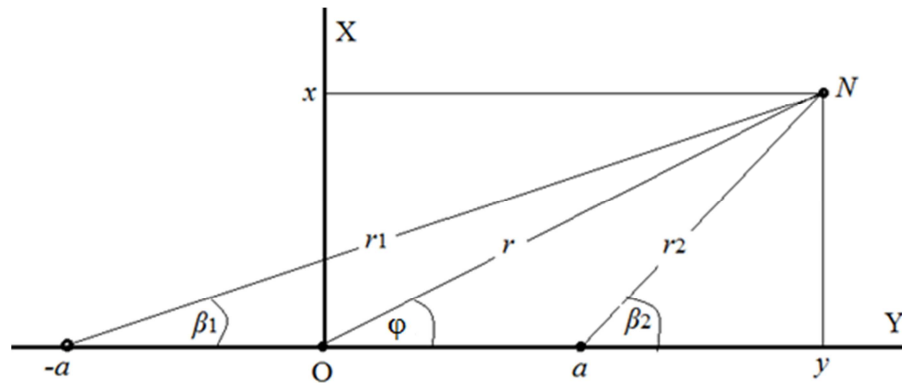


Рисунок 1.1. Навигационная система координат на плоскости

Прямоугольная система координат задается двумя навигационными точками с координатами a и $-a$; объект управления находится в точке N . По измеренным значениям расстояний r_1 и r_2 вычисляют прямоугольные координаты [11]:

$$y = \frac{r_1^2 - r_2^2}{4a}; \quad x = \sqrt{r_1^2 - (a + y)^2}. \quad (1.1)$$

Координаты по известным значениям углов β_1 и β_2 :

$$y = -a \frac{\sin(\beta_1 + \beta_2)}{\sin(\beta_2 - \beta_1)}, \quad x = 2a \frac{\sin\beta_1 \sin\beta_2}{\sin(\beta_2 - \beta_1)}. \quad (1.2)$$

Прежнее название позиционных методов - «методы засечек» или «методы линий положения». Такие названия обусловлены существовавшей ранее технологией местоопределения: капитан корабля или штурман с помощью

циркуля делал на географической карте местности засечки, точка пересечения которых являлась место нахождения корабля. В настоящее время точка пересечения линий возможного положения объекта управления вычисляется, в том числе, по значениям суммы или разности двух расстояний при наличии трех и более навигационных точек.

Позиционные методы позволяют создавать универсальные устройства местоопределения, пригодные для установки на любых объектах управления, но недостатком таких устройств является низкая автономность, так как их работоспособность зависит от наличия и работоспособности стационарного оборудования, с помощью которого создается измерительная система координат.

Позиционные методы можно использовать для определения взаимного положения двух МТА при автоматическом групповом (дублерном) вождении, для чего навигационные точки следует расположить на одном из агрегатов, а ориентир – на другом.

1.4.1. Местоопределение методами счисления пути

Методы счисления пути основаны на определении численного значения измеряемой координаты посредством интегрирования во времени мгновенных значений скорости объекта управления в направлении данной оси системы координат.

В качестве измерительной системы координат может использоваться инерциальная система. Мгновенную скорость объекта управления определяют либо интегрированием ускорений, что позволяет создавать полностью автономные устройства местоопределения, либо непосредственным измерением вдоль осей системы координат.

В сельскохозяйственной навигации метод счисления пути используется для измерения пройденных расстояний, определяя одну координату в одно-

мерной криволинейной системе координат. При этом скорость определяется при помощи «колеса пути», а пройденный путь – по количеству оборотов, совершенных этим колесом на маршруте. Теоретически метод может использоваться также для измерения ортогональной координаты, то-есть бокового скольжения МТА, однако расположение плоскости «колеса пути» перпендикулярно к продольной оси трактора ухудшает преодоление мелких препятствий в виде пожнивных остатков и т.п., что снижает надежность функционирования соответствующих устройств. Более надежным является счисление бокового скольжения МТА бесконтактным методом на основе эффекта Доплера.

Инерциальные средства - гравитационный маятник – в сельскохозяйственной навигации применяют для определения угла наклона трактора. Точно такое же измерение угла наклона штанги опрыскивателя навигационным не является, так как выполняется не в целях управления движением, а для качественного регулирования технологического процесса защиты растений от болезни или вредителей.

1.4.2. Обзорно-сравнительные методы местоопределения

Сущность обзорно-сравнительных методов заключается в сравнении наблюдаемой картины местности с изображением, хранящимся в памяти человека либо в запоминающем устройстве системы автоматического траекторного управления, и формировании сигнала траекторного рассогласования по величине взаимного смещения изображений. При этом могут использоваться изображения местности в ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном или радиодиапазоне электромагнитных волн.

Обзорно-сравнительный метод первоначально применялся при ручном управлении движением и визуальном наблюдении местности. Так, тракторист, сидя на рабочем месте в кабине трактора, визуальным образом следит за рядом

растений, бороздой либо бровкой хлебостоя, на основании своих знаний и опыта мысленно принимает решения о необходимости корректировки траектории движения трактора, тем самым реализуя биологический обзорно-сравнительный метод местоопределения МТА.

Одним из вариантов обзорно-сравнительных методов является местоопределение объекта управления относительно физических направляющих линий – самолета вдоль русла реки, железнодорожного полотна или кромки леса, судна вдоль береговой линии и т.п.

1.5. Современное состояние сельскохозяйственной навигации

Современное состояние сельскохозяйственной навигации характеризуется биологическими методами управления движением МТА. Тракторист:

- планирует требуемую траекторию движения МТА;
- визуально определяет фактическое положение МТА относительно требуемого;
- с помощью органов чувств определяет линейные и угловые скорости и ускорения, углы крена и галопирования (тангажа);
- на основании собственного опыта и знаний принимает решения о необходимости корректировки траектории МТА;
- мышечной силой рук и ног воздействует на органы управления трактора, изменяя направление движения МТА в сторону снижения появляющихся траекторных рассогласований.

Простейшими навигационными приспособлениями, помогающими трактористу управлять траекторией движения МТА, являются маркер и следоуказатель для повышения точности вождения посевных агрегатов, вешки для разбивки полей на загоны, креномер на крутосклонных тракторах для предупреждения об опасных уклонах местности, спидометр для измерения скорости движения и пройденного пути, часы для определения времени движения.

Состояние сельскохозяйственной навигации достаточно полно охарактеризовано С.П. Гельфенбейном в монографии «Терранавигация» [12] еще в 1981 году, и мало изменилось за прошедшее время. Сегодня, как и прежде, тракторист находится на тракторе, использует свои органы чувств, знания и опыт для принятия управленческих решений, а мускульную силу – для реализации этих решений.

Широкомасштабные работы в области сельскохозяйственной навигации выполнялись в 1960-1990 гг в СССР в соответствии с государственной программой работ по автоматизации сельского хозяйства. В работах принимали участие сотни организаций многих министерств и ведомств, тысячи специалистов. Выдано сотни авторских свидетельств на изобретения, в которых предлагались различные технические решения, направленные на автоматизацию вождения самоходной сельскохозяйственной техники.

Несмотря на усилия, предпринимаемые в области автоматизации вождения МТА, были получены скромные результаты. Одной из причин этого следует признать то обстоятельство, что поиск велся не в области навигации, а в области автоматического управления и регулирования стационарных процессов [13]. Так, по аналогии со стационарными процессами, в качестве датчиков погрешности автоматического вождения МТА повсеместно применяли трехпозиционные контактные «чувствительные головки»; аналоговые сигналы линейных датчиков преобразовывали в релейные «лево – норма – право». Выходные сигналы датчиков поступали непосредственно на электромагниты исполнительных механизмов рулевого управления, что в сочетании с запаздываниями и люфтами в механических узлах трактора не могло обеспечить устойчивого и точного траекторного управления. Для повышения устойчивости траекторного управления применялась широтно-импульсная модуляция управляющего сигнала, линеаризующая передаточную характеристику системы траекторного управления [14], что не решало проблему устойчивости траекторного управления при повышенной скорости движения и из-

менении тягового сопротивления технологических машин-орудий в широких пределах.

В настоящее время на МТА практическое применение находят системы «параллельного вождения» и «автопилоты» со спутниковыми GPS-ГЛОНАСС «агронавигаторами». Опыт их применения подтверждает, что автоматизация траекторного управления существенно облегчает условия труда механизаторов и повышает качество полевых работ благодаря более точному траекторному управлению. Однако GPS-ГЛОНАСС-автопилотам присущи два серьезных недостатка:

- высокая стоимость оборудования и его эксплуатации, что ограничивает применение автопилотов только на мощной дорогостоящей сельскохозяйственной технике, обеспечивающей максимальный экономический эффект; на МТА с маломощными тракторами экономическая эффективность значительно ниже, а срок окупаемости затрат – выше;
- зависимость работоспособности GPS-ГЛОНАСС-автопилотов от состояния навигационных спутников, что ограничивает их автономность и технологическую надежность, не позволяет удалять тракториста с МТА и выполнять полевые работы в отсутствие человека в кабине трактора.

Спутниковые агронавигаторы эффективно помогают трактористу, но ввиду отсутствия автономности не позволяют удалять человека с МТА. Поэтому их наличие не может служить основанием для отказа от поиска альтернативных решений, которые могут быть более простыми в реализации и обслуживании, менее дорогостоящими, более автономными и экономически более выгодными. Поиск таких решений является актуальной задачей, без решения которой невозможен переход от механизации мобильных процессов растениеводства к автоматизации.

1.6. Перспективы сельскохозяйственной навигации

Известно несколько исторических этапов, когда переход механизации растениеводства на более высокий уровень способствовал избыточному производству продуктов питания, росту народонаселения и развитию человеческой цивилизации:

1. Переход от собирательства съедобных плодов и корней диких растений к культурному земледелию, с применением простейших средств «малой механизации» - серпа для кошения, палки для обмолота колосьев, деревянной мотыги для рыхления почвы.
2. Применение деревянной сохи и гужевой тяги; орошаемое земледелие.
3. Изобретение плуга.
4. Изобретение трактора, переход от гужевой тяги к машинной.

Следующим этапом неизбежно станет переход от механизации растениеводства к автоматизации, которая освободит человека не только от тяжелого, но и от легкого физического труда, а также от труда умственного по принятию решений. Что будет иметь большое социальное значение, так как позволит заменить тяжелый и малопrestижный труд в кабине трактора более комфортным и престижным трудом диспетчера в помещении. А также позволит оптимизировать основные технико-эксплуатационные параметры МТА по критериям экологической безопасности и топливной экономичности, что предотвратит машинную деградацию почвы и сохранит её плодородие. Круглосуточная работа МТА сократит сроки выполнения полевых работ, а более высокая точность траекторного управления повысит качество выполнения полевых работ, снизит потери растений и повысит урожайность.

В конечном итоге автоматизация позволит увеличить производство продукции растениеводства и снизить её себестоимость, что увеличит продуктовую безопасность страны.

1.7. Способы программирования плановых траекторий МТА

Возможны два типа программ плановых траекторий МТА: а) зависимые и б) независимые от предыдущего прохода МТА. В первом случае программирование плановой траектории каждого прохода осуществляется непосредственно во время предыдущего смежного прохода. Во втором случае программирование выполняется заблаговременно, и программа движения не зависит от фактической траектории предыдущего прохода МТА.

Зависимое программирование может выполняться на местности в виде следа на земле, или аппаратно – в виде зависимости некоторого навигационного параметра вдоль программируемой плановой траектории [15]. При этом первый проход должен выполняться в режиме ручного управления, либо по независимой программе.

В процессе движения рабочие органы технологических машин-орудий (ТМО) перемещаются не строго прямолинейно – вследствие неоднородности прочности грунта по ширине захвата почвообрабатывающих ТМО они поворачиваются вокруг точки прицепа, в результате чего их ширина захвата меняется в некоторых пределах вокруг среднего значения. Так, согласно агротехническим требованиям, фактическая ширина захвата отвальных плугов может изменяться на $\pm 10\%$, что для 4-корпусных плугов с шириной захвата 1,4 м составляет $\pm 0,14$ м.

Зависимое программирование позволяет учитывать случайные изменения ширины захвата ТМО, что повышает слитность смежных проходов; недостатком зависимого программирования является возможность прогрессирующего искривления плановых траекторий вследствие последовательного накопления ошибок траекторного управления.

Независимое от предыдущего прохода программирование возможно посредством запоминания траекторий при выполнении одной из предыдущих операций, например – нарезания гребней, посева или посадки растений, либо

в виде математического уравнения, описывающего зависимость измеряемого навигационного параметра от расстояния до поворотных полос. При этом вычисление планового значения навигационного параметра возможно как непосредственно в процессе движения, так и заблаговременно, с сохранением результатов вычислений в табличной форме в запоминающем устройстве системы траекторного управления.

Программы, хранящиеся на местности в виде следа прохода МТА, могут считываться при помощи электромеханических, акустических, телевизионных, лазерных, светотехнических и т.п. навигационных устройств местоопределения. Конструктивно такие устройства могут быть достаточно простыми, но обладают низкой универсальностью.

Универсальные устройства местоопределения, работоспособность которых не зависит от выполняемой МТА технологической операции, хранят программы плановых траекторий в запоминающих устройствах систем траекторного управления. Примером таких устройств являются GPS-ГЛОНАСС - агронавигаторы сельскохозяйственных «автопилотов» и «систем параллельного вождения». Как правило, в автопилотах используется независимое программирование плановых траекторий, а в системах параллельного вождения – зависимое.

Известны предложения программирования плановых траекторий в постоянном магнитном поле Земли и в инерциальной системе координат. Однако ввиду вибраций и ударов на тракторе, отсутствия привязки к местности и нечувствительности к боковому плоско-параллельному смещению трактора, программирование плановых траекторий посредством задания направления движения, без привязки к местности, практического интереса не представляет.

Программирование плановых траекторий одиночных роботизированных МТА осуществляется в неподвижных системах координат. Так, в спутниковых системах местоопределения система координат задается с помощью

не менее 3-х навигационных спутников, географические координаты которых в каждый момент времени известны с высокой точностью. Это позволяет вычислять географические координаты МТА по измеренным расстояниям до навигационных спутников, удаленных более чем на 20 тыс. км. При этом плановая траектория программируется взаимной зависимостью географической широты и долготы МТА, которая представляет геометрическую «направляющую линию», программирующую траекторию антенны навигационного приемника агронавигатора.

Тракторист пользуется визуально-обзорным методом местоопределения относительно физической направляющей линии – борозды или ряда растений, которые в данном случае представляют собой криволинейную ось двумерной прямоугольной системы координат. Второй осью системы координат является перпендикуляр к первой, вдоль которого измеряется ошибка траекторного рассогласования.

Принцип местоопределения не меняется, если рассогласование измеряет не тракторист, а то или иное устройство местоопределения, например - электромеханическое, оптическое или акустическое.

При дублирном вождении МТА плановая траектория ведомого агрегата программируется траекторией ведущего непосредственно в процессе их движения. При этом процесс местоопределения можно описывать в двух системах координат – подвижной и неподвижной. В подвижной определяется взаимное положение ведущего и ведомого агрегатов, а в неподвижной – траектория агрегатов на местности.

1.8. Методы местоопределения МТА

Для местоопределения роботизированных МТА можно использовать позиционные и обзорно-сравнительные методы; метод счисления пути пригоден для измерения расстояния, пройденного на гоне и поворотной полосе.

Позиционные методы можно реализовать методами радионавигации с использованием местной системы координат, задаваемой двумя навигационными точками непосредственно на поле. Но так как скорость распространения радиоволн зависит от состояния приземного слоя атмосферы и растительного покрова, которые изменяются в широких пределах, то погрешность местоопределения зачастую превышает допустимые значения.

Работоспособность GPS-ГЛОНАСС-агронавигаторов зависит от состояния навигационных спутников, поэтому они не обладают необходимой автономностью. Это, а также высокая стоимость оборудования и его эксплуатации, ограничивают возможности спутниковой радионавигации для организации безлюдных технологий полевых сельскохозяйственных работ.

Средства спутниковой радионавигации незаменимы для организации «точного земледелия» и экономного расходования дорогостоящих ядохимикатов и удобрений. Но так как при этом местоопределение выполняется с целью управления работой технологических машин, а не управления движением МТА, то более правильно относить его к «позиционированию», а не к навигации. Что и имеет место в действительности.

Перспективным методом сельскохозяйственной навигации является местоопределения МТА относительно физических направляющих линий, выполняющих функцию оси системы координат, по расстоянию до которой определяется фактическое место нахождения МТА. Если копирование выполняется посредством сканирования местности, то местоопределение осуществляется обзорно-сравнительным методом, а если непосредственным измерением расстояния до направляющей линии – то позиционным.

Бесконтактные и контактные устройства местоопределения МТА относительно рядков растений или следа предыдущего прохода достаточно простые и обладают высокой автономностью, но недостаточной универсальностью.

Универсальные и относительно автономные устройства местоопределения МТА могут быть созданы с применением «геометрических» направляющих линий, геометрические либо физические параметры точек которых удовлетворяют заданному математическому уравнению или иному условию.

Программирование плановых траекторий при помощи лазерных лучей невозможно ввиду неровности макрорельефа полей, влияния тумана, пыли и солнечной засветки. А также ввиду необходимости задания направления луча с погрешностью не более $\pm 0,05$ м на расстоянии 1000 м, или ± 10 угловых секунд, что представляет сложную техническую задачу.

Постоянное магнитное поля Земли позволяет в какой-то мере контролировать пространственное положение горизонтальных осей трактора, но не направление движения, и тем более не величину бокового смещения МТА относительно требуемого, измеряемого сотыми долями метра.

1.9. Неподвижные и подвижные направляющие линии

Исходя из результатов анализа возможных вариантов программирования плановых траекторий МТА, можно утверждать, что методы ближней навигации, с использованием физических направляющих линий, позволяют создавать более автономные, по сравнению с методами дальней навигации, устройства местоопределения.

Между направляющей линией и линией положения (возможного) существует большое различие – это разные понятия. Плановая траектория – геометрическое место точек на местности, к которым должна стремиться фактическая траектория; длина плановой траектории определяется длиной пути, проходимого МТА в процессе выполнения всей работы.

Направляющая линия – физическая (реальная) или геометрическая (виртуальная) линия, точки которой являются базой для измерения величины траекторного рассогласования.

В простейшем случае направляющая линия может быть следом предыдущего прохода МТА на местности, например – вертикальной стенкой борозды. Естественно, что плановая траектория пахотного агрегата при очередном проходе смещена относительно борозды, например – на половину ширины захвата ТМО. То есть, плановая траектория не совпадает с направляющей линией.

В рассматриваемом случае программирование плановой траектории заключается в задании номинального расстояния r_0 от некоторой точки МТА до стенки борозды. При этом программированием, в широком значении термина, является процесс образования направляющей линии, т.е. борозды, и задание номинального расстояния r_0 . Если же r_0 является конструктивной постоянной системы траекторного управления, то программирование ограничивается естественным образованием стенки борозды при предыдущем проходе пахотного агрегата.

Возможен вариант, когда значение расстояния r_0 не сохраняется постоянным по длине гона, а изменяется, например, ввиду сложного макрорельефа и необходимости учета сползания МТА вниз по склону. В этом случае программированием плановой траектории правомерно называть, прежде всего, задание зависимости расстояния r_0 от положения МТА на гоне, не упуская из виду и нарезание борозды.

Аналогично, при программировании плановой траектории виртуальной направляющей линией, например, описываемой уравнением:

$$y_{\text{пл}} = \frac{r_1^2 - r_2^2}{4a} = F(x) = \text{var}, \quad (1.3)$$

процесс программирования включает задание зависимости $F(x)$ в табличной (цифровой) или аналитической (аналоговой) форме.

Направляющая линия располагается вне агрегата, на местности. Поэтому может быть не только стационарной, но и мобильной – перемещаться в

пространстве вместе с другим, ведущим МТА. Например, электрическая лампочка накаливания на тракторе-лидере излучает свет равномерно во все стороны – каждый луч может выполнять функцию направляющей линии для трактора-робота ведомого МТА. Но траектория лидера непредсказуема – он перемещается по произвольной кривой, задаваемой трактористом. Вместе с лидером перемещаются и все направляющие линии, создаваемые светящейся электрической лампочкой. При этом «программа движения» трактора-робота на местности подвижная, определяется траекторией трактора-лидера. В то же время программа движения, как зависимость взаимного бокового смещения ведущего и ведомого агрегатов от дистанции между ними, постоянная, описываемая, например, уравнениями (1.1).

Траектория дублера программируется двояко: траекторией лидера и формой направляющей линии. В частном случае скорость перемещения лидера может быть нулевой, и тогда направляющая линия будет неподвижной, а процесс местоопределения трактора-дублера не будет отличаться от местоопределения одиночных тракторов-роботов относительно длинных направляющих линий. Это обстоятельство позволяет рассматривать автоматическое траекторное управление автономным трактором-роботом как частный случай управления движением трактором-дублером; последнее является эффективным методом исследования процессов автоматического траекторного управления, так как позволяет выявить важные трудно обнаруживаемые иными способами факторы, оказывающие существенное влияние на качество автоматического траекторного управления.

1.10. Важные понятия сельскохозяйственной навигации

1. Направляющая линия – составная часть программы плановой траектории МТА; криволинейная координатная ось, относительно которой определяется фактическое место нахождения МТА. Может быть непо-

движной и подвижной; в последнем случае связана с другой самоходной машиной, траектория которой дублируется.

2. Точка копирования программы плановой траектории – точка направляющей линии, расстояние от которой до МТА определяет сигнал траекторного рассогласования, формируемый конкретным устройством местоопределения.
3. Репер – реальная или виртуальная (физическая или геометрическая) точка МТА, расстояние от которой до точки копирования является траекторным рассогласованием. Положение репера на МТА зависит от конструктивного исполнения чувствительного элемента устройства местоопределения.
4. Программируемая плановая траектория МТА – траектория репера.
5. Линия (возможного) положения МТА – геометрическое место точек нахождения репера, соответствующих мгновенному измеренному значению сигнала траекторного рассогласования.
6. Точка прицепа – точка сочленения технологической машины или орудия с трактором. Может располагаться впереди, сбоку или сзади трактора. В последнем случае сочленение, как правило, шарнирное, - допускает в некоторых пределах вращение ТМО вокруг точки прицепа.
7. Конструктивная продольная ось трактора – горизонтальная прямая, лежащая в продольной вертикальной плоскости симметрии трактора.
8. Динамическая продольная ось трактора – направление вектора скорости середины задней оси колесного трактора или центра масс гусеничного.
9. Угол бокового скольжения трактора – угол между конструктивной и динамической продольными осями трактора.

Причиной бокового скольжения трактора может быть сползание на склоне под действием сил тяжести, асимметричность тягового сопротивления по бортам трактора, не идентичность движителей, конструктивные по-

грешности и прочее. Угол бокового скольжения может быть значительным у тракторов со всеми управляемыми колесами, когда плоскости колес не параллельны продольной оси трактора, рисунок 1.2.

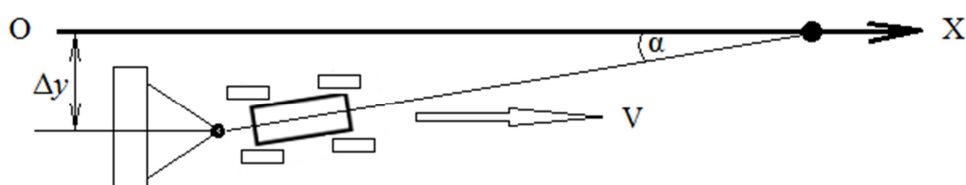


Рисунок 1.2. Влияние бокового скольжения трактора на погрешность траекторного управления

Постоянный угол бокового скольжения компенсируется исходной наладкой устройства местоопределения. Однако, как показал эксперимент, угол бокового скольжения в процессе движения непрерывно меняется, причем диапазон изменения может превышать $\pm 1^\circ$. Если продольное расстояние между репером и точкой прицепа составляет, например, 6 м, то траектория точки прицепа смещается относительно плановой на расстояния более $\pm 0,1$ м, что зачастую превышает допустимую погрешность автоматического траекторного управления, и требует корректировки траектории по углу бокового скольжения. Корректировка может осуществляться при помощи дискового самоустанавливающегося ножа [16], плоскость которого совпадает с направлением вектора скорости, рисунок 1.3.



Рисунок 1.3. Курсомер для измерение угла бокового скольжения трактора

1.11. Навигационные возможности явления магнитной индукции

Сущность явления магнитной индукции заключается в появлении электрического напряжения при изменении магнитного потока. Явление магнитной индукции широко применяется в современной жизни на производстве и в быту, в том числе:

- в электроэнергетике – для получения электрической энергии, её трансформации и преобразования в механическую энергию;
- в связи – для беспроводной передачи сигналов;
- в геофизике – для поиска полезных ископаемых в недрах Земли;
- в медицине – для физиолечения;
- в науке – для исследований и получения новых знаний;
- в приборостроении – для создания всевозможных датчиков, измерительных приборов, преобразователей информации и др;
- в теплотехнике – для нагрева материалов;
- в светотехнике – для создания индукционных ламп, и др.

Впервые явление магнитной индукции нашло практическое применение в навигации еще в годы Первой мировой войны, когда использовалось для проводки судов через минные поля. Согласно [2], в Портсмуте (Англия) был установлен источник тока частотой 500 Гц, который через контактный прерыватель соединялся с подводным бронированным кабелем длиной 31,5 км, сопротивлением 27 Ом. В качестве обратного проводника использовались морская вода и земля. На своих кораблях размещались две квадратные рамки (рисунок 1.4.) площадью 1 м^2 и наушники, которые позволяли рулевому на слух обнаружить «ведущий кабель» на расстоянии более 750 м до него. На расстоянии 550 м появлялась возможность различать громкость сигналов каждой рамки и корректировать траекторию движения судна параллельно кабелю. Аналогичная система испытывалась в г. Бресте (Франция) в 1919 г при длине подводного кабеля 80 км и токе кабеля 1,5 А. Площадь рамок увеличена до $2,5 \text{ м}^2$, рамки содержали по 60+10 витков. Использовался усилитель сигналов, что позволяло обнаруживать кабель на расстояниях до 2-х км и более. Позже «электрический лоцман» широко применялся для обозначения фарватеров, однако в 30-е годы прошлого столетия уступил место коротковолновым радиомаякам.

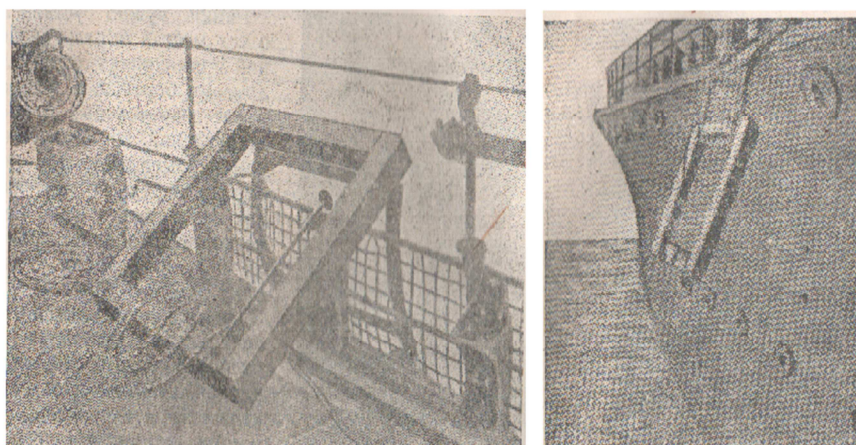


Рис.1.4. Транспортное и рабочее положение приемных рамок «электрического лоцмана»

Начиная с 40-х годов прошлого столетия, проводились исследования по применению магнитной индукции для местоопределения воздушных судов на взлетно-посадочной полосе при слепой посадке, а также для автоматизации вождения автомобилей по автомагистралям [17]. Однако по разным причинам такие работы не получили дальнейшего развития.

В середине прошлого столетия индукционные системы тракторного управления МТА разрабатывали многие зарубежные ученые и изобретатели. Так, на выставке сельскохозяйственной техники в Стенлее (Великобритания) в 1969 г демонстрировался автоматический трактор «Massey-Ferguson» с индукционным УМО [18], рисунок 1.5. Система автоматического управления разрабатывалась сотрудниками Редингского университета с 1960 года; сообщалось, что промышленное производство таких тракторов планируется на 1973 год компанией «Auto-track Ltd Co».

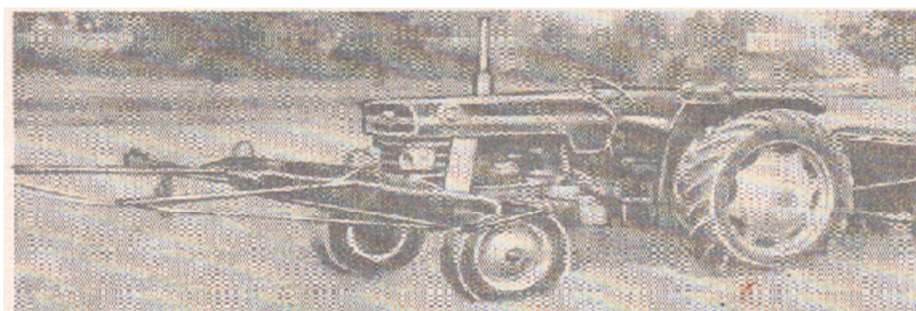


Рисунок 1.5. Трактор MF-165 с автоматом вождения «Автотрек»

Для создания навигационного магнитного поля использовался стальной провод диаметром 0,8 мм с пластиковой изоляцией, который укладывался дренажно-котовым плугом на глубину около 50 см с шагом закладки 5,5 м. Удельные затраты на подготовку поля составили не более 60 долл./га. После 8 лет нахождения в земле остаточный ресурс провода оценивался не менее 15 лет. Стоимость комплекта оборудования, устанавливаемого на трак-

торе, 1500 долл. при сроке службы 10-15 лет. Для питания проводов использовался аккумулятор 12 В и генератор переменного тока с током потребления около 0,1 А. Погрешность траекторного управления, измеренная по траектории передних колес, не превышала $\pm 2,5$ см. Аналогичные работы проводились и в других зарубежных организациях.

Работы по созданию индукционных систем автоматического вождения МТА проводились в Одесском филиале Союзного государственного Тракторного института (ОФ НАТИ; А.И. Драновский), во Всесоюзном институте механизации сельского хозяйства (ВИМ; В.К. Хорошенко), во Всесоюзном институте электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ; С.А. Литинский), во Всесоюзном институте сельскохозяйственного машиностроения (ВИСХОМ) и др.

Аналогичные работы выполнялись в Сибирском НИИ механизации и электрификации сельского хозяйства (СибИМЭ) под руководством и при непосредственном участии автора. Разрабатывалась система автоматического группового управления двумя агрегатами одним трактористом; в процессе разработки были созданы индукционное устройство определения взаимного положения ведущего и ведомого агрегатов, рисунок 1.6, а также другие устройства системы группового управления. После доведения всех узлов трактора-робота до работоспособного состояния, рамка с током была заменена подземным проводом, а трактор-дублер превращен в автономный трактор-робот. Учитывая перспективность гусеничных тракторов, дальнейшее совершенствование оборудования проводилось на гусеничном тракторе Т-150, рисунок 1.7. Это потребовало замены автоматического регулятора траекторного управления, так как управления осуществлялось отдельным переключением передач по бортам трактора, однако остальные элементы системы автоматического управления, контроля и сигнализации сохранились неизменными.



Рисунок 1.6. Групповая работа двух пахотных агрегатов с трактором-дублером на базе серийного трактора Т-150К



Рисунок 1.7. Роботизированный пахотный агрегат с индукционным устройством местоопределения



Рисунок 1.8. Индукционная система автоматического вождения тракторов на прочностном треке Одесского филиала НАТИ

Созданная система автоматического траекторного управления с индукционным устройством местоопределения успешно использовалась в ОФ НАТИ при ускоренных ресурсных испытаниях мобильной техники на прочностном треке, рисунок 1.8; положительные результаты были получены также при испытаниях автоматического траекторного управления широкозахватной электрифицированной дождевальная машиной ДФ-120 в саратовской области, рисунок 1.9.

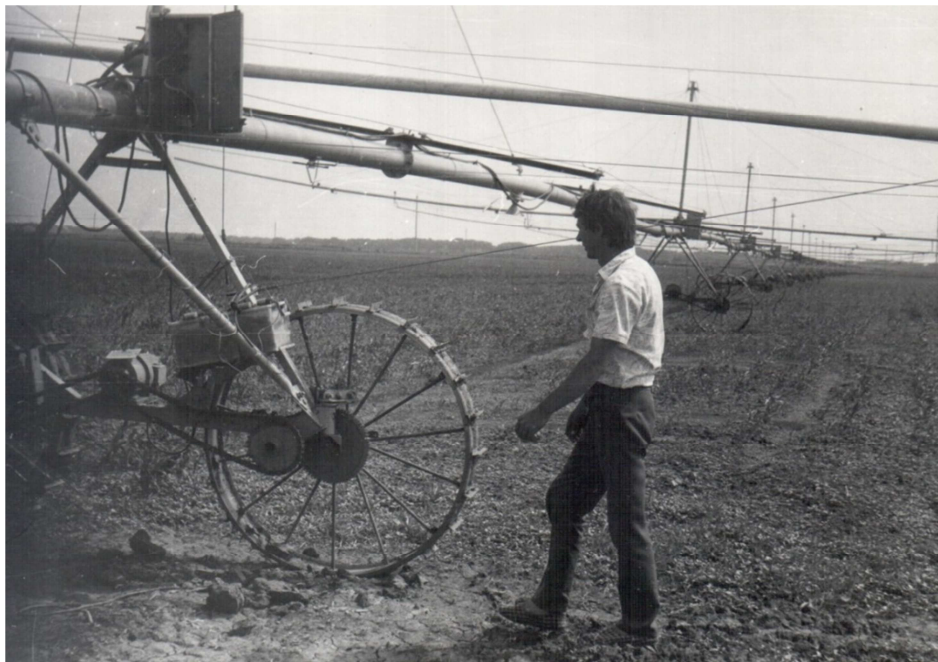


Рисунок 1.9. Полевые испытания индукционной системы автоматического вождения электрифицированной дождевальной машины ДФ-120 с индукционным устройством местоопределения

Выводы по гл. 1

1. Управление движением сельскохозяйственных самоходных машин относится к навигации – науке о методах и средствах управления движением подвижных управляемых объектов.
2. В узком значении термина навигация – наука о методах и средствах программирования плановой траектории и измерении параметров движения управляемого объекта.
3. Современное состояние механизации мобильных процессов растениеводства характеризуется ручным управлением движением машинно-тракторных агрегатов и биологическим обзорно-сравнительным методом определения места нахождения МТА относительно требуемого.
4. Необходимость автоматизации МТА на уровне, обеспечивающем выполнение полевых работ без участия человека, требует разработки инструментальных методов и технических средств управления движением МТА, что составляет предмет нового научного направления - сельскохозяйственной навигации.
5. Задачами сельскохозяйственной навигации в широком значении являются:
 - программирование плановых траекторий движения МТА на рабочем гоне и поворотной полосе;
 - определение места нахождения и параметров движения МТА;
 - формирование сигнала траекторного рассогласования;
 - преобразование сигнала траекторного рассогласования в команды управления рулевым механизмом трактора.
6. Основной задачей навигации в узком значении является определение местоположения МТА и формирование сигнала траекторного рассогласования.
7. Для местоопределения МТА перспективны методы:

- счисления пути – для измерения пройденного расстояния;
 - позиционные и обзорно-сравнительные – для определения фактического местоположения МТА и формирования сигналов траекторного рассогласования.
8. В сельскохозяйственной навигации в качестве программ плановых траекторий МТА используются физические и геометрические направляющие линии, которые образуют измерительные системы координат.
9. В зависимости от способа формирования и типа, направляющие линии могут быть:
- физическими, образованными следом прохода МТА на почве, стационарной шпалерной проволокой, лазерным лучом или линией изофаз электромагнитного поля;
 - геометрическими, координаты точек которых удовлетворяют наперед заданному условию;
 - зависимыми либо независимыми от предыдущего прохода МТА;
 - стационарными либо мобильными.
10. Недостатком направляющих линий в виде следа на почве является низкая универсальность навигационных устройств местоопределения, использующих такие программы плановых траекторий.
11. Зависимое и независимое программирование плановых траекторий может осуществляться с помощью физических и геометрических направляющих линий.
12. Независимое программирование плановых траекторий позволяет создавать универсальные навигационные устройства местоопределения. Однако часть оборудования, создающая измерительную систему координат, при этом размещается вне МТА, что делает соответствующие устройства местоопределения ограниченно автономными.
13. Неподвижные направляющие линии позволяют автоматизировать вождение одиночных агрегатов; мобильные направляющие линии позво-

ляют организовать дублирное вождение ведомого агрегата по траектории, задаваемой ведущим агрегатом.

14. Для повышения слитности смежных проходов МТА сигнал траекторного рассогласования, формируемой по месту нахождения реперной точки трактора, необходимо приводить к траектории точки прицепа технологической машины-орудия либо к рабочим органам последней.
15. Для определения места нахождения МТА относительно направляющих линий могут использоваться различные физические явления, в частности – связанные с электромагнитными полями.
16. Электромагнитное излучение оптического диапазона распространяется прямолинейно, что позволяет создавать направляющие линии, например, лазерными лучами. Однако пыль, туман, солнечная засветка, неровности макрорельефа ограничивают возможности оптического диапазона для программирования траекторий МТА.
17. Радиоволны распространяются с постоянной скоростью, что позволяет определять расстояния по времени распространения радиоволны. Однако зависимость скорости распространения радиоволн от состояния атмосферы в приземном слое и растительности снижает точность местоопределения.
18. Низкая автономность GPS-ГЛОНАСС-агронавигаторов, высокая стоимость оборудования и его эксплуатации ограничивают возможности спутниковой радионавигации для реализации безлюдных технологий выполнения полевых сельскохозяйственных работ.
19. Для местоопределения МТА перспективный диапазон электромагнитных полей с частотой до нескольких килогерц, позволяющий программировать плановые траектории и определять фактическое место нахождения МТА при помощи явления магнитной индукции.

Глава 2. АНАЛИЗ НАВИГАЦИОННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Введение

Источниками навигационных магнитных полей являются переменные токи, протекающие в изолированных проводах, которые могут быть заземлены, образовывать изолированные от земли замкнутые петли или быть намотаны в виде небольших многовитковых рамок. Для местоопределения автономного трактора-робота провод закладывается по всей длине гона в подпахотный слой, на глубину 0,8...1 м. При этом расстояние между смежными проводами может быть от единиц до нескольких десятков метров. Напряженность магнитного поля измеряется с помощью индукционных преобразователей (ИП) на высоте до 1 м и более над поверхностью земли, поэтому номинальное расстояние между плоскостью проводов и точкой измерения магнитного поля принимается в настоящей работе равным 2 м. Совокупность применяемых ИП образует «магнитоприемник»; источники индукционных магнитных полей правомерно называть «индукторами».

2.1. Магнитное поле бесконечного проводника с током

Согласно закону полного тока, величина (модуль) напряженности H магнитного поля бесконечного прямолинейного проводника с током I обратно пропорциональна расстоянию r до оси проводника:

$$H = \frac{I}{2\pi r}. \quad (2.1)$$

Напряженность магнитного поля – векторная величина, характеризуется модулем и направлением вектора \mathbf{H} , рисунок 2.1.

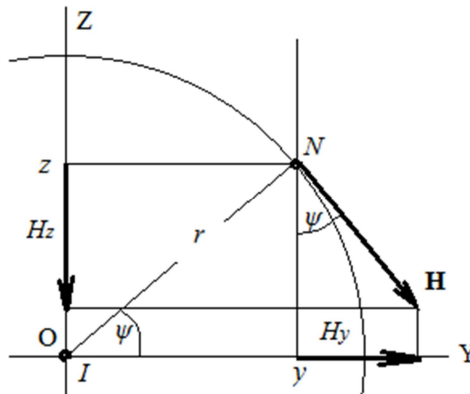


Рисунок 2.1. Вектор напряженности \mathbf{H} в точке N , создаваемый током I

Вектор напряженности \mathbf{H} образует прямой угол с радиус-вектором r . Поэтому в прямоугольной системе координат OXYZ, ось OX которой совмещена с током I , вектор напряженности образует с осью OZ угол ψ , величина которого зависит от координат $(y; z)$ точки наблюдения поля:

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{z}{y} = \operatorname{arcsin} \frac{z}{\sqrt{z^2+y^2}} = \operatorname{arccos} \frac{y}{\sqrt{z^2+y^2}}. \quad (2.2)$$

На рисунке 2.2 приведена зависимость угла ψ от координаты y при $z = 2$ м.

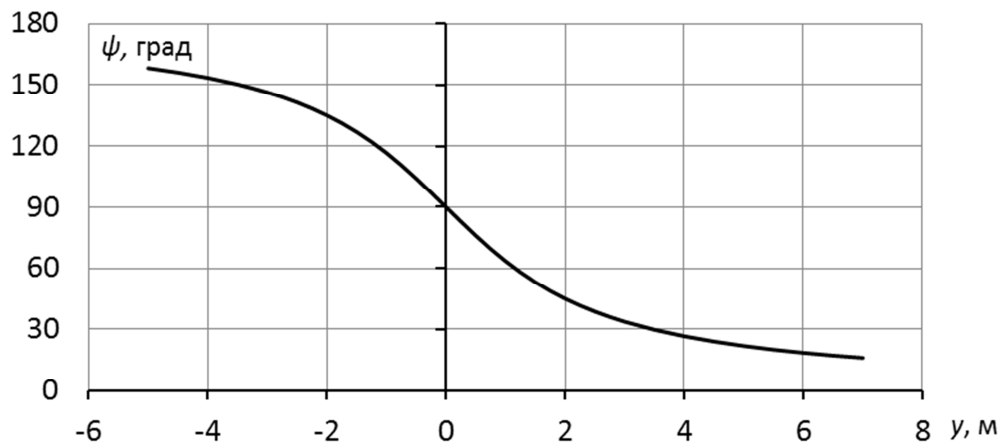


Рисунок 2.2. Зависимость угла ψ от координаты y при $z = 2$ м

Вектор \mathbf{H} лежит в вертикальной плоскости, параллельной плоскости OYZ . Значения проекций вектора напряженности на оси OX , OY и OZ системы координат описываются уравнениями:

$$H_x = 0; \quad H_y = H \sin \psi; \quad H_z = H \cos \psi. \quad (2.3)$$

Поскольку $H \equiv 1/r$, то условию $H = \text{const}$ соответствует $r = \text{const}$. Поэтому геометрическое место точек с одинаковым значением модуля H образует в пространстве равносигнальную поверхность в виде цилиндра, центр которого совпадает с током I . Сечения равносигнальной поверхности вертикальной плоскостью, перпендикулярной к проводнику с током, образует равносигнальную линию (РСЛ) в виде окружности с радиусом r :

$$r = \frac{I}{2\pi H} \quad (2.4)$$

С целью упрощения записи ниже везде принимается $I = 2\pi$, если не оговорено иное. С учетом этого (2.4) принимает вид:

$$r = \frac{1}{H} \quad (2.5)$$

Сечение равносигнальной поверхности горизонтальной плоскостью, параллельной плоскости OXY , образует две РСЛ, значения координат y которых зависят от расстояния z между проводником и секущей плоскостью:

$$y = \pm \sqrt{r^2 - z^2} = \pm \sqrt{1/H^2 - z^2}. \quad (2.6)$$

Для двух соосных РСЛ с радиусами r_1 и r_2 при $z = \text{const}$ справедливо:

$$y_1^2 - y_2^2 = r_1^2 - r_2^2,$$

поэтому на высоте z расстояние Δy между двумя РСЛ с напряженностями H_1 и H_2 описывается уравнением:

$$\Delta y = y_1 - y_2 = \Delta r \frac{r_1 + r_2}{y_1 + y_2}. \quad (2.7)$$

Так как при $z \neq 0$ соблюдается неравенство $(r_1 + r_2) > (y_1 + y_2)$, то всегда:

$$\Delta y > \Delta r.$$

Учитывая (2.2), (2.3) и (2.5), проекция вектора напряженности на вертикальную ось описывается уравнением:

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

Поэтому уравнение РСЛ $H_z = \text{const} = C$ записывается в виде:

$$y^2 - y y_0 + z^2 = 0, \quad (2.8)$$

где $y_0 = 1/C = \text{const}$ – значение координаты y РСЛ при $z = 0$.

Уравнение (2.8) описывает окружность, диаметр которой равен y_0 , а центр лежит на оси OY . На рисунке 2.3 показаны РСЛ проекций вектора напряженности в плоскости YOZ при $y_0 = 0,5; 0,7; 1$.

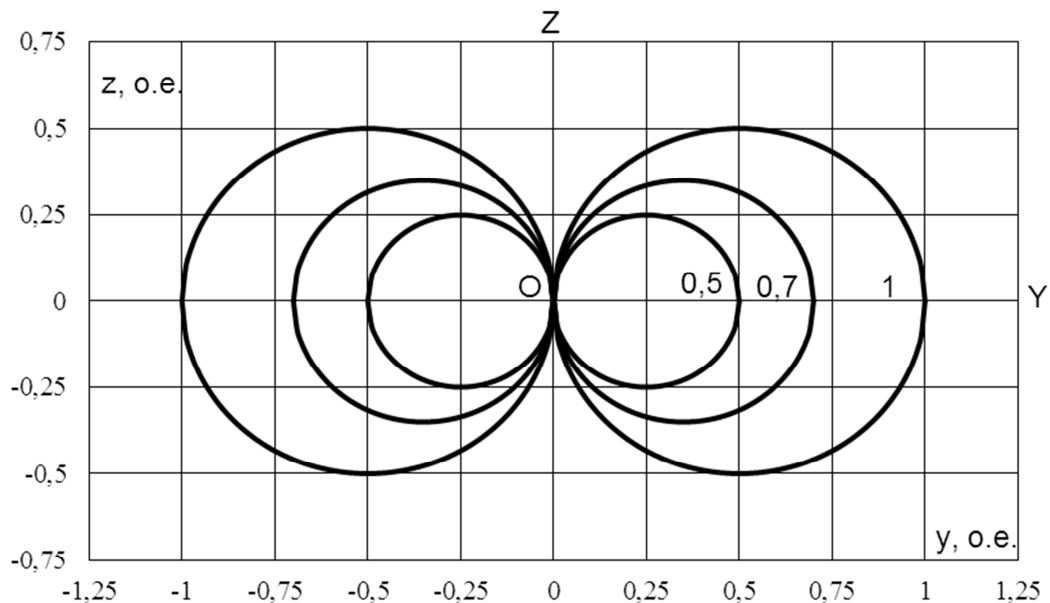


Рисунок 2.3. Форма равносигнальных линий проекций H_z вектора напряженности на вертикальную ось OZ

Как видно, равносигнальные линии проекций вектора напряженности на ось OZ образуют окружности, соприкасающиеся с токоведущим проводником. Вследствие осевой симметрии магнитного поля такая же картина сохранится для РСЛ проекции вектора напряженности на произвольное направление, образующее с осью OZ угол γ , в чем можно убедиться поворотом системы координат вокруг точки O на угол γ до совмещения оси OY с осью проекций.

Так как вектор напряженности в точке с координатами (y, z) направлен по касательной к магнитной силовой линии, которая проходит через эту точку, и образует с осью OY угол $(\pi/2 - \psi)$, то можно записать:

$$\frac{dz}{dy} = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right) = \frac{y}{z}.$$

Решение этого дифференциального уравнения описывает форму магнитных силовых линий:

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

Следовательно, силовые линии магнитного поля, создаваемого прямолинейным током, совпадают с равносигнальными линиями модуля вектора напряженности.

2.2. Магнитное поле проводника конечной длины

Согласно закону Био – Савара – Лапласа, напряженность H магнитного поля, создаваемого током $I = 2\pi$ в произвольной точке N на расстоянии r от оси провода, запишется в виде:

$$H = \frac{\cos \beta_1 + \cos \beta_2}{2r}. \quad (2.9)$$

где β_1 и β_2 – углы при основании $2l$ треугольника, вершиной которого является точка N наблюдения поля, рисунок 2.4.

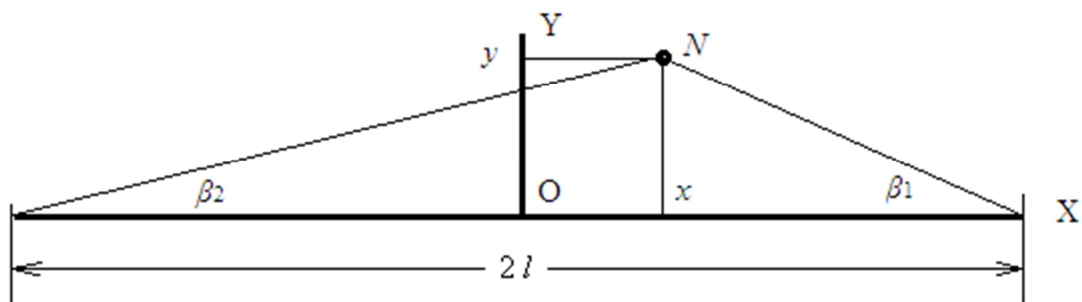


Рисунок 2.4. Магнитное поле проводника конечной длины $L = 2l$

Если $\beta_1 \approx \beta_2 \approx 0^\circ$, то числитель (2.9) ≈ 2 . В этом случае напряженность магнитного поля проводника конечной длины мало отличается от напряженности поля бесконечного проводника. При том же расстоянии r , но при $\beta_1 = 90^\circ$, что имеет место при $x = l$, числитель (2.9) равен 1, поэтому напряженность H полубесконечного проводника в 2 раза меньше, чем бесконечного; суммарная напряженность равна сумме напряженностей, создаваемых левым и правым отрезками проводника.

Пусть начало системы координат совмещено с концом проводника. Тогда отрезок проводника длиной x будет создавать на оси OY , в точке с координатой y , напряженность, величина которой составит часть напряженности полубесконечного проводника:

$$H = \frac{\cos\beta}{y} = \frac{x}{y\sqrt{x^2 + y^2}}$$

На рисунке 2.5 показан график доли напряженности, создаваемой начальным отрезком полубесконечного проводника в процентах к напряженности, создаваемой всей длиной проводника. Как видно, отрезок длиной $x = y$ создает 70,7% напряженности полубесконечного проводника; 90% измеренного значения напряженности создает отрезок, длина которого в 2 раза превышает расстояние между проводником и точкой измерения.

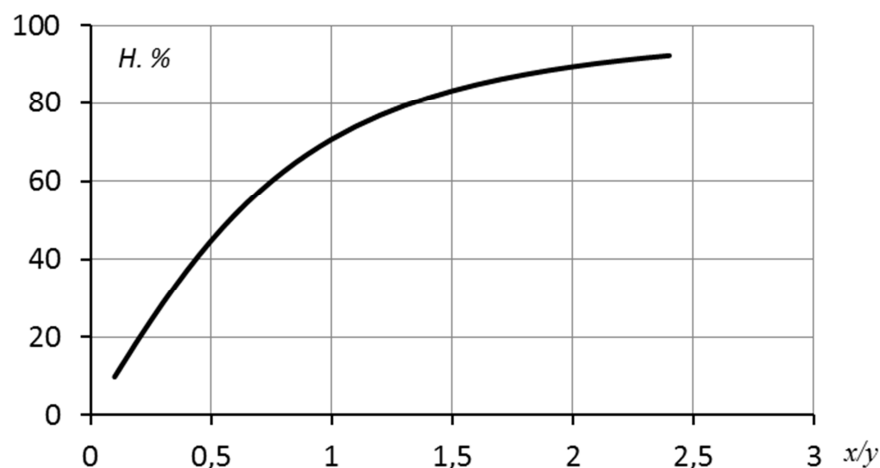


Рисунок 2.5. Доля напряженности, создаваемой начальным участком полубесконечного проводника

Напряженность, создаваемая двухсторонним относительно точки N наблюдения полем проводником, равна арифметической сумме напряженностей, создаваемых ветвями проводника слева и справа от точки N . Поэтому напряженность проводника длиной, например, $2r$ на расстоянии $0,5r$ от одного из его концов, согласно рисунка 2.5, составит $(44,7 + 83,2)/2 = 63,95\%$ от напряженности бесконечного проводника.

На рисунке 2.6 показан график «дефицита» напряженности одностороннего проводника конечной длины по сравнению с напряженностью, создаваемой полубесконечным проводником [19]. График показывает, что если напряженность вычисляется, например, с точностью 1%, то бесконечным можно считать проводник, длина которого x в каждую сторону превышает 5-кратное расстояние y от проводника до точки наблюдения поля. Если же вычисление проводится с точностью 0,1%, то бесконечным можно считать проводник, длина которого более 16у в каждую сторону.

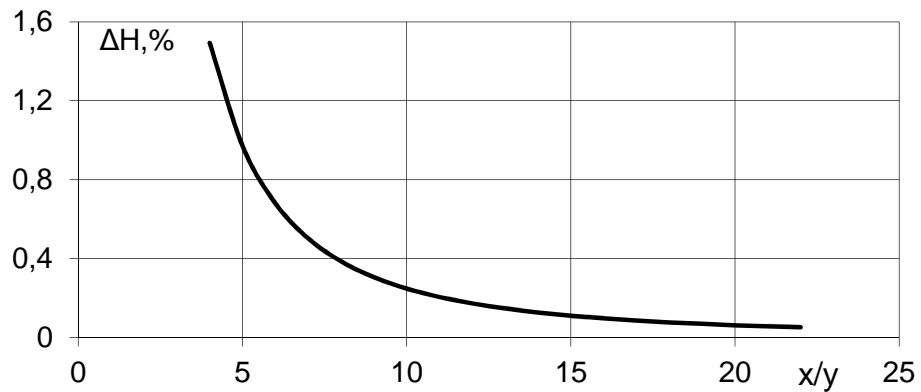


Рисунок 2.6. Разность напряженностей одностороннего проводника конечной длины x/y и полубесконечного

Уравнение РСЛ модуля вектора напряженности, создаваемой током $I = 2\pi$ (А) в прямоугольной системе координат $OXYZ$ при $z = 0$ и размещении начала системы координат в средней части проводника длиной $2l$:

$$H = \frac{1}{2y} \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2 + y^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + y^2}} \right) = \text{const.} \quad (2.10)$$

Зависимость $y(x)$, удовлетворяющую условию (2.10), можно определить числовым методом, задавшись значениями l , H , x , и подбирая значения y . Результаты подбора при $2l = 1000$ м приведены в таблице 2.1, где напряженность H (мА/м) указана при токе $I = 2\pi$ (А). Данные таблицы показывают, что высокой прямолинейностью обладают РСЛ вблизи проводника; при $y \approx l$ прямолинейный участок РСЛ практически отсутствует.

Для точек за нормалью к концу проводника $x > l$, поэтому второе слагаемое в скобках (2.10) отрицательное и РСЛ быстро приближается к оси проводника; все РСЛ сходятся к торцу проводника – на продолжении его оси напряженность отсутствует.

Табл. 2.1. Координаты точек РСЛ напряженности магнитного поля, создаваемого током прямолинейного проводника $2l = 1000$ м

$x, \text{ м}$	0	300	400	450	480	490	497	500	$H, \text{ мА/м}$
$y, \text{ м}$	5	4,999	4,997	4,988	4,929	4,76	4,001	2,5	199,99
	10	9,995	9,977	9,907	9,517	8,762	6,976	5,001	99,98
	15	14,984	14,924	14,701	13,694	12,248	9,717	7,503	66,637
	20	19,963	19,823	19,341	17,532	15,446	12,367	10,007	49,96
	30	29,879	29,436	28,121	24,521	21,388	17,556	15,025	33,273
	50	49,469	47,766	43,969	37,044	32,5	27,81	25,117	19,901
	100	96,554	88,871	78,274	65,724	59,371	53,76	50,929	9,8058
	500	451,22	406,64	375,49	352,71	344,24	338	335,25	1,4142
	1000	950,29	908,93	882,42	864,36	857,94	853,33	851,32	0,4472

На рисунке 2.7 показано при $z = 0$ сечение равносигнальной поверхности с максимальным диаметром 20 м горизонтальной плоскостью вблизи конца полубесконечного проводника, совпадающего с осью OX .

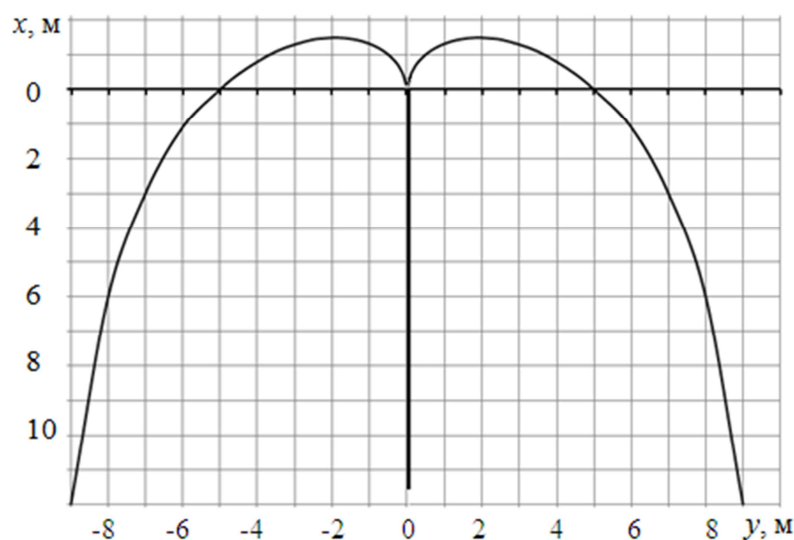


Рисунок 2.7. Форма РСЛ модуля вектора напряженности $H_0 = 100$ мА/м полубесконечного проводника

Расчет показывает, что РСЛ, удаленная от полубесконечного проводника на максимальное расстояние y_0 , заходит за конец проводника на $\Delta x = 0,15y_0$, находясь при этом на расстоянии $\Delta y = 0,191y_0$ от оси проводника, таблица 2.2. С конца проводника эта точка «видна» под углом $\beta \approx 128^\circ$.

Табл. 2.2. Координаты точек РСЛ полубесконечного проводника
(начало координат совмещено с концом проводника)

Δx , м	0,0	-1,0	-1,25	-1,5	-1,1	-1,0	-0,5	0,0
y , м	5,0	3,694	3,163	1,91	0,584	0,463	0,103	0,0

На рисунке 2.8 показана зависимость напряженности от расстояния y до проводника длиной 1000 м вдоль прямых $x = \text{const}$; значения x указаны над кривыми. Ось ординат градуирована при $I = 2\pi$ (А).

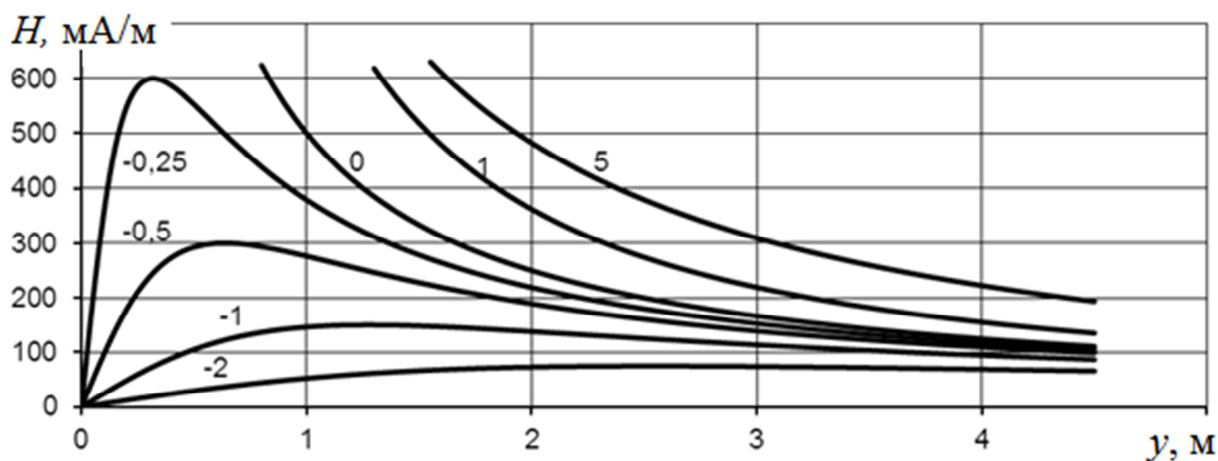


Рисунок 2.8. Распределение напряженности вблизи конца проводника длиной 1000 м (цифрами обозначена координата x)

2.3. РСЛ модуля вектора напряженности вне плоскости проводов

Уравнение РСЛ модуля вектора напряженности при $z \neq 0$:

$$H = \frac{1}{2\sqrt{y^2 + z^2}} \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2 + y^2 + z^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + y^2 + z^2}} \right) = \text{const.} \quad (2.11)$$

Результаты численного решения (2.11) при $H = 100$ мА/м показаны на рисунке 2.9.

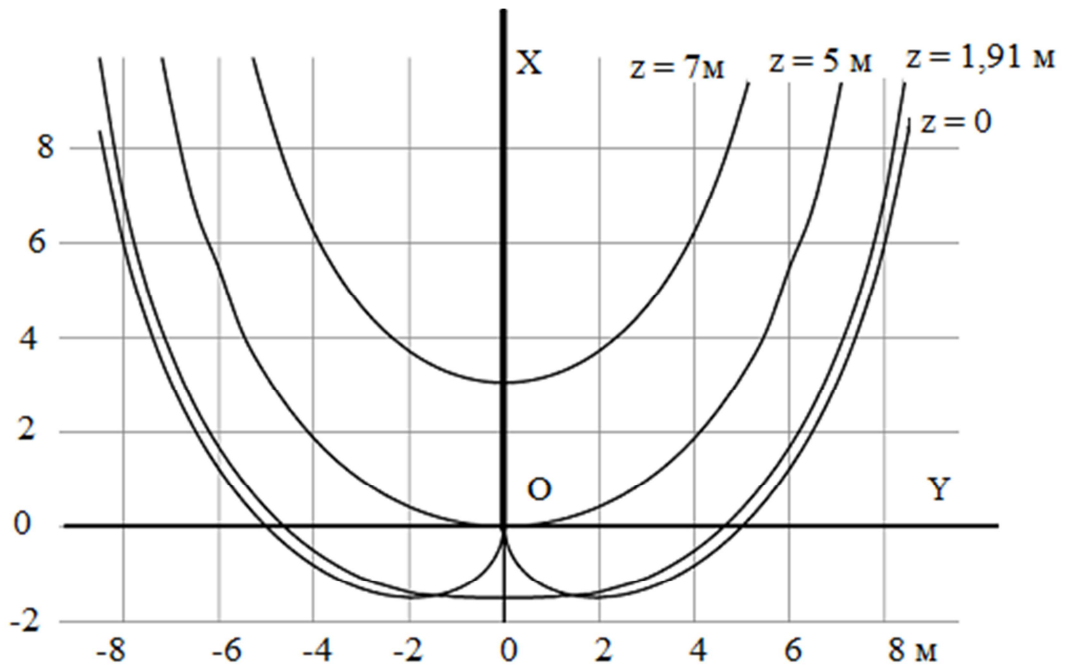


Рисунок 2.9. Форма РСЛ $H = 100$ мА/м на высоте z

Учитывая (2.2), (2.3) и (2.5), для проекций вектора напряженности на оси OY и OZ можно записать:

$$H_y = H \sin \psi = \frac{z}{z^2 + y^2}; \quad H_z = H \cos \psi = \frac{y}{z^2 + y^2}. \quad (2.12)$$

Зависимости H , H_y и H_z от координаты y при $z = 1$ о.е. показаны на рисунке 2.10; отрицательным значениям H_z соответствует изменение направления проекции вектора напряженности на противоположное.

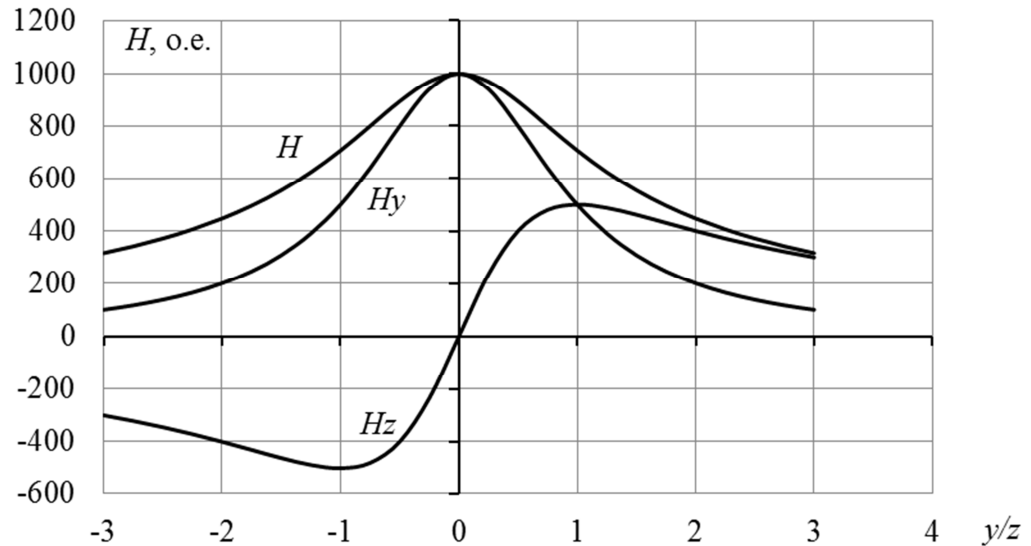


Рисунок 2.10. Зависимость модуля и проекций вектора напряженности от бокового смещения y точки наблюдения поля на высоте $z = 1$ о.е.

Проекция вектора напряженности на направление, образующее в плоскости OZY с вертикалью произвольный угол γ :

$$H_\gamma = H \cos(\psi - \gamma) = H_z \cos \gamma + H_y \sin \gamma. \quad (2.13)$$

Зависимости H_γ от y при $\gamma = \pm 30^\circ$ и $\pm 60^\circ$ приведены на рисунке 2.11.

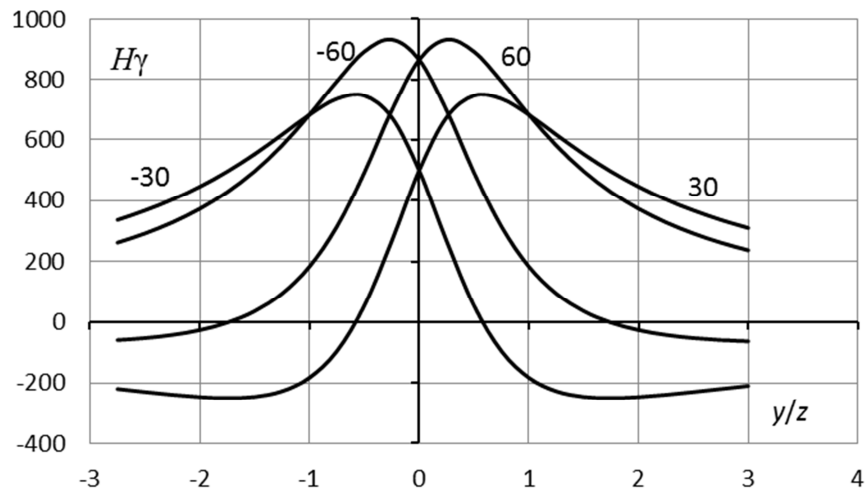


Рисунок 2.11. Зависимость проекций вектора напряженности на направления $\pm\gamma$ от координаты y на высоте $z = 1$ о.е.

2.4. Градиенты модуля вектора напряженности и его проекций

Градиенты, то есть скорость изменения, модуля и проекций вектора напряженности в направлении оси ОУ, а также угла наклона ψ , пропорциональны производной от функции по координате y :

$$\text{grad}H = \frac{\partial H}{\partial y} = -\frac{y}{\sqrt{z^2 + y^2}^3}; \quad \text{grad}H_y = \frac{\partial H_y}{\partial y} = -\frac{2zy}{(z^2 + y^2)^2}; \quad (2.14)$$

$$\text{grad}H_z = \frac{\partial H_z}{\partial y} = -\frac{y^2 - z^2}{(z^2 + y^2)^2}; \quad \text{grad}\psi = \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{z}{z^2 + y^2}. \quad (2.15)$$

Зависимость градиента угла ψ наклона вектора напряженности к вертикали вдоль оси ОУ приведена на рисунке 2.12, а градиента модуля и проекций вектора напряженности от y/z на рисунке 2.13.

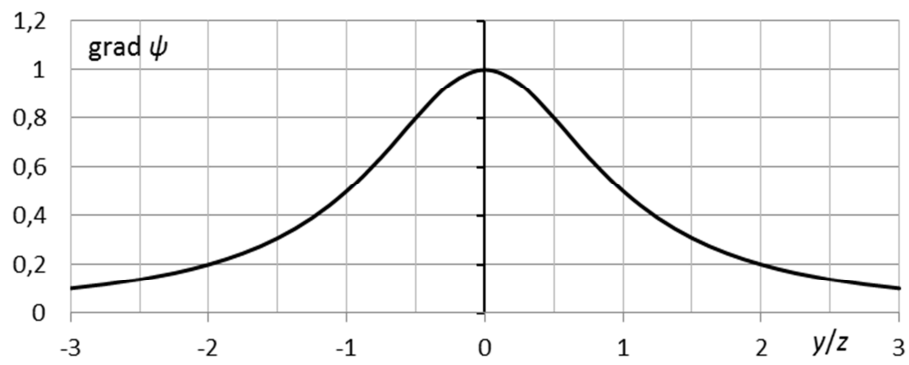


Рисунок 2.12. Градиент угла ψ вдоль оси OY (рад/о.е.)

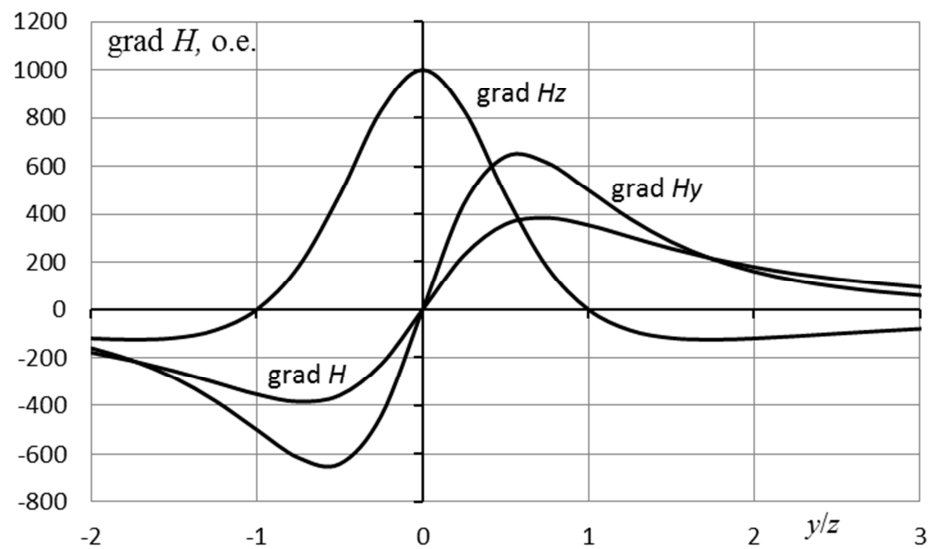


Рисунок 2.13. Градиент модуля и проекций вектора напряженности вдоль оси OY

Максимальному значению градиента модуля вектора напряженности соответствует условие:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0.$$

Откуда экстремальное значение координаты y : $y_{\text{экстр}} = 0,707z$.

Аналогично для градиента H_y : $y_{\text{экстр}} = 0,577z$.

2.5. Магнитное поле тока заземлителей

Для создания замкнутой цепи тока концы проводника можно заземлить. При этом обратный ток, протекая в земле, создает магнитное поле, которое суммируется с полем прямого тока, изменяя величину и направление вектора напряженности суммарного поля.

2.5.1. Обратный ток в земле

Предположим, что электрическое сопротивление земли одинаковое во всём рассматриваемом объеме, а заземлители на концах проводника выполнены в виде полусфер. Тогда растекание тока каждого заземлителя в земле лучеобразное, и эквипотенциальные поверхности образуют полусферы, центр которых совпадает с центром заземлителя [20], рисунок 2.14.

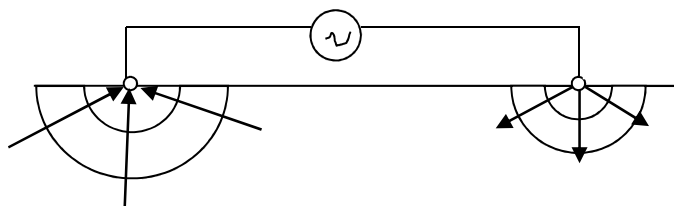


Рисунок 2.14. Стеkanie тока с заземлителей в землю

Удельная плотность тока j в земле на расстоянии r от центра заземлителя определится как отношение тока заземлителя к площади полусферы, центр которой совпадает с заземлителем. Так как площадь S полусфериче-

ской эквипотенциальной поверхности равна $S = 2\pi r^2$, то плотность тока через эту поверхность $j = I/2\pi r^2$. Принимая $I = 2\pi$, получим: $j = 1/r^2$.

На поверхности земли вблизи проводника длиной $2l$ токи обоих заземлителей совпадают по направлению, поэтому плотность тока равна сумме плотностей токов каждого заземлителя:

$$j = \frac{1}{(l-x)^2} + \frac{1}{(l+x)^2} = 2 \frac{l^2 + x^2}{(l^2 - x^2)^2}.$$

Так, если $2l = 1000$ м, $I = 2\pi$ (А), $x = 0$, то плотность обратного тока, протекающего параллельно проводу вблизи поверхности земли $j = 8$ мкА/м². По мере удаления от провода направления токов обоих заземлителей образуют между собой некоторый угол; значение суммарного тока можно определить векторным сложением составляющих. В общем случае удельная плотность тока в земле:

$$j^2 = j_1^2 + j_2^2 + j_1 j_2 \cos(\beta_1 + \beta_2).$$

Так, при длине проводника 1000 м плотность тока на глубине 500 м в средней части длины проводника составит 35% от плотности тока непосредственно вблизи поверхности.

Вышесказанное справедливо для заземлителей любой формы, если расстояние r между точкой наблюдения тока и заземлителем в несколько раз превышает наибольший размер заземлителя.

2.5.2. Магнитное поле обратного тока

Обратный ток (ток заземлителей) протекает на значительных расстояниях от провода, но каждая его часть вносит свой вклад в значение напряженности, наблюдаемое на поверхности земли. Для определения напряженности, создаваемой на поверхности земли током заземлителя, можно вос-

пользоваться законом полного тока (2.1) с учетом протекания только в одном полупространстве:

$$H_3 = \frac{1}{2\sqrt{(l \pm x)^2 + y^2}}$$

Силовые линии магнитного поля, создаваемого током заземлителя, образуют на поверхности земли горизонтальные концентрические окружности с центром в точке заземления; напряженность суммарного магнитного поля заземлителей равна векторной сумме напряженностей, создаваемых обоими заземлителями.

Зависимость напряженности магнитного поля, создаваемого током заземлителя, от высоты z точки наблюдения поля над земной поверхностью описывается законом Био – Савара – Лапласа:

$$H_3 = \frac{1}{2\sqrt{(l \pm x)^2 + y^2}} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{(l \pm x)^2 + z^2 + y^2}} \right).$$

Значения проекций вектора напряженности тока заземлителей на продольную ОХ и поперечную ОУ оси системы координат определяются аналогично полю прямого тока проводника:

$$H_{3y} = H_3 \frac{l \pm x}{\sqrt{(l \pm x)^2 + y^2}}; \quad H_{3x} = H_3 \frac{y}{\sqrt{(l \pm x)^2 + y^2}}.$$

2.6. Суммарное магнитное поле прямого и обратного токов

Напряженность суммарного магнитного поля, создаваемого прямым током проводника, находящимся на поверхности земли, и обратным током в земле, удобно определять следующим образом [16]:

- разложить каждый вектор на проекции H_x , H_y , H_z по трем взаимно-перпендикулярным направлениям;
- сложить одноименные проекции: $H_{\Sigma i} = \Sigma H_i$;
- вычислить модуль вектора напряженности суммарного поля:

$$H_{\Sigma} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} ;$$

- по величине проекций H_i вычислить углы между вектором H_{Σ} и осями ОХ, ОУ, ОZ системы координат:

$$\psi_i = \arccos \frac{H_i}{H_{\Sigma}}.$$

Так как обратный ток протекает навстречу прямому току проводника, то составляющие H_{zy} обоих заземлителей в верхнем полупространстве (над землей) направлены встречно составляющей H_y тока проводника, уменьшая суммарную напряженность вдали и увеличивая в непосредственной близости от заземлителей. Составляющие H_{zx} обоих заземлителей направлены встречно друг другу и вычитаются; эти составляющие меняют знак при изменении знака координаты y точки наблюдения поля.

Для точек на линии $x = |l|$ при $z = 0$ модуль H вектора напряженности проводника равен модулю H_z вектора напряженности, создаваемой током ближнего заземления: $H = H_z$. А так как для точек в плоскости ХОУ векторы H и H_z взаимно-перпендикулярные, то вектор суммарного поля отклонится от вертикали на угол $\psi = 45^\circ$ в плоскости, параллельной ХОZ.

Результаты вычислений напряженности результирующего магнитного поля прямого и обратного токов на поверхности земли при $2l = 1000$ м приведены в таблице 2.3, где в графе «град.» приведены значения угла ψ наклона вектора напряженности к вертикали. Наклон обусловлен током заземлителей, причем при $x = l$ угол наклона несколько превышает 45° . Последнее объясняется конечной длиной проводника и бесконечным полупространством

земли, в результате чего напряженность поля заземления незначительно превышает напряженность поля проводника. Однако над поверхностью земли это условие не соблюдается, так как при $z > 0$ напряженность, создаваемая током заземлителя, меньше чем при $z = 0$.

Табл. 2.3. Значения модуля и угла наклона вектора напряженности суммарного магнитного поля прямого и обратного токов

x, м	y = 5м		y = 10м		y=15м	
	мА/м	град.	мА/м	град.	мА/м	град.
0	200	0,5729	100	1,1458	66,665	1,7184
100	200	0,5968	100	1,1935	66,665	1,7898
200	200	0,682	99,995	1,3638	66,66	2,0448
250	200	0,7639	99,99	1,5272	66,655	2,2894
300	199,99	0,8951	99,98	1,7891	66,64	2,681
350	199,98	1,123	99,96	2,2436	66,61	3,3594
400	199,95	1,5902	99,9	3,1725	66,52	4,7391
430	199,89	2,1965	99,785	4,3706	66,35	6,5013
450	199,78	3,0054	99,565	5,9515	66,03	8,7858
460	199,65	3,7107	99,31	7,3087	65,68	10,701
470	199,36	4,877	98,785	9,4991	64,99	13,683
480	198,56	7,1602	97,43	13,546	63,375	18,792
490	194,76	13,412	92,525	22,708	58,91	28,405
500	141,43	45,001	70,715	45,006	47,146	45,013

В плоскости проводов, лежащих на поверхности земли, магнитное поле обратного тока увеличивает напряженность вблизи заземлителей, уменьшая искривление РСЛ. В таблице 2.4 приведены координаты РСЛ модуля напряженности суммарного магнитного поля, создаваемого прямым и обратным

токами в плоскости проводов. Как видно, отклонение $\Delta y = 1\%$ наблюдается примерно на расстоянии $(l-x) = 3,5y_0$ до конца провода, а не $5y_0$, как это имеет место для напряженности поля только прямого тока (см. рис. 2.6).

Таблица 2.4. Составляющие суммарного магнитного поля прямого и обратного токов равносигнальной линии $H = 100,0$ мА/м при $z = 0$

x , м	H_z , мА/м	H , мА/м	H_Σ , мА/м	y , м
0	1,9996	99,98	100	10
100	2,0828	99,9775	99,999	10
200	2,3799	99,9672	99,995	10
250	2,6648	99,9656	100	9,999
300	3,1215	99,9538	100	9,998
350	3,9134	99,9159	99,992	9,997
400	5,5288	99,8491	100	9,99
430	7,6047	99,7061	99,996	9,979
450	10,325	99,4316	99,966	9,96
460	12,639	99,1881	99,99	9,933
470	16,322	98,6514	99,993	9,882
480	22,931	97,3213	99,986	9,755
490	36,951	92,8915	99,971	9,32
500	70,677	70,6696	99,947	7,075

Величину вектора напряженности суммарного магнитного поля проводника и точечного заземлителя над поверхностью земли, и пространственную ориентацию вектора, можно определить по проекциям векторов на оси прямоугольной системы координат OXYZ:

$$H_{zy} = \frac{l-x}{2[(l\pm x)^2+y^2]} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{(l\pm x)^2+z^2+y^2}}\right).$$

$$H_{zx} = \frac{y}{2[(l\pm x)^2+y^2]} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{(l\pm x)^2+z^2+y^2}}\right).$$

$$H_y = \frac{z}{2(z^2+y^2)} \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+z^2+y^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+z^2+y^2}} \right),$$

$$H_z = \frac{y}{2(z^2+y^2)} \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+z^2+y^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+z^2+y^2}} \right).$$

Модуль вектора напряженности суммарного магнитного поля проводника и заземлителя:

$$H_\Sigma = \sqrt{H_{3x}^2 + (H_y - H_{3y})^2 + H_z^2}.$$

Угол ψ_Σ наклона вектора H_Σ к вертикальной оси OZ:

$$\psi_\Sigma = \arctg \frac{\sqrt{H_{3x}^2 + (H_y - H_{3y})^2}}{H_z}.$$

В таблице 2.5 приведены результаты расчета напряженности (мА/м) вдоль прямой $y = 10$ м на высоте $z = 2$ м для провода $2l = 1000$ м при токе 2π (А). Здесь в графах 2, 3 и 4 приведены значения напряженности, создаваемой заземлителями, в графах 5, 6, 7 – создаваемые током провода; в графе 8 приведено значение модуля вектора напряженности суммарного поля. Данные таблицы показывают, что магнитное поле заземлителей оказывает сложное влияние на напряженность суммарного поля – в средней части проводника снижает, а при расстояниях менее 10 м до конца провода, когда напряженность заземлителя превышает горизонтальную составляющую H_y , увеличивает.

Табл.2.5. Распределение напряженности вдоль прямой $y = 10$ м на высоте $z = 2$ при длине проводника 1000 м

x , м	H_{3y1}	H_{3y2}	H_{3x1}	H_y	H_z	H	H_Σ
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,9956	0,9956	0,0199	19,229	96,144	98,048	97,676
100	1,243	0,8333	0,0311	19,228	96,138	98,042	97,656
200	1,6537	0,7143	0,0551	19,225	96,126	98,03	97,593

Окончание таблицы 2.5.

1	2	3	4	5	6	7	8
300	2,4687	0,625	0,1234	19,218	96,091	97,994	97,435
350	3,2742	0,5882	0,2183	19,209	96,043	97,945	97,262
400	4,851	0,5556	0,4851	19,181	95,906	97,805	96,891
430	6,7994	0,5376	0,9713	19,13	95,652	97,546	96,381
450	9,2314	0,5263	1,8463	19,037	95,184	97,069	95,653
460	11,182	0,5208	2,7954	18,933	94,664	96,538	94,98
470	14,025	0,5155	4,6751	18,719	93,596	95,449	93,806
480	18,146	0,5102	9,0729	18,182	90,907	92,708	91,36
490	21,288	0,5051	21,288	16,348	81,738	83,356	84,639
495	16,221	0,5025	32,441	13,848	69,242	70,613	76,519
497	10,973	0,5015	36,576	12,329	61,645	62,866	71,684
498	7,6198	0,501	38,099	11,466	57,329	58,465	68,916
498,5	5,7994	0,5008	38,663	11,015	55,073	56,164	67,454
499	3,9076	0,5005	39,076	10,554	52,769	53,814	65,949
499,5	1,9664	0,5003	39,329	10,086	50,431	51,43	64,406
500	0	0,5	39,414	9,6155	48,077	49,03	62,833

2.7. Магнитное поле Г-образного проводника

Искривление равносигнальных линий вблизи заземления нежелательно, так как требует вынесения заземлителей за пределы рабочей зоны, что не всегда возможно.

Вынос заземлителей за поворотную полосу можно уменьшить либо устранить, сместив заземлитель не в направлении гонового провода, а вбок, в сторону РСЛ. В этом случае суммарное магнитное поле создается током пяти источников: тремя участками проводника и двумя заземлителями – изменяя длину боковых участков, можно изменять напряженность магнитного поля вдоль гонового проводника.

Для математического описания магнитного поля Г-образного проводника разместим начало системы координат в месте перегиба проводника на поворотной полосе и направим ось ОХ вдоль гонового проводника длиной L . Тогда координаты ближнего заземлителя $x = 0, y = m$, а удаленного $x = L, y = m$.

В точке с координатами $(x; y)$ составляющие напряженности описываются уравнениями:

- создаваемой током гонового проводника длиной L м:

$$H_{z1} = \frac{y}{2(y^2+z^2)} \left(\frac{L-x}{\sqrt{(L-x)^2+y^2+z^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \right),$$

$$H_{y1} = \frac{z}{2(y^2+z^2)} \left(\frac{L-x}{\sqrt{(L-x)^2+y^2+z^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \right);$$

- создаваемой током ближнего проводника длиной m :

$$H_{z2} = \frac{x}{2(x^2+z^2)} \left(\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} + \frac{m-y}{\sqrt{x^2+(m-y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{x2} = \frac{z}{2(x^2+z^2)} \left(\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} + \frac{m-y}{\sqrt{x^2+(m-y)^2+z^2}} \right);$$

- создаваемой током ближнего заземлителя:

$$H_{y3} = \frac{x}{2(x^2+(m-y)^2)} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{x^2+(m-y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{x3} = \frac{m-y}{2(x^2+(m-y)^2)} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{x^2+(m-y)^2+z^2}} \right);$$

- создаваемой током дальнего заземлителя:

$$H_{y4} = \frac{L-x}{2((L-x)^2+(m-y)^2)} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{(L-x)^2+(m-y)^2+z^2}} \right),$$

$$H_{x4} = \frac{m-y}{2((L-x)^2+(m-y)^2)} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{(L-x)^2+(m-y)^2+z^2}} \right),$$

- создаваемой током дальнего короткого отрезка проводника:

$$H_{z5} = \frac{L-x}{2((L-x)^2+z^2)} \left(\frac{y}{\sqrt{(L-x)^2+y^2+z^2}} + \frac{m-y}{\sqrt{(L-x)^2+(m-y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{x5} = \frac{z}{2((L-x)^2+z^2)} \left(\frac{y}{\sqrt{(L-x)^2+y^2+z^2}} + \frac{m-y}{\sqrt{(L-x)^2+(m-y)^2+z^2}} \right).$$

Параметры суммарного поля:

$$H_z = H_{z1} + H_{z2} + H_{z5};$$

$$H_y = H_{y1} - H_{y3} - H_{y5};$$

$$H_x = H_{x2} \pm H_{x3} \mp H_{x4} - H_{x5};$$

$$H_{\Sigma} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}.$$

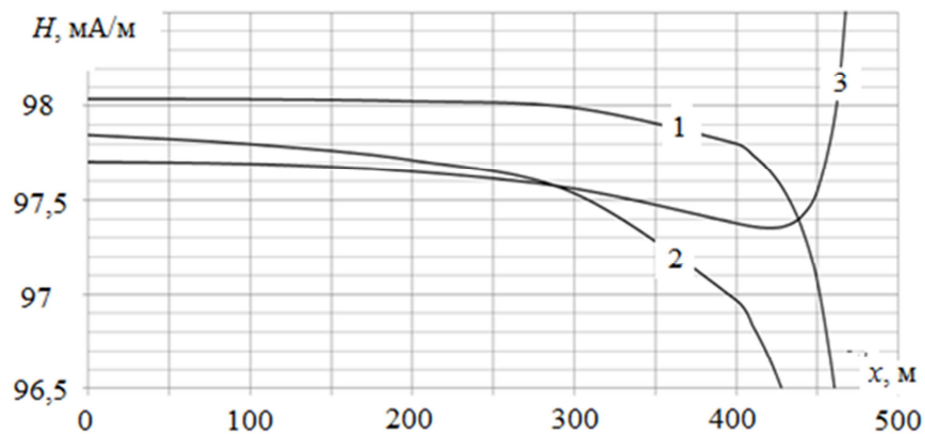


Рисунок 2.15. Зависимость напряженности от координаты x на высоте $z = 2$ м вдоль прямой $y = 10$ м без учета (кривая 1) и с учетом заземления при $m = 0$ (кривая 2) и $m = 10$ м (кривая 3).

Результаты вычислений напряженности вдоль прямой $y = 10$ м на высоте $z = 2$ м приведены на рисунке 2.15. Здесь кривая 1 - напряженность, создаваемая прямым током гонового проводника, кривая 2 – напряженность с учетом заземления при $m = 0$, а кривая 3 – напряженность при смещении заземлителей на $m = 10$ м.

Графики на рисунке 2.15 показывают, что заземление в торце проводника (кривая 2) искривляет РСЛ $y_0 = 10$ м, а в торце РСЛ (кривая 3) спрямляет на расстояниях более 40 м от заземлителя.

В таблице 2.6 приведены значения напряженности вдоль прямых $y = \text{const}$ на высоте $z = 2$ м при боковом смещении заземления относительно проводника на величину $m = 10$ м.

Табл. 2.6. Напряженность Г-образного проводника
в точках с координатами $(x; y; z = 2$ м)

у, м	Значение координаты x, м								
	0	200	300	400	450	470	480	485	490
10	97,71	97,653	97,56	97,378	97,55	98,87	102,1	106,58	118,1
7	136,9	136,77	136,62	136,27	136,2	137,3	140,6	145,79	160,3
5	185	184,87	184,66	184,08	183,6	184,2	187,2	192,24	207
3	276,3	276,09	275,73	274,71	273,3	272,9	274,6	278,54	291,1

Результаты анализа данных табл.2.6 приведены в табл.2.7. Данные таблицы показывают, например, что если расстояние между смежными проводами 20 м и их переключение происходит при $y = 10$ м, то максимальный «небаланс» стыковочных проходов $2 \times 3,4 = 6,8$ см на расстоянии $l - x = 100$ м до конца провода. При этом длина рабочего гона составит $2 \times 455 = 910$ м. Изменяя количество заземлителей и их положение относительно провода, а также распределение тока между заземлителями, можно корректировать форму РСЛ в требуемом направлении.

Таблица 2.7. Технические параметры РСЛ (см. табл.2.6)

Значение координаты y , м	10	7	5	3
Значение напряженности при $x = 0$	97,71	136,9	185	276,3
Минимальное значение напряженности	97,378	136,17	183,56	272,85
Разность значений напряженности	0,332	0,73	1,44	3,45
Изменение напряженности, %	0,34	0,53	0,78	1,25
Непрямолинейность РСЛ, см	3,4	3,71	3,9	3,75
Максимальное значение координаты x при указанной величине непрямолинейности РСЛ	455	460	470	482

2.8. Магнитное поле двух проводников с синфазными токами

В качестве источника навигационного магнитного поля можно использовать два параллельных проводника, подключенных к одному источнику тока и расположенных на расстоянии $2b$ друг от друга [19]. Как видно на рисунке 2.16, при этом вертикальная составляющая суммарного поля равна разности составляющих, а горизонтальная – сумме.

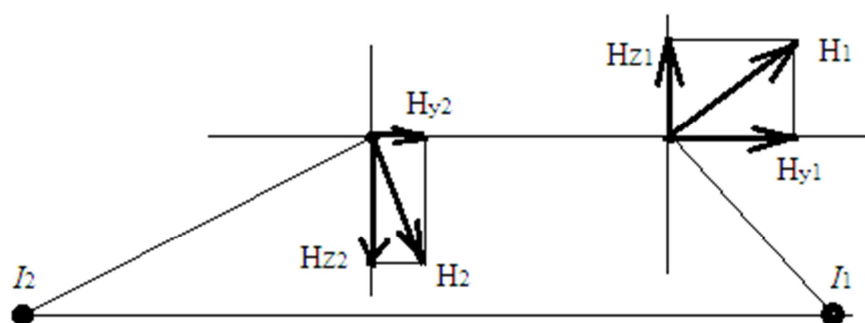


Рисунок 2.16. Составляющие суммарного поля синфазных токов

Пусть ось Ox параллельна проводникам и равноудалена от них, а начало системы координат равноудалено от концов проводов. Тогда модуль вектора напряженности суммарного магнитного поля двух проводов с равными синфазными токами опишется уравнением:

$$H = \sqrt{\left[\frac{b-y}{(b-y)^2+z^2} - \frac{b+y}{(b+y)^2+z^2} \right]^2 + \left[\frac{z}{(b-y)^2+z^2} + \frac{z}{(b+y)^2+z^2} \right]^2}.$$

Распределение напряженности между бесконечными проводниками на высоте $z = 2$ м при $2b = 20$ м показано на рисунке 2.17; при изменении координаты y в диапазоне $\pm b$ вертикальная проекция вектора напряженности трижды меняет свой знак.

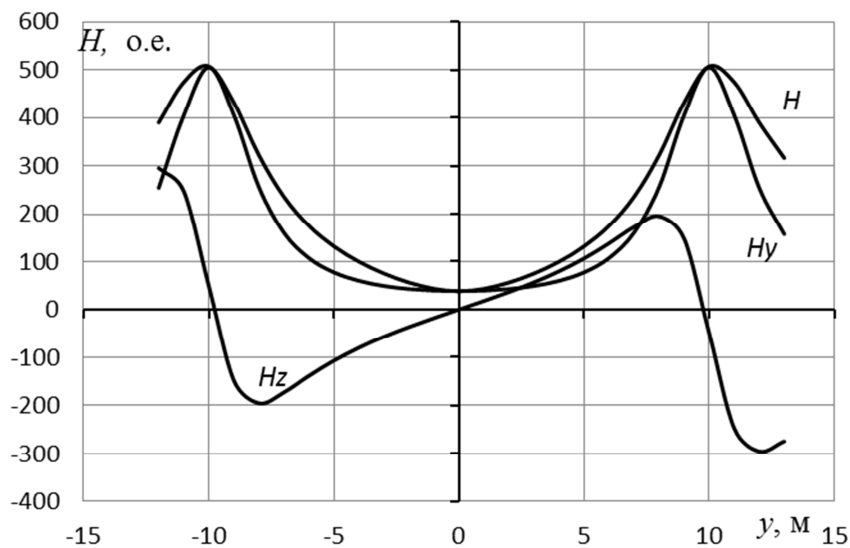


Рисунок 2.17. Напряженность суммарного поля бесконечных проводов с равными синфазными токами при $z = 2$ м, $2b = 20$ м

Распределение напряженности непосредственно над одним из проводов на высоте $z = 2$ приведено на рисунке 2.18, где кривая модуля вектора напряженности суммарного поля H смещена вниз на 500 о.е. Как видно, для бесконечно длинных проводов максимальное значение модуля вектора напряженности суммарного поля наблюдается в точке с координатой $y = 10,18$ м.

Напряженность достигает значения $H = 400$ о.е. в точках с координатами $y = 8,72$ м и $y = 11,88$ м; середина этого отрезка расположена в точке с координатой $y = 10,3$ м, т. е. смещена относительно провода на $0,3$ м. Это объясняется более медленным затуханием напряженности снаружи проводов, где суммируются горизонтальные и вертикальные проекции.

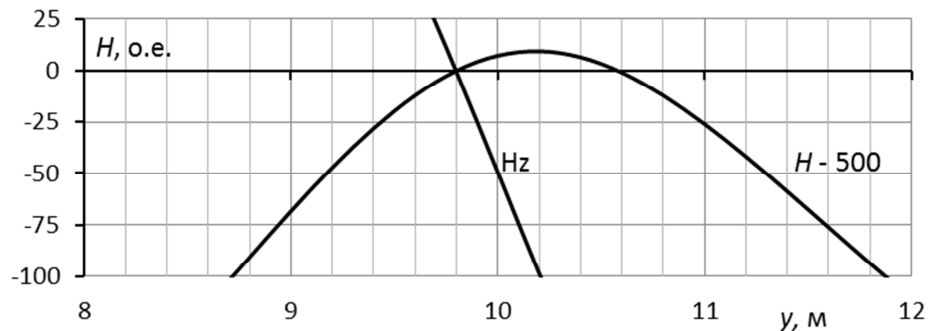


Рисунок 2.18. Изменение напряженности синфазных токов вблизи одного из проводов при $z = 2$ м, $2b = 20$ м;

Угол ψ между вектором напряженности суммарного поля и вертикалью:

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{H_y}{H_z} = \operatorname{arctg} \frac{H_{y1} + H_{y2}}{H_{z1} - H_{z2}}.$$

Проекция вектора напряженности на вертикальную ось меняет знак при $H_{z1} = H_{z2}$. Этому условию удовлетворяют точки с координатой y :

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

Для рассматриваемого примера $y = \sqrt{96} = 9,8$ м. При $z > b$ направление вектора напряженности изменяется монотонно, без перегибов между проводами – магнитное поле синфазных токов приближается к полю одиночного тока.

2.9. Суммарное поле 2-х противофазных токов

При питании проводов противофазными токами между проводами суммируются вертикальные проекции векторов каждого тока и вычитаются горизонтальные. Модуль вектора напряженности:

$$H = \sqrt{\left[\frac{b-y}{(b-y)^2+z^2} + \frac{b+y}{(b+y)^2+z^2} \right]^2 + \left[\frac{z}{(b-y)^2+z^2} - \frac{z}{(b+y)^2+z^2} \right]^2}.$$

Снаружи от проводов вычитаются как горизонтальные, так и вертикальные проекции векторов напряженности ближнего и удаленного проводов, поэтому по мере удаления от проводов H_z затухает более быстро, чем для одиночного провода. График изменения напряженности между бесконечно длинными проводами на высоте $z = 2$ м при $2b = 20$ м показан на рисунке 2.19.

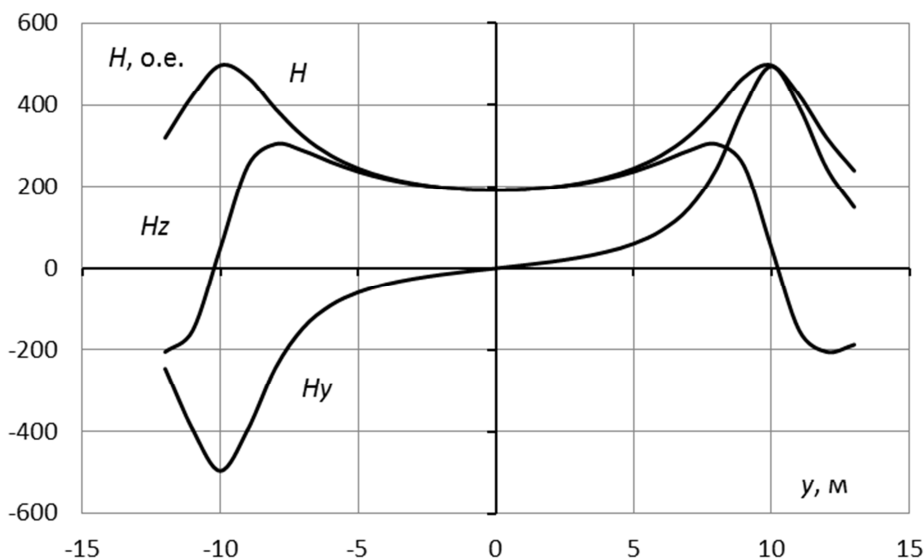


Рисунок 2.19. Напряженность магнитного поля противофазных токов при $2b = 20$ м, $z = 2$ м

Сравнение графиков на рисунках 2.17 и 2.19 показывает, что противофазные токи создают между проводами более равномерное магнитное поле, чем синфазные.

Распределение напряженности вблизи одного из проводов показано на рисунке 2.20. Напряженность 400 мА/м наблюдается в точках $y = 8,125$ м и $y = 11,225$ м; середина отрезка между этими точками ($y = 9,675$ м) не совпадает с точкой максимального значения модуля вектора напряженности суммарного поля ($y = 9,8$ м).

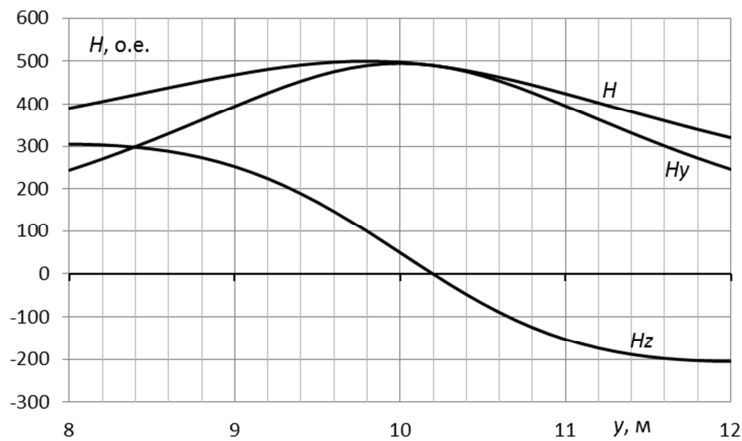


Рисунок 2.20. Поле противофазных токов над проводом при $z = 2$ м, $2b = 20$ м

Вектор напряженности суммарного поля образует с вертикалью угол ψ :

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{H_y}{H_z} = \operatorname{arctg} \frac{H_{y1} - H_{y2}}{H_{z1} + H_{z2}}.$$

Проекция вектора напряженности суммарного поля на вертикальную ось меняет знак в точке с равными проекциями векторов напряженности на

вертикальную ось OZ, но направленными встречно. Это имеет место при значении координаты y :

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

для рассматриваемого примера $y = \pm 10,2$ м.

2.10. Магнитное поле прямоугольной петли

Два проводника с равными противофазными токами можно превратить в изолированную от земли петлю, для чего достаточно убрать заземлители и перемкнуть концы проводов перемычками [21]. Поэтому магнитное поле петли отличается от поля линейных проводников с равными противофазными токами только краевыми эффектами.

Поле прямоугольной петли содержит 8 проекций на оси прямоугольной системы координат OXYZ:

$$H_{z1} = \left(\frac{b-y}{(b-y)^2+z^2} \right) \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(b-y)^2+z^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(b-y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{y1} = \left(\frac{z}{(b-y)^2+z^2} \right) \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(b-y)^2+z^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(b-y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{z2} = \left(\frac{l-x}{(l-x)^2+z^2} \right) \left(\frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2+(l-x)^2+z^2}} + \frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2+(l-x)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{x2} = \left(\frac{z}{(l-x)^2+z^2} \right) \left(\frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2+(l-x)^2+z^2}} + \frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2+(l-x)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{z3} = \left(\frac{b+y}{(b+y)^2+z^2} \right) \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(b+y)^2+z^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(b+y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{y3} = \left(\frac{z}{(b+y)^2+z^2} \right) \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(b+y)^2+z^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(b+y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{z4} = \left(\frac{l+x}{(l+x)^2+z^2} \right) \left(\frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2+(l+x)^2+z^2}} + \frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2+(l+x)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{x4} = \left(\frac{z}{(l+x)^2+z^2} \right) \left(\frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2+(l+x)^2+z^2}} + \frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2+(l+x)^2+z^2}} \right).$$

Модуль вектора напряженности магнитного поля внутри петли:

$$H = \sqrt{(H_{z1} + H_{z2} + H_{z3} + H_{z4})^2 + (H_{y1} - H_{y3})^2 + (H_{x2} - H_{x4})^2}.$$

Результаты вычисления напряженности для узкой петли 1000x10 м при $x = 0$ м, $z = 2$ м показаны на рисунке 2.21.

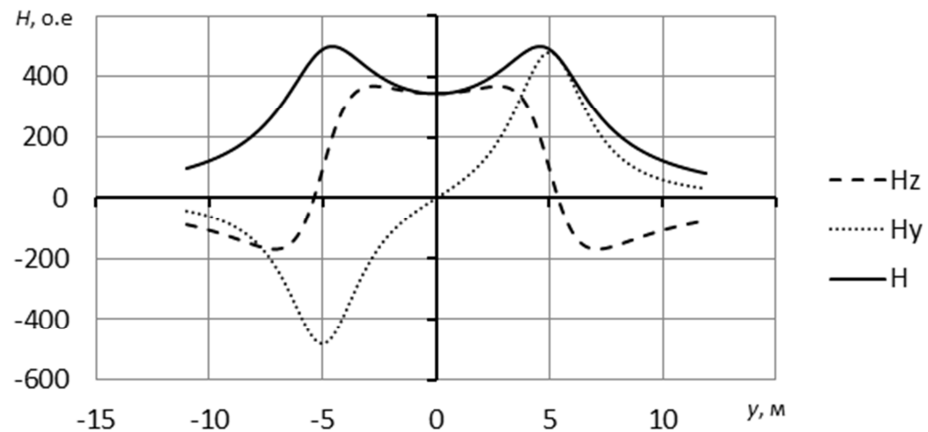


Рисунок 2.21. Зависимость напряженности от координаты y для петли 1000×10 м при $x = 0$ м, $z = 2$ м

На рисунке 2.22 приведены графики изменения модуля и горизонтальной проекции вектора напряженности непосредственно над длинной стороной петли при $2b = 10$ м, $z = 2$ м, $x = 0$ м.

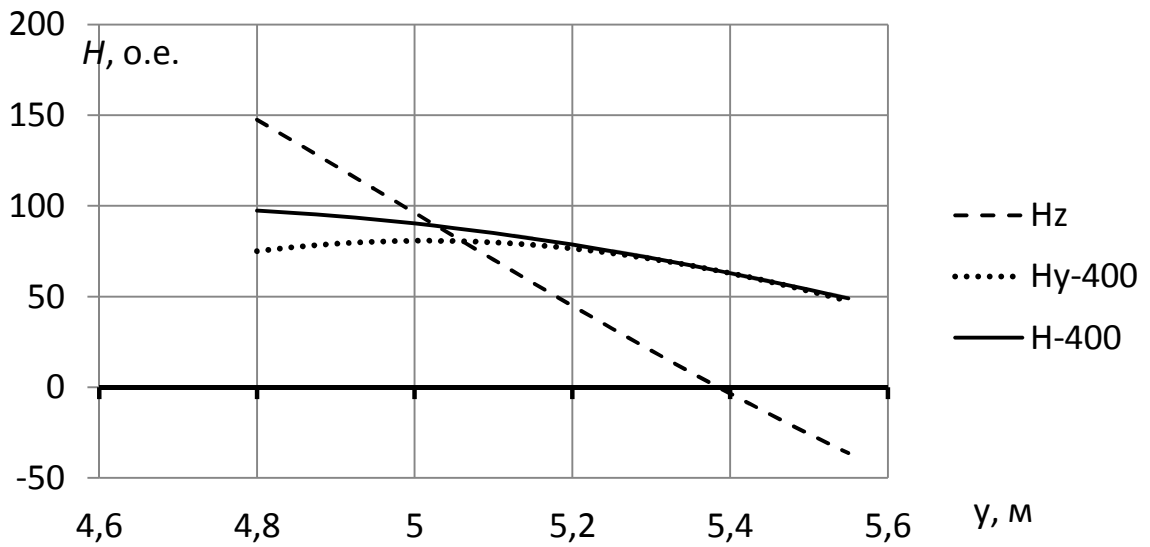


Рисунок 2.22. Изменение модуля и проекции вектора напряженности на ось OY над длинной стороной петли при $2b = 10$ м, $z = 2$ м

Изменение модуля и проекции вектора напряженности на вертикальную ось вблизи длинной стороны петли 1000×40 м при $x = 470$ м и $z = 2$ м приведено на рисунке 2.23.

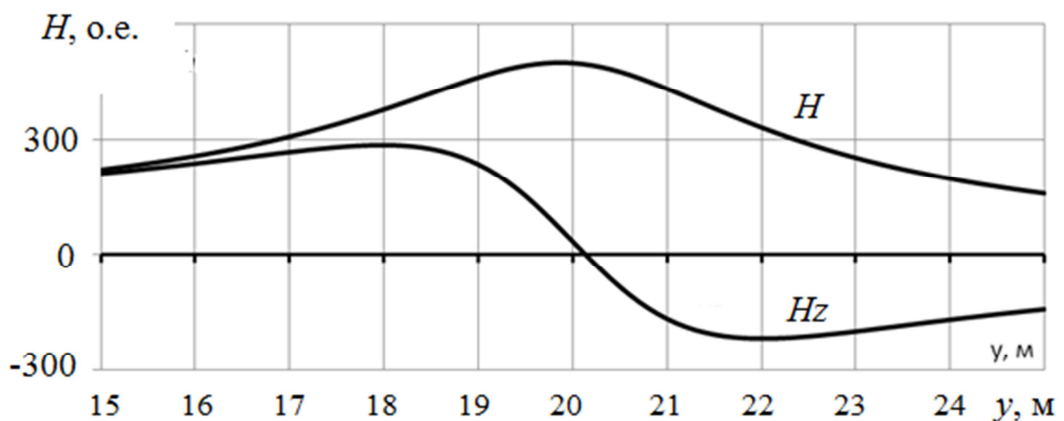


Рисунок 2.23. Изменение модуля и проекции вектора напряженности на вертикальную ось вблизи длинной стороны петли при $2b = 40$ м

2.11. Суммарное магнитное поле двух петель

Магнитное поле можно создавать при помощи двух петель одинаковых или разных размеров, разнесенных в пространстве, соприкасающихся либо перекрывающихся, рисунок 2.24.

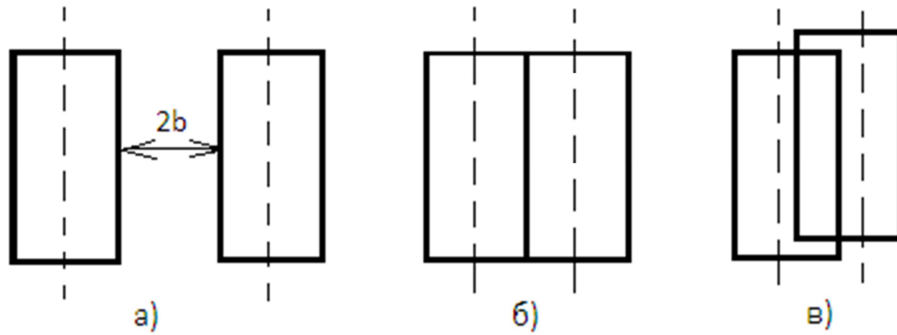


Рисунок 2.24. Возможное взаимное положение двух петель

Пусть ширина первой петли B_1 , второй B_2 , а расстояние между ближайшими сторонами петель $2b$. Тогда составляющие суммарного магнитного поля двух петель, или их восьми сторон, опишутся 16 уравнениями:

$$H_{z1} = \left(\frac{b-y}{(b-y)^2+z^2} \right) \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(b-y)^2+z^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(b-y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{y1} = \left(\frac{z}{(b-y)^2+z^2} \right) \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(b-y)^2+z^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(b-y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{z2} = \left(\frac{l-x}{(l-x)^2+z^2} \right) \left(-\frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2+(l-x)^2+z^2}} + \frac{B_1+b-y}{\sqrt{(B_1+b-y)^2+(l-x)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{x2} = \left(\frac{z}{(l-x)^2+z^2} \right) \left(-\frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2+(l-x)^2+z^2}} + \frac{B_1+b-y}{\sqrt{(B_1+b-y)^2+(l-x)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{z3} = \left(\frac{B_1+b-y}{(B_1+b-y)^2+z^2} \right) \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(B_1+b-y)^2+z^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(B_1+b-y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{y3} = \left(\frac{z}{(B_1+b-y)^2+z^2} \right) \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(B_1+b-y)^2+z^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(B_1+b-y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{z4} = \left(\frac{l+x}{(l+x)^2+z^2} \right) \left(-\frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2+(l+x)^2+z^2}} + \frac{B1+b+y}{\sqrt{(B1+b+y)^2+(l+x)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{x4} = \left(\frac{z}{(l+x)^2+z^2} \right) \left(-\frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2+(l+x)^2+z^2}} + \frac{B1+b-y}{\sqrt{(B1+b-y)^2+(l+x)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{z5} = \left(\frac{b+y}{(b+y)^2+z^2} \right) \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(b+y)^2+z^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(b+y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{y5} = \left(\frac{z}{(b+y)^2+z^2} \right) \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(b+y)^2+z^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(b+y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{z6} = \left(\frac{l-x}{(l-x)^2+z^2} \right) \left(\frac{B2+b+y}{\sqrt{(B2+b+y)^2+(l-x)^2+z^2}} - \frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2+(l-x)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{x6} = \left(\frac{z}{(l-x)^2+z^2} \right) \left(\frac{B2+b-y}{\sqrt{(B2+b-y)^2+(l-x)^2+z^2}} - \frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2+(l-x)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{z7} = \left(\frac{B2+b+y}{(B2+b+y)^2+z^2} \right) \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(B2+b+y)^2+z^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(B2+b+y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{y7} = \left(\frac{z}{(B2+b+y)^2+z^2} \right) \left(\frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(B2+b+y)^2+z^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(B2+b+y)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{z8} = \left(\frac{l+x}{(l+x)^2+z^2} \right) \left(\frac{B2+b+y}{\sqrt{(B2+b+y)^2+(l+x)^2+z^2}} - \frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2+(l+x)^2+z^2}} \right);$$

$$H_{x8} = \left(\frac{z}{(l+x)^2+z^2} \right) \left(\frac{B2+b-y}{\sqrt{(B2+b-y)^2+(l+x)^2+z^2}} + \frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2+(l+x)^2+z^2}} \right).$$

Проекции вектора суммарного поля на оси системы координат и модуль вектора напряженности:

$$H_{\Sigma i} = \Sigma H_i; \quad H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}.$$

Результаты вычислений модуля и проекций вектора суммарного поля двух петель при $2l = 1000$ м, $2b = B1 = 40$ м, $B2 = 60$ м, $x = 0$, $z = 2$ м вдоль оси ОУ при питании петель равными противофазными токами 2π (А) приведены

на рисунке 2.25, а на рисунке 2.26 – графики при питании петель противофазными токами и $2b = 0$.

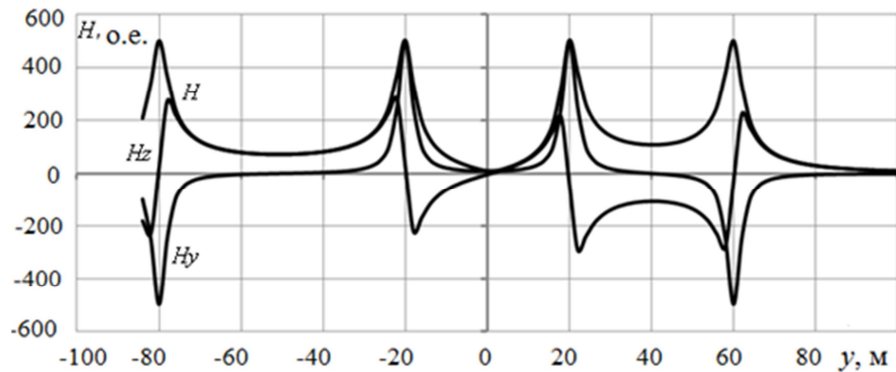


Рисунок 2.25. Графики модуля H и проекций H_z и H_y суммарного магнитного поля двух петель при $2l = 1000$ м, $2b = B1 = 40$ м, $B2 = 60$ м, $x = 0$, $z = 2$ м вдоль оси OY и питания петель синфазными токами

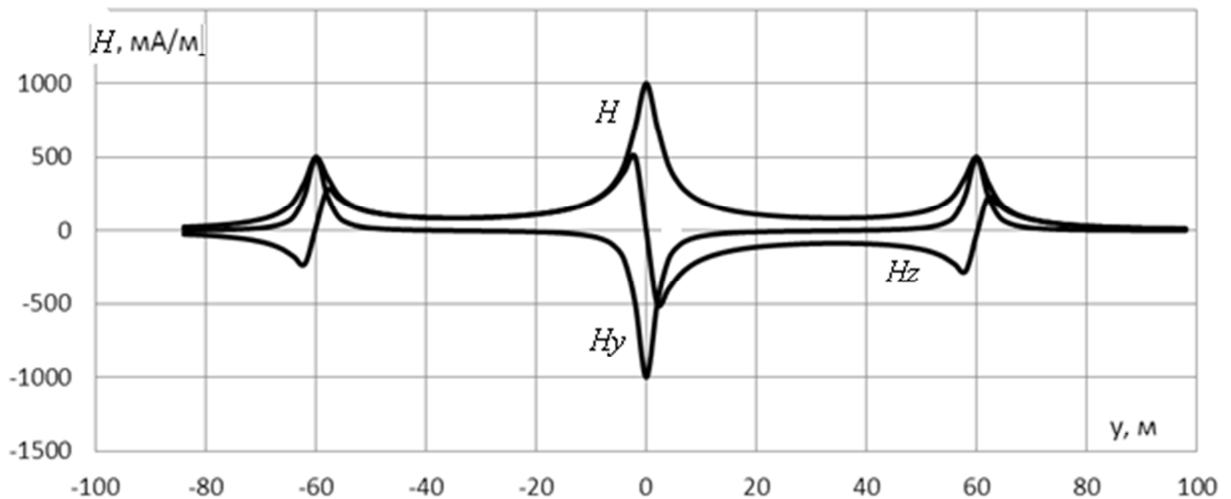


Рисунок 2.26. Графики модуля H и проекций H_z и H_y магнитного поля двух петель при: $2l = 1000$ м; $2b = 0$; $B1 = B2 = 60$ м; $x = 0$; $z = 2$ м вдоль оси OY , при питании петель противофазными токами

Практический интерес представляет суммарное магнитное поле двух противофазных петель с совмещенными близлежащими сторонами (см. рис.

2.24 б) – трехсторонней петли. Особенность такой петли в том, что токи переемычек направлены встречно, поэтому при равенстве токов переемычек напряженность над средней стороной не содержит составляющих обратных токов.

На расстоянии y от средней стороны дополнительную напряженность создает участок переемычки длиной $2y$, по которому протекает половинный ток средней стороны. Изменяя отношение токов обеих переемычек, можно корректировать форму РСЛ суммарного поля в нужном направлении.

Табл. 2.8. Зависимость отклонения напряженности вдоль прямой $y = 10$ м (в тысячных долях процента) от отношения токов I_1/I_2 петель

$x, \text{ м}$	0	200	350	400	450	460	470	475	478	480	481	482
I_1/I_2	Петля размером 20x1000 м											
0,65	0	7	53	126	446	616	839	924	915	849	785	693
0,7	0	6	46	110	381	518	678	707	650	542	454	335
0,75	0	5	40	95	322	429	531	508	407	261	151	7
0,8	0	4	34	81	267	347	395	325	183	3	-127	-294
0,85	0	4	29	68	217	271	270	157	-22	-234	-383	-571
	Петля размером 200x1000 м											
0,65	0	65	374	711	1521	1772	1954	1896	1723	1497	1334	1127
0,7	0	57	327	615	1263	1431	1474	1305	1041	739	533	277
0,75	0	50	283	525	1020	1108	1019	745	394	22	-226	-527
0,8	0	43	241	439	788	802	588	213	-218	-659	-946	-1290
0,85	0	37	201	357	569	512	179	-291	-800	-1305	-1629	-2015

В качестве примера в таблице 2.8 приведена зависимость отклонения напряженности магнитного поля в тысячных долях процента вдоль прямой $y = 10$ м для соприкасающихся петель длиной 1000 м, шириной 20 м и 200 м, при $z = 2$ м и отношении токов петель I_1/I_2 . Данные таблицы показывают,

что при прочих равных условиях узкие петли обеспечивают более высокую равномерность магнитного поля вдоль длинных сторон. Если принять ширину поворотной полосы 20 м, т.е. ограничить рабочую область координатой $x = 480$ м, то максимальная непрямолинейность для узких петель составит $\pm 0,2\%$ при отношении токов $I_1/I_2 = 0,8$, а для широких $\pm 0,55\%$ при $I_1/I_2 = 0,75$.

В таблице 2.9 приведены отклонения РСЛ от прямой линии $y_0 = 10$ м при отношении токов 1:2 петель шириной 40 м и 60 м, длиной 1000 м, на высоте $z = 2$ м. Как видно, погрешность не превышает 1% на расстояниях до конца петли, превышающих двукратное значение боковой координаты y .

Табл. 2.9. Отклонения от прямой РСЛ $y_0 = 10$ м на высоте $z = 2$ м при ширине петель 40 и 60 м, длине 1000 м и отношении токов 1:2

x , м	0	200	400	420	430	440	450	460	465	470	475	480	485
Δy , см	0	0,2	1,9	2,8	3,5	4,4	5,5	7	7,7	8,1	7,8	4,5	-9

2.12. Навигационные поля сложных источников

Для практического применения более удобны навигационные магнитные поля, одновременно охватывающие весь обрабатываемый участок земли, площадь которого может достигать 100 га и более. Преимуществом такого поля будет возможность одновременной работы нескольких МТА без переключения токоведущих проводов, что не только ускорит выполнение полевых работ, но и упростит технические средства автоматизации МТА.

2.12.1. Параллельное включение гоновых проводов

В простейшем случае все гоновые провода можно включить параллельно, рисунок 2.27.

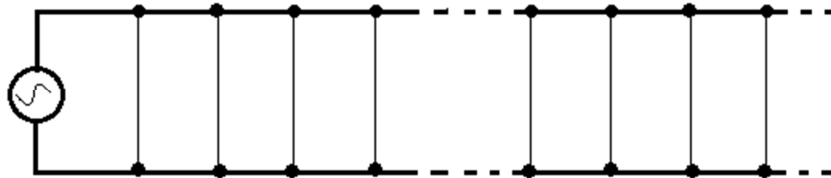


Рисунок 2.27. Параллельное включение гоновых проводов

При параллельном включении гоновых проводов на поворотных полосах протекают суммарные токи впередилежащих гоновых проводов, которые постепенно уменьшаются от суммарного значения токов всех гоновых проводов до тока одного провода. Кроме того, вследствие падения напряжения на магистральных проводах поворотных полос, токи гоновых проводов могут в начале и конце участка быть различными.

При одновременном питании синфазными токами всех параллельных гоновых проводов суммарное магнитное поле над проводами неравномерное как по длине гона, так и по удаленности от источника тока. Определить модуль и направление вектора напряженности в произвольной точке пространства можно, пользуясь методикой, изложенной в разделе 2.6. При этом удобно начало измерительной системы координат совместить с точкой наблюдения поля, направив ось Ox параллельно гоновым проводам. Тогда, например, проекция вектора напряженности суммарного поля, создаваемого токами гоновых проводов, на вертикаль ось, опишется уравнением:

$$H_{z \text{ г.п.}} = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{4\pi} \frac{y_i}{y_i^2 + z^2} \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y_i^2 + z^2}} + \frac{L - x}{\sqrt{(L - x)^2 + y_i^2 + z^2}} \right),$$

где I_i – ток i -того гонового провода,

y_i – расстояние по горизонтали до i -того гонового провода,

n – количество гоновых проводов,

L – длина гонового провода,

x и $L - x$ – расстояние от точки наблюдения поля до конца гонового провода.

Аналогично определяется проекция суммарного вектора на поперечную ось ОУ:

$$H_{y \text{ г.п.}} = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{4\pi} \frac{z_i}{y_i^2 + z^2} \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y_i^2 + z^2}} + \frac{L - x}{\sqrt{(L - x)^2 + y_i^2 + z^2}} \right),$$

а также составляющие H_{zi} и H_{xi} , создаваемые токами перемычек между гоновыми проводами.

2.12.2. Последовательное включение гоновых проводов зигзагом

При последовательном соединении проводов зигзагом, рисунок 2.28 а), с учетом встречного тока в магистральном проводе и в верхних перемычках, источник магнитного поля распадается на ряд синфазных петлевых источников, разнесенных на расстояние, равное шагу закладки проводов, рисунок 2.28 б).

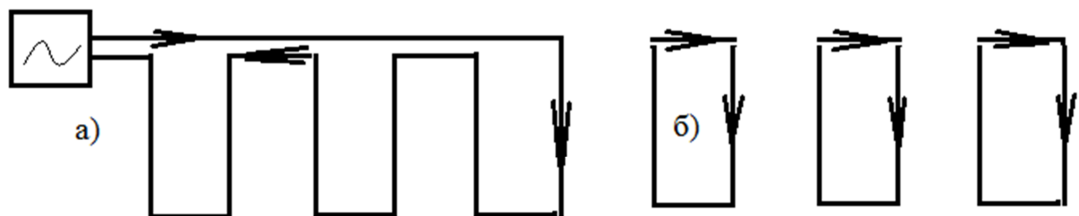


Рисунок 2.28. Электрическая схема а) и схема замещения б) источника магнитного поля при последовательном соединении гоновых проводов «зигзагом»

При соединении гоновых проводов зигзагом магнитное поле аналогичное рассмотренному в разделе 2.21, рисунок 2.24 а). Отличие в том, что суммарное поле зависит не от двух, а от $n/2$ петель, где n – количество гоновых проводов.

2.12.3. Последовательно-петлеобразное включение гоновых проводов

Возможно последовательное включение гоновых проводов не зигзагом, а «петлеобразно», рисунок 2.29, при котором суммарное магнитное поле еще более неравномерное вследствие более сильного влияния магнитных полей, создаваемых суммарными токами перемычек на поворотных полосах.

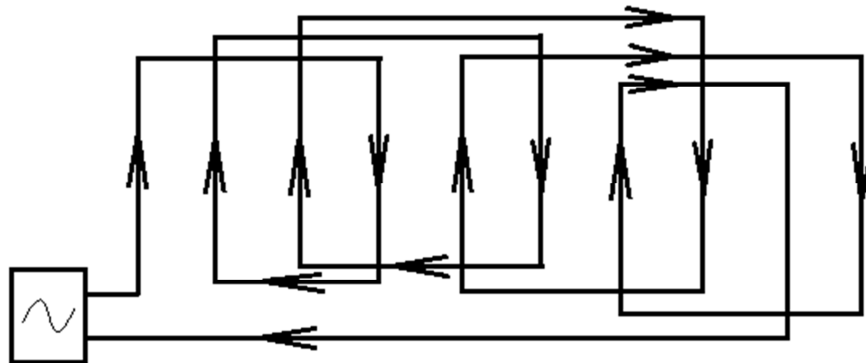


Рисунок 2.29. Последовательно-петлеобразное соединение гоновых проводов

2.12.4. Источник магнитного поля «двойной зигзаг»

Для повышения равномерности магнитного поля по длине гона следует выбрать такую схему источника магнитного поля, чтобы происходила компенсация полей, создаваемых токами отдельных перемычек между гоновыми проводами; аналогом может служить источник в виде «двойной петли», рисунок 2.24 б).

Общее правило компенсации нежелательных составляющих магнитного поля – создать такие же составляющие током противоположной направленности, например - с противоположной стороны относительно точки наблюдения поля. Применительно к источнику на рисунке 2.28, для этого достаточно верхний магистральный провод заменить второй системой гоновых проводов, и совмещенной с первой таким образом, чтоб токи гоновых проводов совпадали по направлению, а токи перемычек протекали в противоположных направлениях, рисунок 2.30. При этом по мере перемещения точки наблюдения поля от края участка к его середине влияние токов перемычек на магнитные поля гоновых проводов постепенно снижается вследствие взаимной компенсации токов смежных перемычек.

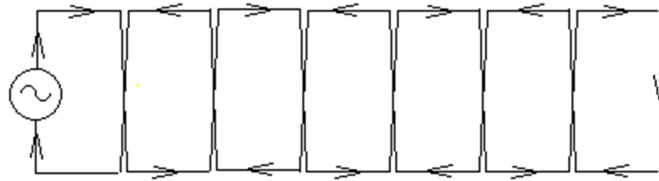


Рисунок 2.30. Индуктор «двойной зигзаг»

В глубине длинного участка, вдали от поворотных полос, над заданным гоновым проводом вертикальные составляющие магнитных полей, создаваемых однонаправленными и равноудаленными токами слева и справа, вычитаются и взаимно компенсируются. Так, например, над проводом №5, рисунок 2.31, происходит полная взаимная компенсация проекций на вертикальную ось векторов напряженности, создаваемых токами проводов 4 и 6, 3 и 7, 2 и 8 и т.д. Проекция этих же векторов на ось ОУ однонаправленные, но встречные с проекциями векторов, создаваемых токами смежных проводов. Так, проекция векторов, создаваемых токами проводов 3+7 встречные с создаваемыми токами проводов 3+7 и 4+6, и т.д.

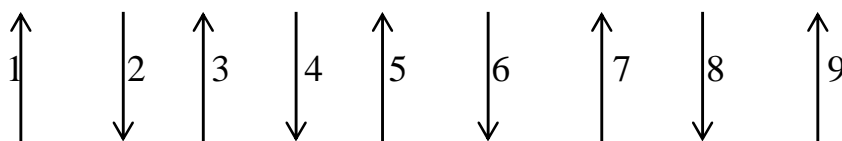


Рисунок 2.31. Взаимное влияние магнитных полей, создаваемых токами гоновых проводов 1...9

Результаты вычислений напряженности магнитного поля для гонового провода двойного зигзага при расстоянии между проводами $B = 10$ м, на высоте $z = 2$ м, без учета конечной длины участка, на расстоянии $y = Bn = 100$ м от боковой границы, приведены в таблице 2. 10.

Таблица 2.10. Результаты вычислений напряженности магнитного поля для гонового провода двойного зигзага $n = 0$, при расстоянии между проводами $B = 10$ м, на высоте $z = 2$ м, без учета конечной длины гоновых проводов

n	H_y	H_z	H	$H_{y\Sigma}$	$H_{z\Sigma}$	$H_{y\Sigma}(0,1)$	$H_{z\Sigma}(0,1)$
-10	0,19992	-9,996	9,998	0,2	-9,996	0,20032	-9,98602
-9	-0,2468	11,106	11,108	-0,047	1,11	-0,04702	1,10729
-6	0,55494	-16,648	16,657	0,413	-13,76	0,41386	-13,7361
-5	-0,7987	19,968	19,984	-0,386	6,211	-0,38806	6,192199
-2	4,9505	-49,505	49,752	3,599	-35,05	3,637792	-34,8705
-1	-19,231	96,154	98,058	-15,63	61,11	-15,9681	60,40351
0	500	0	500	484,4	61,11	482,785	35,46586
1	-19,231	-96,154	98,058	465,1	-35,05	463,9188	-61,5835
2	4,9505	49,505	49,752	470,1	14,46	468,8207	-11,8347
5	-0,7987	-19,968	19,984	468,3	-13,76	467,0681	-40,1386
6	0,55494	16,648	16,657	468,9	2,891	467,6211	-23,4627
9	-0,2468	-11,106	11,108	468,5	-9,996	467,2798	-36,3673
10	0,19992	9,996	9,998	468,7	0	467,4793	-26,3613
15	-0,0889	-6,6655	6,6661	468,6	-7,971	467,348	-34,3394
20	0,05	4,9995	4,9998	468,7	-2,312	467,4131	-28,6768
30	0,02222	3,3332	3,3333	468,7	-3,111	467,4001	-29,476
40	0,0125	2,4999	2,5	468,7	-3,515	467,3955	-29,8807
45	-0,0099	-2,2222	2,2222	468,6	-5,848	467,3846	-32,2144

В таблице 2.10 обозначено:

- n - номер гонового провода, считая от рабочего №10;
- H_y – проекция вектора напряженности, создаваемого током данного провода в наблюдаемой точке с координатой $z = 2$ м над рабочим проводом № 10;
- H_z – то же, для проекции на вертикальную ось;
- H – модуль вектора напряженности, создаваемого в точке наблюдения током данного гонового проводника;
- $H_{y\Sigma}$ – сумма проекций векторов напряженности на ось OY в точке наблюдения нарастающим итогом;
- $H_{z\Sigma}$ – то же, для проекций на вертикальную ось;
- $H_{y\Sigma}(0,1)$ и $H_{z\Sigma}(0,1)$ – то же для точек, смещенных относительно плоскости OXZ в направлении оси OY на расстояние $y = 0,1$ м.

Данные таблицы позволяют сделать вывод о том, что влияние проекций векторов напряженности на ось OY затухает много быстрее, чем на OZ . Так, значение $H_{y\Sigma}$ стабилизируется с 5-го гонового провода от рабочего, в то время как полная компенсация $H_{z\Sigma}$ наблюдается только при равенстве гоновых проводов слева и справа от рабочего. Так, токи $40 - 10 = 30$ нескомпенсированных гоновых проводов, удаленных от рабочего на расстояния 100... 400 м, создают в точке над рабочим проводником напряженность $H = 3,5$ отн. ед, сдвигающую H_z на 0,01 м.

2.12.5. Навигационный индуктор «зигзаг в петле»

Анализ фигуры на рисунке 2.28 б) показывает, что влияние токов перемычек можно компенсировать, охватив токопроводящий контур вспомогательным контуром в виде петли, как показано на рисунках 2.32 и 2.33.

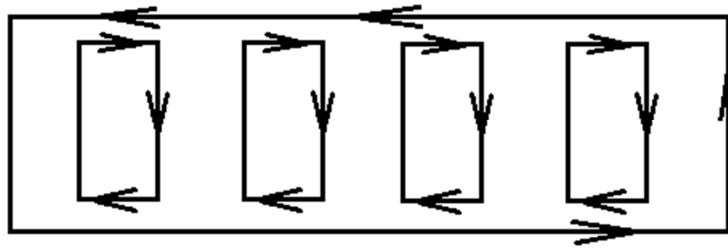


Рисунок 2.32. Навигационный индуктор «зигзаг в петле»

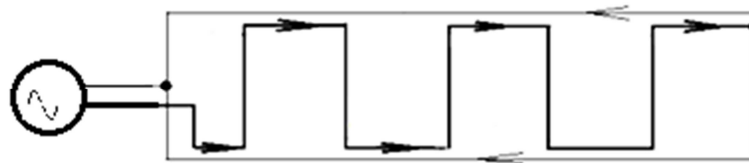


Рисунок 2.33. Последовательное включение токопроводящего контура и вспомогательной петли

2.13. Поле петли непрямоугольной формы

Если петля имеет непрямоугольную форму, то углы в вершинах отличаются от прямых. Методика определения напряженности такой петли остается прежней – необходимо вычислить проекции векторов, создаваемых токами каждой стороны, на оси прямоугольной системы координат $OXYZ$, суммировать одноименные проекции с учетом знаков, и вычислить модуль вектора напряженности суммарного магнитного поля и углы его наклона к плоскостям системы координат. Отличие заключается лишь в измерении расстояний до поперечных сторон не вдоль гона, а по нормали к поперечным сторонам петли, рисунок 2.34, а также в том, что поперечные стороны могут создавать ненулевые проекции вектора напряженности на три оси системы координат.

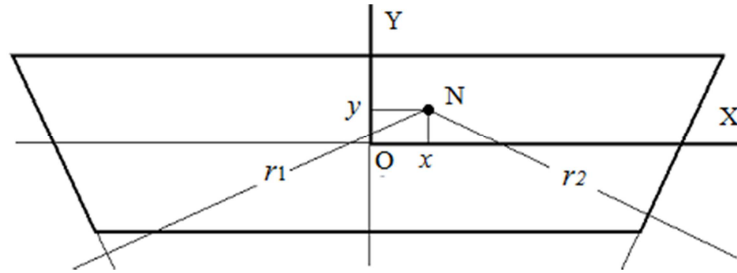


Рисунок 2.34. Определение расстояний до сторон четырехугольной петли с произвольными углами при вершинах

2.14. Влияние электропроводимости земли на переменные магнитные поля

Выше не принимались во внимание токи индукции, протекающие в земле под действием электродвижущей силы индукции, т.е. предполагалось, что земля является диэлектриком. В действительности на низкой частоте земля проявляет свойства проводников. Под действием первичного переменного магнитного поля в ней возникает электродвижущая сила ЭДС и протекают токи индукции, которые создают вторичные магнитные поля. Суммарное поле, называемое «нормальным», отличается от первичного, поэтому при расчетах фактической напряженности магнитного поля необходимо учитывать электрическую проводимость земли и влияние токов индукции.

Ниже приводятся краткие сведения из электроразведочной геофизики, в которой вопросы влияния земли на переменные магнитные поля исследованы в связи с применением явления магнитной индукции для поиска полезных ископаемых в земных недрах.

2.14.1. Электрические свойства земли

Земля характеризуется такими электрическими параметрами, как удельное сопротивление ρ , диэлектрическая ε и магнитная μ проницаемость, поляризуемость. Относительная магнитная проницаемость земли принимается постоянной, равной единице, а диэлектрическая постоянная и поляризуемость оказывают незначительное влияние на низкочастотное магнитное поле. Наибольшее влияние на магнитное поле оказывает электрическое сопротивление ρ (Ом·м), причем интенсивность его воздействия тем больше, чем выше частота f магнитного поля.

Фактическая напряженность магнитного поля в точке наблюдения зависит от двух параметров: фазовой постоянной a и коэффициента затухания b . На низкой частоте их численные значения одинаковые и определяются уравнением [17]:

$$a = b = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\rho}} = \sqrt{\frac{2\pi f \cdot 4\pi 10^{-7}}{2\rho}} = 1,99 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{f}{\rho}},$$

где $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) – абсолютная магнитная проницаемость земли.

Электрические свойства земли для данной частоты магнитного поля характеризуются комплексным «волновым числом» $k = a + ib$. Модуль волнового числа:

$$|k| = \sqrt{a^2 + b^2} = a\sqrt{2} = 2,81 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{f}{\rho}}.$$

Действительная часть a волнового числа – фазовая постоянная – определяет изменение фазы электромагнитной волны на расстоянии 2π метров. Мнимая часть b – коэффициент затухания – определяет затухание напряженности в неперах на расстоянии 1 м.

Пусть кажущееся удельное сопротивление земли $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, частота магнитного поля 100 Гц. Тогда $a = b = 0,002$, поэтому для точек, расположенных в глубине земли, справедливо:

- длина волны магнитного поля на частоте 100 Гц: $\lambda = 2\pi/a = 3,16 \text{ км}$;
- скорость распространения фазового фронта: $V = \lambda f = 316 \text{ км/с}$;
- толщина скин-слоя, обеспечивающая дополнительное затухание напряженности в 2,72 раза: $\Delta = 1/b = 500 \text{ м}$.

Вышеизложенное справедливо для точек в глубине земли; определение фактических параметров магнитного поля на высоте 1 м над поверхностью земли при расположении проводника с током на глубине 1 м под землей требует дополнительных исследований.

2.14.2. Магнитное поле токов индукции в земле

Магнитный поток Φ_1 первичного магнитного поля совпадает по фазе с током I_1 , поэтому считается «активным» или «действующим». ЭДС индукции E отстает от магнитного потока по фазе на 90° , поэтому является «реактивной», или «мнимой».

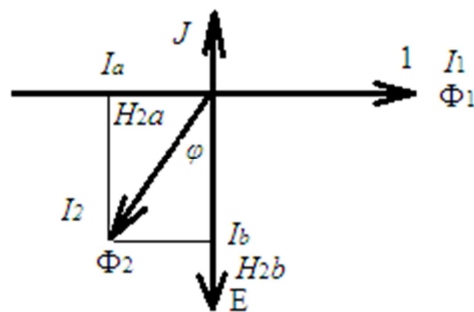


Рисунок 2.35. Векторная диаграмма первичного и вторичного магнитных полей на фазовой плоскости ($J, 1$)

Токовые цепи в земле, по которым протекают токи индукции, обладают активным и индуктивным сопротивлением, поэтому токи индукции I_2 и создаваемые ими вторичные магнитные потоки Φ_2 отстают от ЭДС на угол φ , величина которого может изменяться от нуля до 90° , рисунок 2.35.

Вторичное магнитное поле совпадает по фазе с током индукции I_2 и может быть представлено в виде двух компонент – «действительной» или «активной» I_a , и «мнимой» или «реактивной» I_b . При этом, как следует из рисунка 2.28, реактивная компонента вторичного магнитного поля H_{2b} обусловлена активным сопротивлением токовой цепи, а активная H_{2a} – реактивным (индуктивным) сопротивлением. Поэтому принятая терминология является условной и не отражает физическую сущность явлений, так как в качестве исходной принята фаза не ЭДС индукции, а первичного тока, опережающего ЭДС на 90° .

Вблизи поверхности земли ток индукции протекает в виде «пласта», параллельного земной поверхности и проводу. Направление тока индукции противоположно току в проводе при увеличении его мгновенного значения, и однонаправленно – при уменьшении.

В первом приближении можно считать, что векторы напряженности вторичного магнитного поля направлены перпендикулярно к проводу, параллельно земной поверхности. В действительности вследствие влияния тока в глуболежащих слоях земли они образуют с вертикалью угол, отличающийся от 90° .

2.14.3. Магнитные числа нормального магнитного поля

Векторы напряженности первичного поля, создаваемого током наземного проводника, перпендикулярны к поверхности земли; векторы напряженности вторичного поля не совпадают с ними ни в пространстве, ни по фазе. Поэтому суммарное, или «нормальное», магнитное поле эллиптически поляризованное – конец вектора напряженности описывает в пространстве

эллипс, эксцентриситет которого определяется токами индукции, т.е. проводимостью земли. Параметры эллипса поляризации в геофизике оценивают «магнитными числами», представляющими отношение соответствующей компоненты эллипса поляризации к модулю вектора напряженности в вакууме при прочих равных условиях. Значения магнитных чисел бесконечного наземного провода для приведенных расстояний $0 \leq p \leq 10$ приведены в таблице 2.10 [22].

Табл. 2.10. Магнитные числа нормального магнитного поля, создаваемого током бесконечного проводника

p	a_z	b_z	H_z	a_y	b_y	H_y
0	1	0	1	0	0	0
0,01	1	-0,0001	1	-0,0047	-0,0047	-0,0066
0,02	0,9999	-0,0005	0,9999	-0,0094	-0,0093	-0,0132
0,03	0,9998	-0,001	0,9998	-0,0141	-0,0138	-0,0197
0,04	0,9997	-0,0016	0,9997	-0,0188	-0,0182	-0,0262
0,05	0,9995	-0,0024	0,9995	-0,0236	-0,0226	-0,0326
0,06	0,9993	-0,0033	0,9993	-0,0283	-0,0269	-0,039
0,07	0,999	-0,0043	0,999	-0,033	-0,0311	-0,0453
0,08	0,9987	-0,0054	0,9988	-0,0377	-0,0352	-0,0516
0,1	0,998	-0,0079	0,9981	-0,047	-0,0433	-0,0639
0,15	0,9956	-0,0156	0,9957	-0,0704	-0,0622	-0,0939
0,2	0,9923	-0,0248	0,9926	-0,0936	-0,0793	-0,1227
0,3	0,9828	-0,0467	0,9839	-0,1391	-0,1086	-0,1765
0,5	0,9538	-0,0984	0,9589	-0,2258	-0,1492	-0,2706
1	0,8361	-0,2316	0,8676	-0,4054	-0,1694	-0,4394
1,1	0,8071	-0,255	0,8464	-0,4339	-0,1633	-0,4636
1,2	0,777	-0,2766	0,8248	-0,4598	-0,1546	-0,4851
1,3	0,746	-0,2965	0,8028	-0,483	-0,144	-0,504
1,4	0,7144	-0,3145	0,7806	-0,5037	-0,1315	-0,5206
1,6	0,6502	-0,3446	0,7359	-0,5375	-0,1026	-0,5472
1,8	0,5859	-0,367	0,6914	-0,5619	-0,0701	-0,5662
2	0,5229	-0,382	0,6476	-0,5775	-0,0358	-0,5786
5	0,0224	-0,1961	0,1974	-0,3552	0,2334	0,4250
10	-0,0002	-0,03924	0,03924	-0,1451	0,1376	0,2000

В столбцах таблицы обозначено:

- $p = kr$ – численное расстояние точки наблюдения поля;
- a_z и b_z – значения активной и реактивной компонент проекции вектора напряженности магнитного поля на ось OZ;
- a_y и b_y – то же, на горизонтальную ось OY;
- H_z, H_y – магнитные числа проекций вектора напряженности на вертикальную и горизонтальную оси.

Пусть, например, $f/\rho = 12$. Тогда расстоянию $r = 10$ м соответствует $p \approx 0,1$. Если принять модуль напряженности первичного поля за 100 %, магнитные числа для данной точки пространства составят значения, приведенные в таблице 2.11 (нижняя строка); как видно, активная компонента вертикальной проекции вектора напряженности равна 99,8 %, а горизонтальная 4,7%.

Табл. 2.11. Влияние земли на магнитное поле бесконечного проводника (в процентах к первичному полю) при $p = 0,1$

p	a_z	b_z	H_z	a_y	b_y	H_y	H_a	H_b
0	100	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	0,0
0,1	99,8	-0,79	99,81	-4,7	-4,33	-6,39	99,91061	-4,401

В первом приближении можно принять большую ось эллипса поляризации равной величине вектора напряженности активной компоненты, т.е. $\sqrt{a_z^2 + a_y^2} = 99,91$; угол ψ между большой осью эллипса поляризации и вертикалью $\psi = \arctg(4,7/99,8) = 2,7^\circ$. Такое мгновенное значение вектор напряженности суммарного поля принимает при $\omega t = 90,34^\circ$, таблица 2.12.

Табл. 2.12. Мгновенные значения составляющих
напряженности нормального магнитного поля при $p = 0,1$

ωt	a_z	b_z	H_z	a_y	b_y	H_y	H
0	0	-0,79	-0,79	0	-4,33	-4,33	4,401477
0,34	0,592222	-0,78999	-0,19776	-0,02789	-4,32992	-4,35781	4,362299
15	25,83014	-0,76308	25,06706	-1,21645	-4,18246	-5,39891	25,64187
45	70,56926	-0,55861	70,01064	-3,3234	-3,06177	-6,38517	70,30121
75	96,3994	-0,20447	96,19493	-4,53985	-1,12069	-5,66054	96,36133
90	99,8	0	99,8	-4,7	0	-4,7	99,91061
90,34	99,79824	0,004688	99,80293	-4,69992	0,025695	-4,67422	99,91233
120	86,42934	0,395	86,82434	-4,07032	2,165	-1,90532	86,84524
150	49,9	0,68416	50,58416	-2,35	3,74989	1,39989	50,60353
165	25,83014	0,763081	26,59322	-1,21645	4,182459	2,966009	26,75811
180	0	0,79	0,79	0	4,33	4,33	4,401477

Изменение вектора напряженности в пространстве и по модулю в течение одного периода в точке с $p = 0,1$ приведено на рисунке 2.36 а) и б).

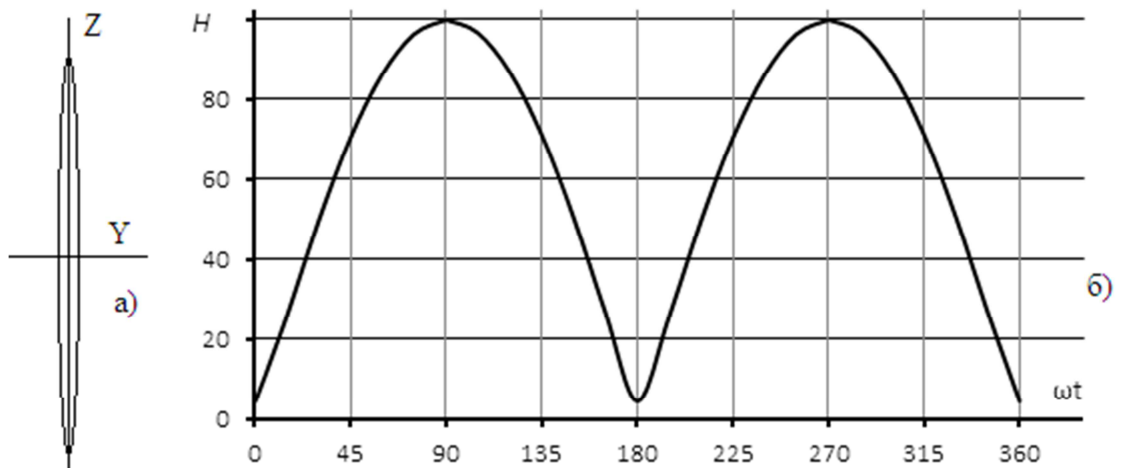


Рисунок 2.36. Изменение модуля вектора напряженности в пространстве и во времени в точке с численным расстоянием $p = 0,1$

Выводы по главе 2

1. Равносигнальные поверхности модуля вектора напряженности переменного магнитного поля полубесконечного проводника с током вдали от его конца образуют концентрические цилиндры радиусом r_0 , который уменьшается на 0,1% на расстояниях $x = 22,5 r_0$ до конца проводника, на 1% при $x = 7r_0$ и на 50% при $x = 0$. Максимальное удаление равносигнальных поверхностей такого проводника за его конец составляет $0,15r_0$ при радиусе, равном $0,191r_0$.
2. Односторонний участок токоведущего проводника, длина которого равна расстоянию r до точки наблюдения магнитного поля, образует 70,7%, а участок длиной $2r$ – 90% напряженности полубесконечного проводника.
3. Напряженность магнитного поля, создаваемого током бесконечного проводника, равна арифметической сумме напряженностей, создаваемых полубесконечными отрезками проводниками слева и справа от точки наблюдения поля.
4. Равносигнальные поверхности проекции вектора напряженности магнитного поля на произвольное направление образуют парные соприкасающиеся цилиндры, оси которых лежат в одной плоскости с проводником, и эта плоскость перпендикулярна к направлению оси проекций.
5. Цепь тока проводника конечной длины может замыкаться через землю при помощи заземлителей на концах проводника. При этом обратный ток заземлителей создает на поверхности земли магнитное поле, силовые линии которого образуют горизонтальные концентрические окружности с центром в точке заземления, причем в верхнем полупространстве перпендикулярная проводнику составляющая вектора напряженности тока заземлителей направлены встречно горизонтальной составляющей вектора напряженности тока проводника.

6. Напряженность магнитного поля, создаваемая током каждого заземлителя, на поверхности земли описывается законом полного тока с учетом протекания тока только в одном полупространстве.
7. По мере приближения точки наблюдения магнитного поля к концу проводника вектор напряженности суммарного поля тока и заземлителя приобретает продольную составляющую, параллельную проводнику; максимальное значение продольной составляющей может превышать модуль вектора напряженности тока проводника.
8. При питании двух параллельных проводов синфазными (однонаправленными) токами, равносигнальные поверхности модуля вектора напряженности вокруг каждого проводника теряют цилиндрическую форму и в перпендикулярном сечении вертикальной плоскостью приобретают «яйцевидную» форму, тупой конец которой лежит между проводниками, а максимальный подъем относительно плоскости проводов смещается наружу. Искажается также форма магнитных силовых линий, максимальный подъем которых смещается внутрь между проводами.
9. При питании двух параллельных проводов противофазными (встречными) токами в пространстве между проводами суммируются вертикальные составляющие и вычитаются горизонтальные. Точка с нулевой проекцией вектора напряженности суммарного магнитного поля на вертикальную ось смещается наружу относительно проводов, а максимального модуля вектора напряженности – внутрь.
10. Магнитное поле бесконечной петли аналогично магнитному полю двух проводов с противофазными токами. Магнитное поле прямоугольной петли конечных размеров образуется «прямым» током одной стороны и «обратными» токами трех остальных сторон. При этом вектор напряженности суммарного поля содержит три составляющих: вертикальную H_z , продольную H_x и поперечную H_y .

11. Земля обладает конечным электрическим сопротивлением, поэтому под действием первичного переменного магнитного поля в ней возникает электродвижущая сила, и протекают токи индукции, создающие вторичные магнитные поля. Суммарный вектор напряженности этих полей не совпадает с вектором напряженности первичного поля ни по фазе, ни в пространстве, поэтому суммарное «нормальное» магнитное поле эллиптически поляризованное. Параметры эллипса поляризации определяются удельным электрическим сопротивлением земли, частотой магнитного поля и расстоянием между источником первичного и точкой наблюдения суммарного поля.

Глава 3. АНАЛИЗ НАВИГАЦИОННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

3.1. Поле круговой рамки в сферической системе координат

Магнитное поле круговой рамки обладает осевой симметрией относительно аксиальной оси OZ, перпендикулярной к плоскости рамки и проходящей через её центр (рис.3.1).

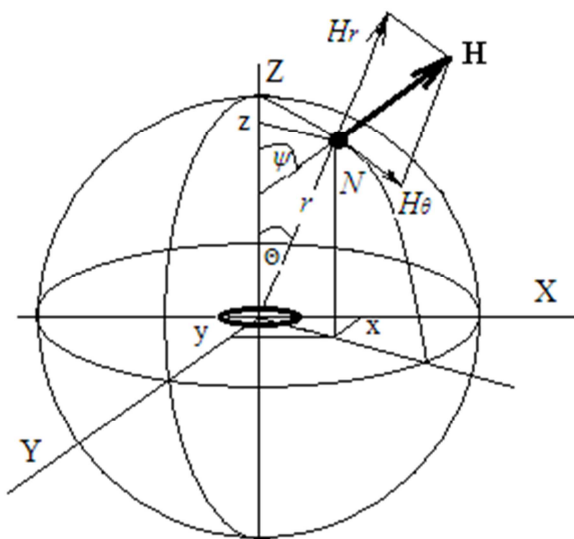


Рисунок 3.1. Напряженность магнитного поля рамки

На расстояниях от круговой рамки, превышающих её диаметр, напряженность магнитного поля описывается в сферической системе координат уравнениями [23]:

$$H_r = \frac{2M \cos \theta}{r^3}; \quad H_\theta = \frac{M \sin \theta}{r^3};$$

где:

- H_r и H_θ – нормальная (радиальная) и тангенциальная (касательная) составляющие вектора напряженности;
- r – расстояние между центром рамки и рассматриваемой точкой пространства,
- θ – зенитный угол;
- $M = IWS/4\pi$ – магнитный момент рамки;
- $I = I_{\max}\sin\omega t$ – ток рамки;
- W - количество витков рамки;
- S – площадь рамки;
- $\omega = 2\pi f$ – круговая частота тока рамки;
- f – циклическая (1 цикл = 1 период!) частота тока рамки.

Ниже, если не оговорено иное, принимается $M = 1$.

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

$$H = 1/r^3.$$

В плоскости рамки и в параллельных ей сечениях равносигнальные линии напряженности образуют концентрические окружности, радиус которых определяется модулем вектора напряженности данной РСЛ:

$$r = \sqrt[3]{\frac{1}{H}} = \text{const.}$$

В меридиональной плоскости, в которой лежит аксиальная ось OZ рамки, $0 \leq \theta \leq 360^\circ$, поэтому уравнение РСЛ радиальной составляющей вектора напряженности:

$$r = \sqrt[3]{2\cos\theta/H_r},$$

и тангенциальной:

$$r = \sqrt[3]{\sin\theta/H_\theta}.$$

Форма РСЛ радиальной H_r и тангенциальной H_θ составляющих вектора напряженности рамки в меридиональной плоскости приведена на рисунке 3.2.

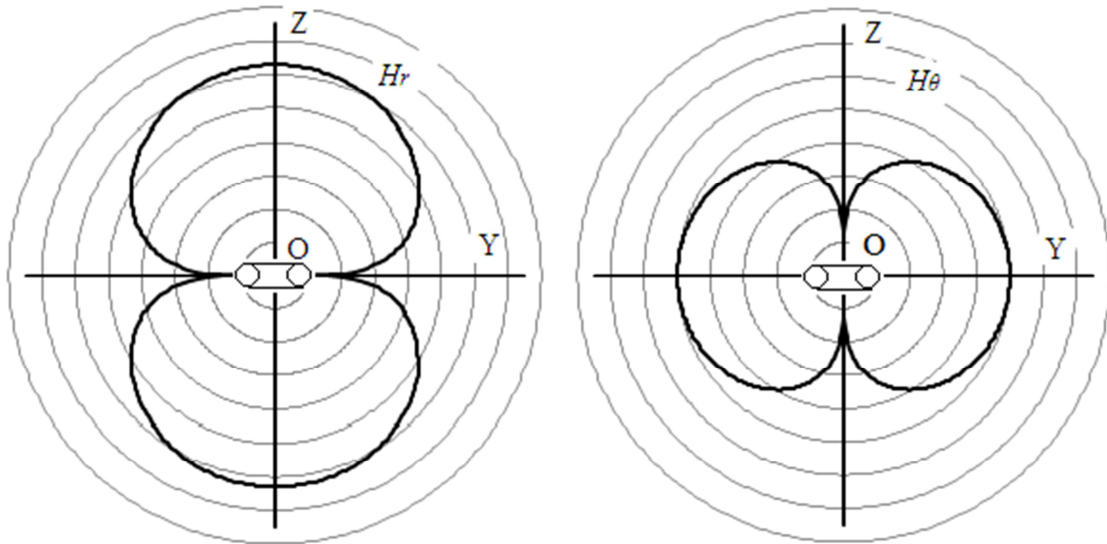


Рисунок 3.2. РСЛ радиальной H_r и тангенциальной H_θ составляющих вектора напряженности в меридиональной плоскости рамки

Модуль вектора напряженности магнитного поля в меридиональной плоскости [24]:

$$H = \sqrt{H_r^2 + H_\theta^2} = \frac{\sqrt{\sin^2 \theta + 4\cos^2 \theta}}{r^3} = \frac{\sqrt{1 + 3\cos^2 \theta}}{r^3}. \quad (3.1)$$

Уравнение (3.1) позволяет определить форму РСЛ модуля вектора напряженности в полярной системе координат, рисунок 3.3:

$$r = \frac{\sqrt[6]{1 + 3\cos^2 \theta}}{\sqrt[3]{H}}. \quad (3.2)$$

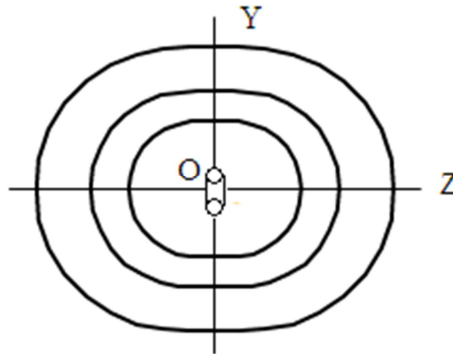


Рисунок 3.3. Форма РСЛ модуля вектора напряженности
в меридиональной плоскости рамки

Вектор напряженности \mathbf{H} и аксиальная ось OZ рамки лежат в одной плоскости, рисунок 3.4.

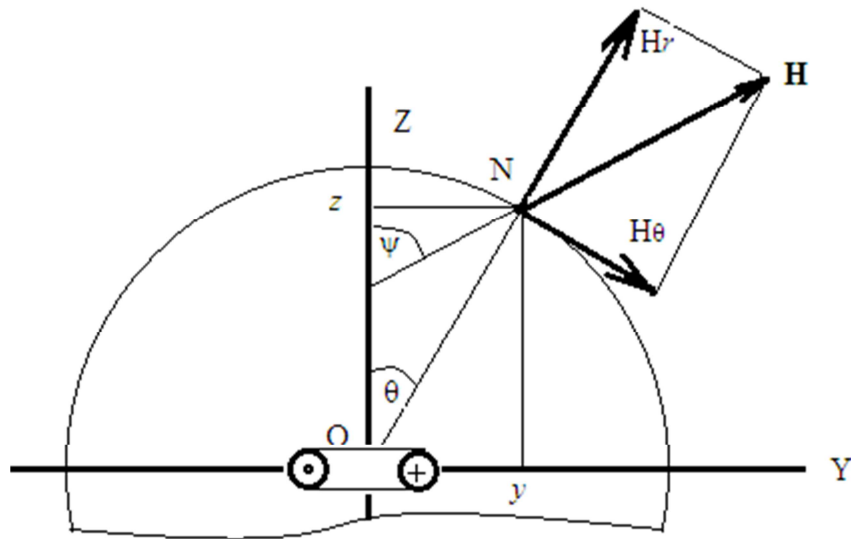


Рисунок 3.4. Направление вектора \mathbf{H} в плоскости YOZ рамки

Угол ψ между вектором напряженности и осью OZ рамки:

1) при $\text{tg}^2\theta < 2$:

$$\psi = \theta + \text{arctg} \frac{H_\theta}{H_r} = \theta + \text{arctg} \left(\frac{\text{tg}\theta}{2} \right) = \text{arctg} \frac{1,5\text{tg}\theta}{1 - 0,5\text{tg}^2\theta} ;$$

2) при $\operatorname{tg}\theta > 0$; $\operatorname{tg}^2 > 2$:

$$\psi = \pi + \operatorname{arctg} \frac{1,5\operatorname{tg}\theta}{1 - 0,5\operatorname{tg}^2\theta};$$

3) при $\operatorname{tg}\theta < 0$; $\operatorname{tg}^2 > 2$:

$$\psi = -\pi + \operatorname{arctg} \frac{1,5\operatorname{tg}\theta}{1 - 0,5\operatorname{tg}^2\theta}.$$

Зависимость приращения угла ψ от приращения угла θ :

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

поэтому вблизи оси OZ рамки $\Delta\psi \approx 1,5\Delta\theta$, а вблизи оси OY (вблизи плоскости рамки) $\Delta\psi \approx 3\Delta\theta$, так как в первом случае $\theta \approx 0$, а во втором $\theta \approx 90^\circ$.

3.2. Магнитное поле рамки в прямоугольной системе координат

Совместим начало прямоугольной системы координат OXYZ с центром рамки, а плоскость XOY с плоскостью рамки. Тогда напряженность в плоскости рамки:

$$H = H_\theta = \frac{1}{r^3} = \frac{1}{\sqrt{(x^2 + y^2)^3}}.$$

В плоскости рамки РСЛ модуля вектора напряженности образуют концентрические окружности, поэтому отклонение точек РСЛ от касательной к точке с координатой $x = 0$, рисунок 3.5:

$$\Delta y = y_o - y = y_o \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{y_o}\right)^2} \right]. \quad (3.3)$$

Так, например, если $x/y = 0,3$, то $\Delta y = 0,046y$, или 4,6% от $y_o = 100\%$.

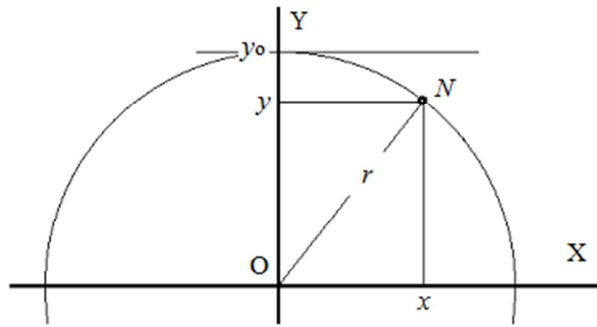


Рисунок 3.5. Отклонение РСЛ $H = \text{const}$ от прямой линии

На высоте z над плоскостью рамки

$$\theta = \arccos \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}},$$

поэтому уравнение (3.1) после преобразования принимает вид:

$$H = \frac{\sqrt{y^2 + 4z^2}}{(y^2 + z^2)^2}. \quad (3.4)$$

Зависимость $y(z)$ точек РСЛ модуля вектора напряженности приведена на рисунке 3.6.

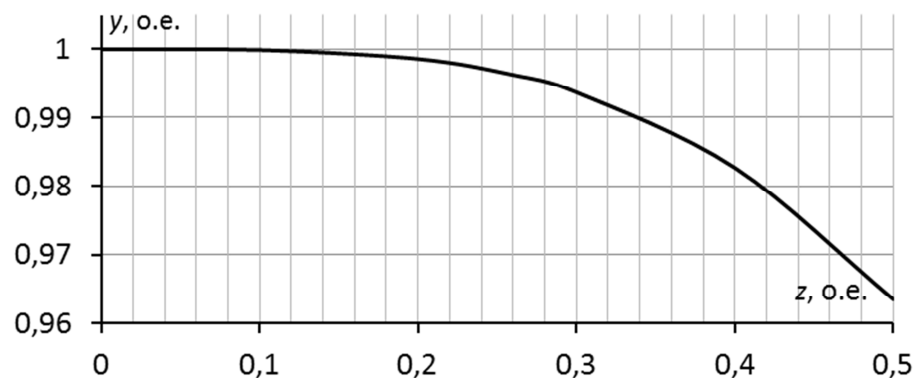


Рисунок 3.6. Форма РСЛ модуля вектора напряженности
вблизи плоскости рамки (масштаб по осям разный)

В таблице 3.1 приведены координаты z и y точек РСЛ модуля вектора напряженности; за 100 относительных единиц принято расстояние от центра рамки до точки пересечения РСЛ с плоскостью рамки. Как видно, в диапазоне изменения координаты $|z| < |0,26y|$ отклонение точек РСЛ от прямой линии не превышает $\pm 0,2\%$. В строке 3 таблицы приведено значение расстояния R от точки РСЛ с координатами $(y; z)$ до точки с координатами $(z = 26 \text{ о. е.}; y = 0)$.

Табл. 3.1. Координаты точек РСЛ модуля вектора напряженности в меридиональной плоскости YOZ.

z	0	5	10	15	20	25	30	35	40
y	100	100	99,99	99,95	99,86	99,67	99,37	98,91	98,27
R	-	-	-	-	-	99,68	99,45	99,32	99,26
Продолжение таб. 2.1									
z	45	50	55	60	65	70	75	80	85
y	97,43	96,35	95,04	93,45	91,57	89,37	86,83	83,91	80,57
R	99,27	99,29	99,37	99,44	99,53	99,61	99,7	99,78	99,86
Окончание табл. 2.1									
z	90	95	100	105	110	115	120	125	126
y	76,74	72,34	67,28	61,37	54,35	45,7	34,2	14,11	0
R	99,93	99,97	100,01	100,04	100,05	100,05	100,03	100	100

Рисунок 3.3 и данные таблицы 3.1 показывают, что РСЛ модуля вектора напряженности можно представить в виде двух полуокружностей, концы которых соединены прямыми отрезками. Центры полуокружностей лежат на оси OZ ($x_{ц} = 0$), на расстоянии $0,52R$ ($z_{ц} = \pm 26$) друг от друга. Это подтверждают данные строки 3, в которой приведена длина отрезка, соединяющего точку на оси OZ с координатой $z = 26$, и точки РСЛ с координатами $(y; z)$. Как видно, разность между наибольшим ($R = 100,05$ при $z = 110, y = 54,35$) и наименьшим ($R = 99,26$ при $z = 40, y = 98,27$) отрезками равна 0,79. Концы

полуокружностей соединены практически прямыми отрезками – непрямолинейность РСЛ на длине $\Delta z = 25 \times 2 = 50$ составляет $\Delta y = 100 - 99,67 = 0,33$. Геометрическое место точек сопряжения прямых с окружностями образует в пространстве конус с вершиной в центре рамки и углом при вершине конуса 151° .

3.3. Равносигнальные линии проекций вектора напряженности

Вектор напряженности \mathbf{H} и аксиальная ось OZ рамки лежат в одной меридиональной плоскости; угол ψ между вектором напряженности и осью OZ (см. рис. 3.4) описывается уравнением:

$$\psi = \theta + \operatorname{arctg}(0,5\operatorname{tg}\theta) = \operatorname{arctg}\frac{3yz}{2z^2 - y^2}.$$

Поэтому:

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{3yz}{2z^2 - y^2}; \quad \cos\psi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\psi}} = \frac{2z^2 - y^2}{\sqrt{4z^4 + 5y^2z^2 + y^4}};$$

$$\sin\psi = \frac{\operatorname{tg}\psi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\psi}} = \frac{3yz}{2z^2 - y^2} \cdot \frac{2z^2 - y^2}{\sqrt{4z^4 + 5y^2z^2 + y^4}}. \quad (3.5)$$

Вектор напряженности параллелен плоскости рамки при $\psi = 90^\circ$, что имеет место при $2z^2 = y^2$. Поэтому уравнение линии с нулевой проекцией вектора напряженности на вертикальную ось рамки OZ :

$$y = z\sqrt{2}.$$

Эта линия образует с осью OZ рамки угол θ :

$$\theta = \operatorname{arctg}(\sqrt{2}) \approx 54,74^\circ.$$

Величина проекции вектора напряженности в меридиональной плоскости YOZ на направление, образующее с осью OZ рамки угол γ , описывается уравнением:

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

Проекция вектора напряженности на ось OZ рамки соответствует $\gamma = 0$, поэтому уравнение равносигнальной линии $H_z = \text{const}$:

$$H_z = H \cos \psi = \frac{\sqrt{y^2 + 4z^2}}{(y^2 + z^2)^2} \cdot \frac{2z^2 - y^2}{\sqrt{4z^4 + 5y^2z^2 + y^4}} = \text{const}.$$

Уравнение РСЛ проекции вектора напряженности на плоскость рамки:

$$H_y = H \sin \psi = \frac{\sqrt{y^2 + 4z^2}}{(y^2 + z^2)^2} \cdot \frac{3yz}{2z^2 - y^2} \cdot \frac{2z^2 - y^2}{\sqrt{4z^4 + 5y^2z^2 + y^4}} = \text{const}.$$

При изменении координат $(y; z)$ точки наблюдения поля от $(0; z)$ до $(y; 0)$ угол ψ изменяется от 0 до 180° . При любом значении угла γ найдется точка РСЛ, в которой $\psi - \gamma = 0$; в этой точке РСЛ проекции вектора напряженности соприкоснется с РСЛ модуля вектора напряженности. Такая ситуация повторится в каждой четверти системы координат, поэтому РСЛ проекций вектора напряженности образуют 4-лепестковые лемнискаты, вписанные в РСЛ модуля вектора напряженности, рисунок 3.7.

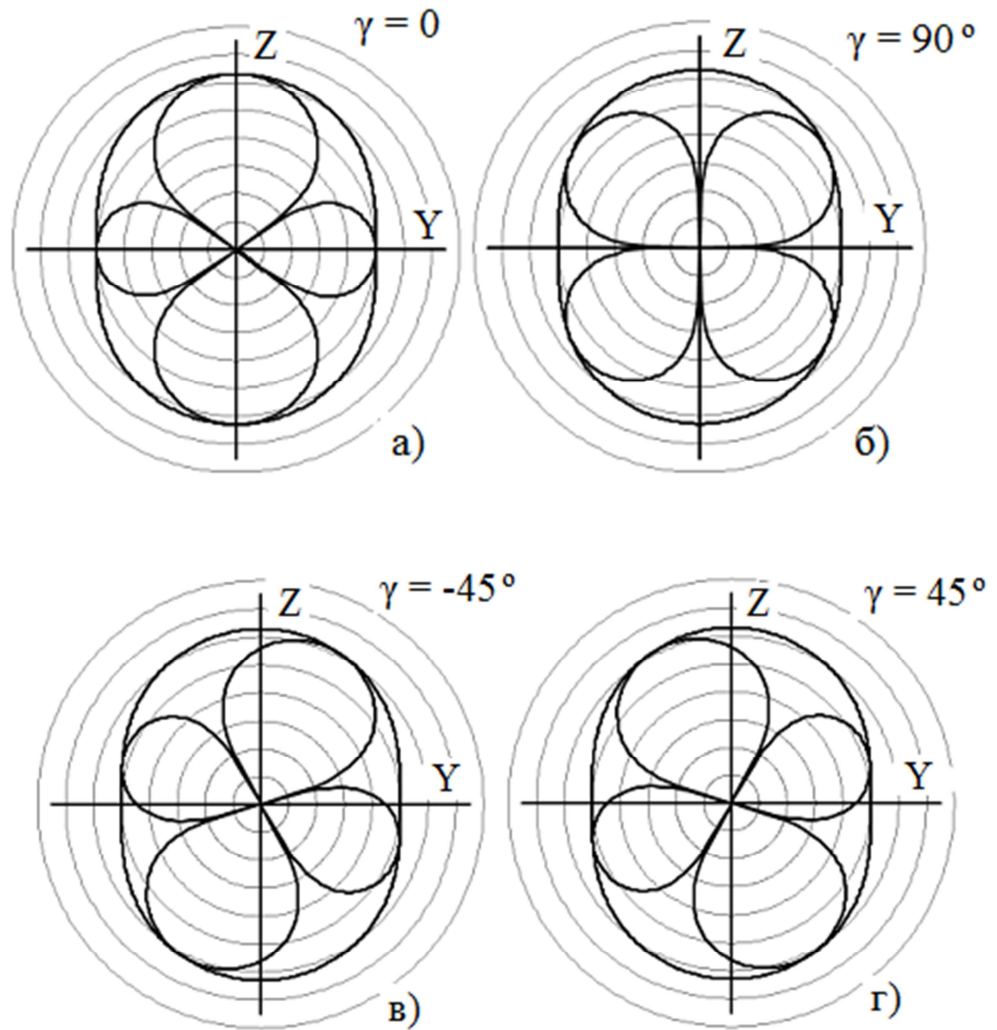


Рисунок 3.7. РСЛ проекций вектора напряженности на направления, образующие углы γ с осью OZ рамки

3.4. Форма магнитных силовых линий рамки

Вектор напряженности в любой точке направлен по касательной к магнитной силовой линии, проходящей через эту точку, и образует с осью OZ рамки угол ψ . Поэтому, учитывая (3.5), в дифференциальной форме уравнение магнитных силовых линий рамки имеет вид:

$$\frac{dy}{dz} = \operatorname{tg}\psi = \frac{3yz}{2z^2 - y^2}.$$

Решение этого уравнения записывается в виде:

$$Cy^2 = \sqrt{(y^2 + z^2)^3},$$

где постоянная интегрирования C зависит от координат точки, через которую проходит силовая линия.

Если $z = 0$, то $Cy^2 = y^3$, откуда следует, что численное значение постоянной C равно расстоянию между центром рамки и точкой пересечения силовой линией плоскости рамки.

Для определения максимального удаления равносигнальной линии от плоскости проводов примем $C=1$ и приведем уравнение силовой линии к виду:

$$z = \sqrt{y^{4/3} - y^2}.$$

Продифференцировав z по y и приравняв нулю, после преобразования получим:

$$y^2 = (2/3)^3.$$

Следовательно, при $C = 1$ максимальному удалению магнитной силовой линии от плоскости рамки соответствуют координаты:

$$y = 0,544; \quad z = 0,3849.$$

В качестве примера на рисунке 3.8 изображены силовые линии с постоянными C , указанными возле соответствующих кривых.

Аналогичным образом определяется уравнение линий, ортогональных силовым: $zC = \sqrt{(y^2 + z^2)^3}$, где $C = z_0^2$ – квадратичное значение координаты z точки пересечения ортогональной линии и оси OZ рамки, рисунок 3.9.

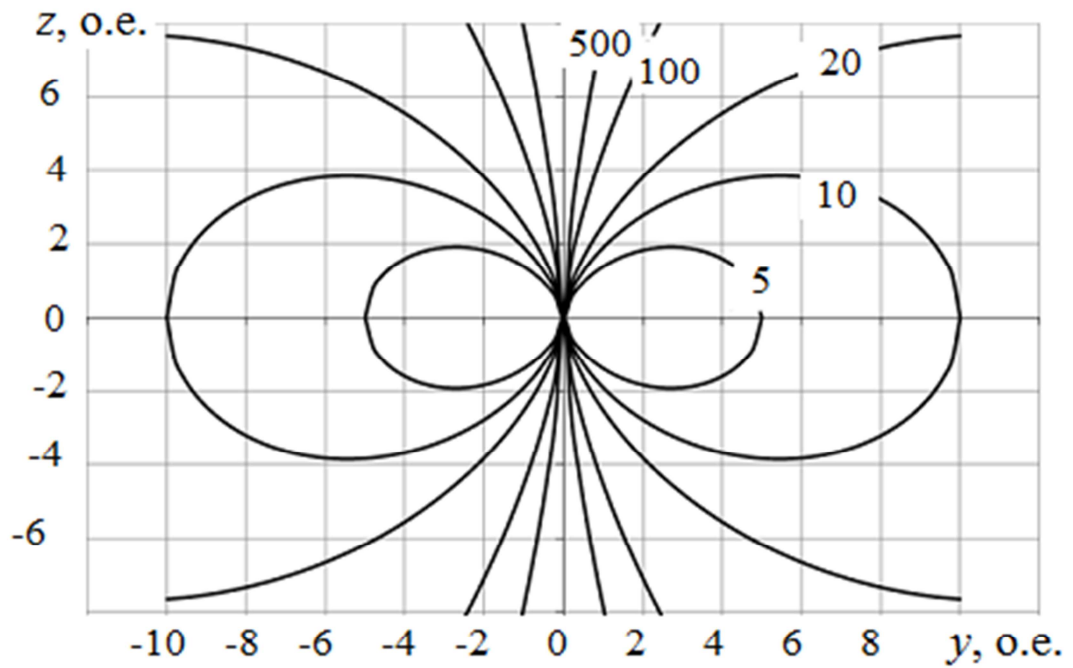


Рисунок 3.8. Магнитные силовые линии, пересекающие плоскость рамки на расстояниях 5...500 относительных единиц от центра рамки

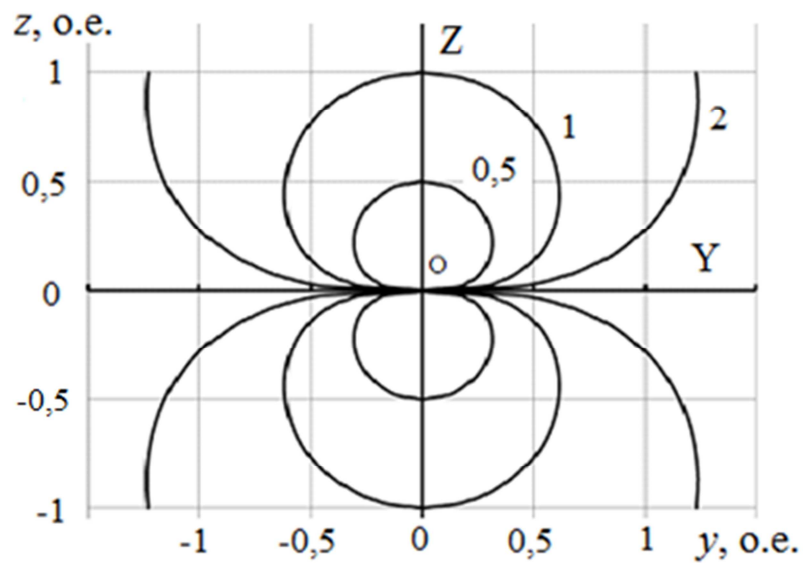


Рисунок 3.9. Форма линий, ортогональных магнитным силовым линиям

3.5. Суммарное поле двух горизонтальных рамок

Пусть расстояние между центрами двух рамок, лежащих в одной плоскости, равно $2b$, их магнитные моменты одинаковые и равны 1 о.е. Тогда напряженность H результирующего поля рамок выразится уравнением:

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

Форма РСЛ суммарного поля близка к овалам Кассини и зависит от координаты y_0 точки на оси OY , через которую проходит данная РСЛ. Если $y_0 > 2b$, то РСЛ образует овал, который при $y_0 \gg 2b$ превращается в окружность. При $0 < y_0 < 2b$ РСЛ принимают форму «овала с талией»; при $y_0 = 0$ РСЛ образует «восьмерку», как показано на рисунке 3.10. При дальнейшем увеличении напряженности РСЛ образуют парные, не соприкасающиеся между собой замкнутые кривые вокруг каждой рамки.

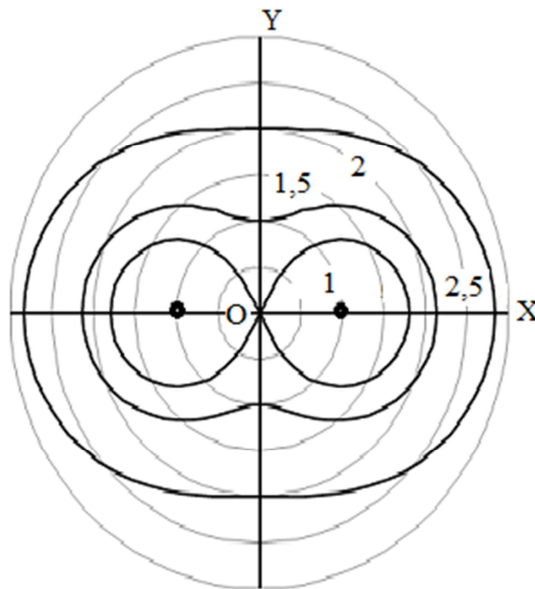


Рисунок 3.10. РСЛ суммарного поля двух рамок, лежащих в одной плоскости на расстоянии $2b$ друг от друга ($b = 1$ о. е.)

В таблице 3.2 приведены значения координат точек РСЛ суммарного поля двух рамок. Уровни напряженности смежных РСЛ различаются в 2 раза; уровень $H = 32$ (относительные единицы) соответствует напряженности в начале системы координат ($x = 0, y_0 = 0$). За относительную единицу расстояния принято $\frac{1}{2}$ расстояния $2b$ между центрами рамок ($b = 1$ отн. ед.); начало координат совмещено с серединой базы $2b$.

Табл. 3.2. Координаты точек РСЛ суммарного поля двух рамок

x/b	y/a точек РСЛ при H , о. е.					
	$H=32$	$H=16$	$H=8$	$H=4$	$H=2$	$H=1$
0	0	0,766	1,234	1,732	2,313	3,013
0,1	0,194	0,78	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	1,28	1,74	2,305	3
0,5	0,658	0,944	1,298	1,743	2,3	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	2,97
0,8	0,787	1,021	1,33	1,74	2,275	2,957
0,9	0,803	1,03	1,332	1,733	2,262	2,942
1	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

Данные столбца 5 таблицы 3.2 показывают, что для РСЛ $y_0 = 1,732b$ изменение координаты x в диапазоне $\pm 0,9b$ изменяет координату y не более

чем на $\pm 0,35\%$; для одиночной рамки, согласно (2.2), непрямолинейность в этом же диапазоне в 20 раз больше.

Если магнитные моменты рамок одинаковые, то на оси OZ между рамками, на высоте $z = 0,707b$, напряженность отсутствует, так как в этой точке векторы напряженности направлены встречно и равны по модулю. Во всех иных точках вне плоскости рамок вектор суммарного поля определяется векторным сложением слагаемых.

Расширить диапазон значений y , при которых кривизна РСЛ не превышает заданного значения, можно при помощи третьей рамки в начале системы координат; изменяя величину и знак магнитного момента этой рамки, можно корректировать форму требуемой РСЛ.

3.6. Поле противофазных рамок

При питании двух рамок, лежащих в одной плоскости и имеющих общую ось OY, противофазными токами, результирующая напряженность в плоскости рамок равна арифметической разности составляющих:

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

Если магнитные моменты двух рамок одинаковые, то РСЛ нулевой напряженности совпадает с осью OX. Если магнитные моменты рамок не одинаковые, то форма нулевой РСЛ отклоняется от прямолинейной. Для точек этой линии справедливо:

$$H_1 = H_2; \quad \frac{M_1}{r_1^3} = \frac{M_2}{r_2^3}; \quad \frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^3 = C = \text{const.}$$

Выразив r_1 и r_2 через прямоугольные координаты, получим:

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

После преобразования получим уравнение геометрического места точек с нулевой напряженностью:

$$x^2 + y^2 + 2bx \frac{C^{2/3} + 1}{C^{2/3} - 1} + b^2 = 0.$$

Это уравнение описывает окружность, координаты центра которой:

$$y_{ц} = 0; \quad x_{ц} = b(1 + C^{2/3}) / (1 - C^{2/3}),$$

а радиус:

$$R = 2b \frac{C^{1/3}}{1 - C^{2/3}}.$$

Данные таблицы 3.3 поясняют влияние отношения магнитных моментов рамок $C = M_2/M_1$ на радиус и координаты центра окружности РСЛ нулевой напряженности суммарного поля.

Табл. 3.3. Параметры окружностей с нулевой напряженностью

C	1	0,99	0,98	0,95	0,9	0,85	0,8	0,7	0,5
x	∞	298,499	148,497	58,493	28,485	18,477	13,469	8,451	4,405
R	∞	298,497	148,494	58,484	28,468	18,45	13,432	8,391	4,29

Внутри окружности фаза результирующего поля совпадает с фазой тока ближней рамки, магнитный момент которой меньше, а снаружи окружности – дальней рамки, с более высоким моментом.

3.7. Магнитное поле квадратной рамки

По конструктивным соображениям рамка может быть выполнена в виде многоугольника, например, квадрата. Магнитное поле такого источника описывается теми же уравнениями, которыми описывается магнитное поле петли. В качестве примера в таблице 3.4 приведены расстояния r точек трех РСЛ до центра квадратной рамки 1×1 м. Как видно, на расстоянии 3 м от центра окружности точки РСЛ отклоняются от окружности менее чем на ± 1 мм.

Табл. 3.4. Удаленность точек РСЛ от центра квадратной рамки 1×1 м

α , град	0	15	30	45	60	75	90
r , м	1	1,0107	1,035	1,049	1,03497	1,0107	1
	3	3,0004	3,001	3,001	3,00111	3,00037	3
	5	5,0001	5,0003	5,0004	5,00027	5,00009	5

Выводы по главе 3

1. Напряженность, создаваемая током круговой рамки на расстояниях, превышающих диаметр рамки, прямо пропорциональна магнитному моменту рамки и обратно пропорциональна кубу расстояния до центра рамки.
2. При прочих равных условиях напряженность магнитного поля вдоль аксиальной оси рамки в 2 раза больше, чем вдоль радиальной оси.
3. Поле рамки отличается от поля магнитного вибратора в зоне излучения наличием нормальной составляющей вектора напряженности магнитного поля.

4. Равносигнальные поверхности модуля вектора напряженности рамки образуют фигуры в виде двух полусфер, соединенных цилиндром, высота которого составляет 52 % радиуса полусфер.
5. Вектор напряженности магнитного поля лежит в меридиональной плоскости рамки и образует с аксиальной осью OZ угол ψ , величина которого зависит от зенитного угла θ между осью OZ и направлением на точку наблюдения поля; изменение зенитного угла от 0 до 90° изменяет угол ψ от 0 до 180° .
6. Равносигнальные линии проекции вектора напряженности на произвольное направление образуют в меридиональной плоскости четырехлепестковые лемнискаты, вписанные в равносигнальную линию модуля вектора напряженности.
7. Магнитные силовые линии лежат в меридиональных плоскостях рамки и имеют яйцевидную форму, узкий конец которой проходит через рамку. Максимальное удаление силовой линии от плоскости рамки составляет 38,5% и находится на расстоянии 54,4 % от центра рамки, при пересечении силовой линией плоскости рамки на расстоянии 100% от рамки.
8. Равносигнальные линии модуля вектора напряженности двух синфазных рамок, лежащих в одной плоскости, образуют в этой плоскости замкнутые кривые типа овалов Кассини.
9. Линия нулевой напряженности суммарного поля противофазных рамок, лежащих в одной плоскости, образует в этой плоскости окружность, центр которой лежит на линии центров рамок, а радиус определяется отношением магнитных моментов рамок.
10. Магнитное поле рамки произвольной формы на расстояниях, превышающих наибольший размер рамки, практически совпадает с полем круговой рамки с таким же магнитным моментом.

Глава 4. АНАЛИЗ КВАЗИВОЛНОВОГО НАВИГАЦИОННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Введение

В радионавигации известен импульсно-фазовый метод измерения расстояний по величине фазового сдвига радиосигнала на отрезке от излучателя до точки измерения. Ввиду высокой точности, такой метод представляет практический интерес для местоопределения МТА в низкочастотном квазистационарном магнитном поле. Но неизвестно, как создавать такие поля, и каковы их свойства. В настоящей главе приведены ответы на эти вопросы.

4.1. Создание квазिवолнового магнитного поля

Фаза квазистационарного переменного магнитного поля практически совпадает с фазой создающего его тока независимо от расстояния до проводника с током, что исключает возможность измерения этого расстояния по фазовому сдвигу поля относительно фазы тока. Однако если создать такое низкочастотное магнитное поле, фаза которого будет определяться расстоянием до источника, то появится возможность амплитудные измерения заменить более высокоточными временными.

Пусть допустимой погрешности измерения расстояния $\Delta y = 0,01\text{ м}$ соответствует погрешность измерения длительности электрического импульса $\Delta t = 10^{-6}$ с. Тогда коэффициент преобразования расстояния в длительность электрического импульса должен составить:

$$V = \Delta y / \Delta t = 10^{-2} / 10^{-6} = 10^4 \text{ м/с.}$$

В электротехнике низкая скорость перемещения фазового фронта магнитного поля имеет место, например, в асинхронных электродвигателях: при

скорости вращения 3000 об/мин. и диаметре статора 0,3 м линейная скорость перемещения магнитного поля составляет 50 м/с.

Аналогично, питая два смежных прямолинейных проводника токами одной частоты, взаимно сдвинутыми по фазе на угол φ_{12} , можно создавать «квазиволновые» магнитные поля с низкой фазовой скоростью. Модуль вектора напряженности такого поля в плоскости проводов равен векторной сумме составляющих [25; 26]:

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + 2H_1H_2 \cos \varphi_{12}},$$

а фазовый сдвиг напряженности относительно тока:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{H_2 \sin \varphi_{12}}{H_1 + H_2 \cos \varphi_{12}}. \quad (4.1)$$

Перемещение точки наблюдения поля между проводниками сопровождается изменением напряженностей H_1 и H_2 . Поэтому меняется величина H напряженности суммарного поля в точке наблюдения и её фазовый сдвиг φ относительно тока в проводах.

Фазовый угол φ_{12} между токами проводов является конструктивной постоянной; примем этот угол равным 90° . Пусть расстояние между двумя бесконечно длинными проводами $2b$, ось ОХ системы координат ОХYZ лежит в плоскости проводов параллельно проводам, посередине между ними. Тогда для точек с координатой $z = 0$ справедливо:

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2} = \frac{\sqrt{2b^2 + 2y^2}}{b^2 - y^2}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{H_2}{H_1} = \operatorname{arctg} \frac{b - y}{b + y}. \quad (4.2)$$

Согласно (4.2), перемещение точки наблюдения поля между проводами от $y = b$ до $y = -b$ изменит фазовый сдвиг φ от нуля до 90° , т.е. на четверть периода Т. Среднее значение фазовой скорости:

$$V_{cp} = 2b/(T/4) = 8b/T = 8bf,$$

где $f = 1/T$ – циклическая (цикл = период) частота магнитного поля.

Так, если $f = 50$ Гц, $b = 15$ м, то $V_{cp} = 8 \cdot 15 \cdot 50 = 6$ км/с.

Мгновенную фазовую скорость определим следующим образом. Согласно (4.2):

$$\frac{d\varphi}{dy} = \frac{1}{1 + \left(\frac{b-y}{b+y}\right)^2} \cdot \frac{2b}{(b+y)^2} = \frac{b}{b^2 + y^2},$$

откуда:

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

Так как $\varphi = \omega t$, то $d\varphi/dt = \omega$. Поэтому значение фазовой скорости в плоскости проводов, на расстоянии y от срединной линии:

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

В точках с координатой $y = 0$ значение фазовой скорости минимальное и равно $V_{min} = \omega b$; при $y = \pm b$ фазовая скорость в 2 раза больше. Значение мгновенной скорости совпадает со средней скоростью в точке с координатой

$$y = b \sqrt{\frac{4}{\pi} - 1} \approx 0,523b.$$

При $f = 50$ Гц максимальная фазовая скорость не превысит 10 км/с, если расстояние $2b$ не более $10000/314 = 32$ м; при этом средняя скорость не превысит 6400 м/с.

На рисунке 4.1 при $\varphi_{12} = 90^\circ$, $b = \pm 1$ показана зависимость от y :

- фазового сдвига φ напряженности суммарного поля (градусов);
- модуля вектора напряженности H (о. е.);

- мгновенной скорости перемещения фазового фронта V (о.е.).

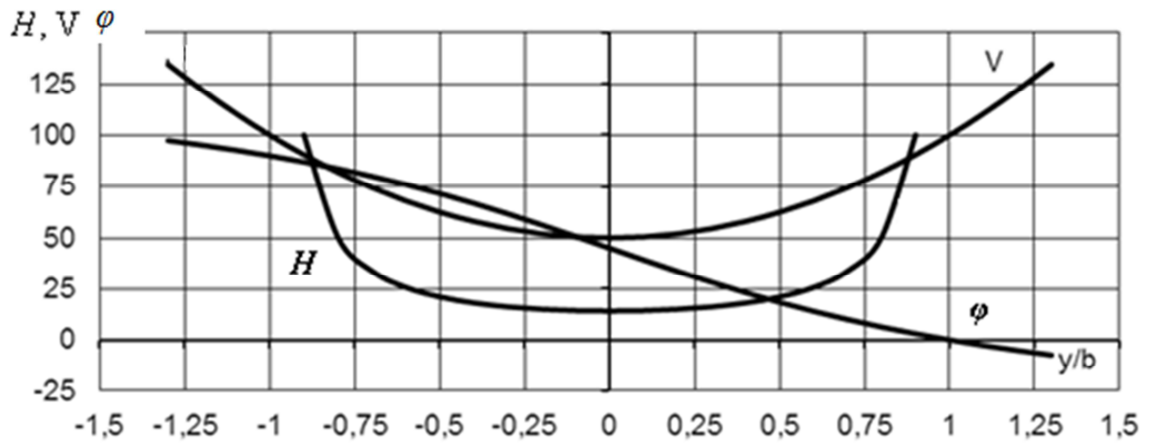


Рисунок 4.1. Параметры квазиволнового магнитного поля

По мере удаления точки наблюдения поля от проводов (увеличения координаты y) отношение $(b-y)/(b+y)$ стремится к ± 1 , а фазовый сдвиг – к минус 45° или к 135° , рисунок 4.2.

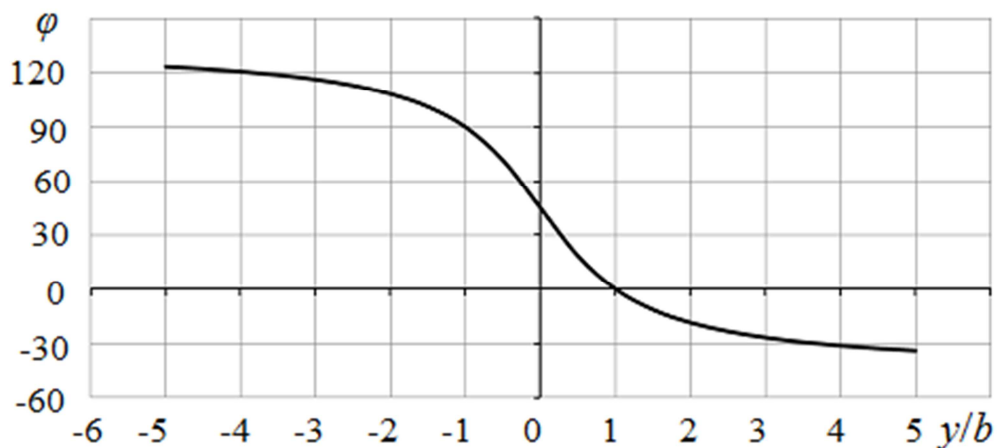


Рисунок 4.2. Фазовый сдвиг в плоскости проводов при $\phi_{12} = 90^\circ$

В таблице 4.1 приведены значения фазовой скорости внутри и снаружи от проводов при $\omega = 314$ ($f=50$ Гц), $2b = 30$ м. Как видно, фазовая скорость тем больше, чем дальше точка наблюдения поля от проводов, т.е. имеет место эффект «разбегающихся галактик».

Табл. 4.1. Зависимость фазовой скорости от координаты y при $2b = 30$ м

y , м	-15	-10	0	5	10	15	30	45	60	75	105	135
V , км/с.	9,42	6,8	4,71	5,23	6,8	9,42	23,55	47,1	80	122	235	386

Перемещение фазового фронта суммарного поля между проводами аналогично перемещению радиоволны, что позволяет назвать его «квазиволновым». В действительности смещение фазового фронта достигается благодаря сложению мгновенных значений двух магнитных полей, напряженность которых по-разному зависит от координат точки наблюдения поля. По существу, имеет место реализация математической операции векторного сложения мгновенных значений двух напряженностей, создаваемых синхронными токами смежных проводов.

4.2. Квазиволновое поле в плоскости проводов конечной длины

Выше предполагалось, что провода бесконечно длинные, т.е. не учитывался краевой эффект. Для учета влияния конечной длины $L = 2l$ проводов разместим начало системы координат XOY в равноудаленной от проводников точке, рисунок 3.3. Напряженности, создаваемые токами каждого проводника в точке с координатами $(x, y, 0)$, описываются уравнениями:

$$H_1 = \frac{1}{b-y} \left(\frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(b-y)^2}} + \frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(b-y)^2}} \right), \quad (4.3)$$

$$H_2 = \frac{1}{b+y} \left(\frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2+(b+y)^2}} + \frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2+(b+y)^2}} \right). \quad (4.4)$$

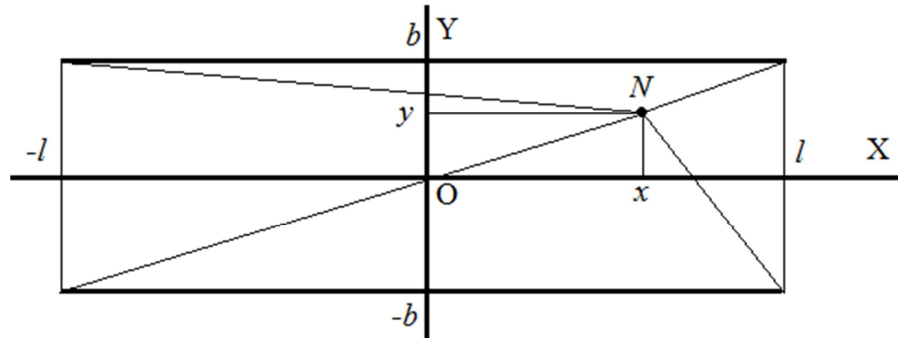


Рисунок 4.3. К расчету квазиволнового поля проводов конечной длины

Численное решение (4.1) с учетом (4.3) и (4.4) позволяет определить форму изофаз в плоскости XOY. В качестве примера в таблице 4.2 приведены параметры изофазы, проходящей через точку с координатами $x = 0$, $y = 7,5$ м, при $2l = 1000$ м, $2b = 30$ м.

Табл. 4.2. Параметры изофазы $\varphi = 18,4195^\circ$ при $2l = 1000$ м, $2b = 30$ м

x , м	0	200	250	300	350	400	450	470	480	490
$\Delta\varphi$, мин	0	0,5934	1,12	2,12672	4,3	10,3776	39,29	89,0	146	230
Δt , мкс	0	0,5495	1,04	1,96919	3,98	9,6089	36,38	82,4	135	213
Δy , см	0	0,32	0,61	1,16	2,35	5,66	21,37	48,35	79	122

В строках таблицы 4.2 приведены:

- строка 1 – значения координаты x , м; строка 2 – отклонение фазового угла при $y = 7,5$ м от начального значения, угловых минут;
- строка 3 – время, соответствующее $\Delta\varphi$ на частоте 50 Гц, мкс;
- строка 4 – смещение координаты y изофазы относительно 7,5 м; см.

В таблице 4.3 приведены параметры изофазы с начальной координатой $y_0 = 5$ м и фазовым сдвигом $26,55^\circ$. Данные обеих таблиц показывают, напри-

мер, что на расстоянии 50 м до конца проводников расхождение между рассматриваемыми изофазами составит $21,37 - 16,92 = 4,45$ см.

Табл. 4.3. Параметры изофазы $\varphi = 26,55^\circ = \text{const}$

x	0	200	250	300	350	400	450	470	480	490
$\Delta\varphi$, мин	0	0,528	1,001	1,894	3,835	9,283	35,659	82,577	138	215
Δt , мкс	0	0,489	0,927	1,754	3,551	8,595	33,017	76,46	128	199
Δy , см	0	0,256	0,485	0,917	1,855	4,474	16,92	38,13	62	91,5

В таблице 4.4 в строке 4 приведено смещение координаты y изофаз в сантиметрах при $x = 450$ м (строка 3) по сравнению со значением при $x = 0$ (строка 2); в строке 5 приведены значения взаимного смещения смежных изофаз.

Табл. 4.4. Положение изофаз при $x = 0$ и $x = 450$ м, $2l = 1000$ м

φ , град.	1,9715	6,33087	11,2967	16,9122	23,18367	30,05667	37,3987	45
y_0 , м	14	12	10	8	6	4	2	0
y_φ , м	13,932	11,8368	9,7894	7,7826	5,8083	3,859	1,925	0
Δy , см	6,786	16,315	21,056	21,742	19,167	14,142	7,48	0
$\Delta\Delta y$, см	9,529	4,741	0,686	-2,575	-5,025	-6,662	-7,48	0

4.3. Поле над плоскостью бесконечных проводов

Над плоскостью проводов векторы \mathbf{H}_1 и \mathbf{H}_2 не совпадают ни в пространстве, ни во времени (по фазе), поэтому для определения действующего или амплитудного значений напряженности суммарного поля векторное сложение

значений H_1 и H_2 неприменимо. Но оно применимо к мгновенным значениям напряженностей h_1 и h_2 :

$$h_{\Sigma} = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + 2h_1h_2\cos(\psi_1 + \psi_2)}, \quad (4.5)$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{h_1 \sin \psi_1 + h_2 \sin \psi_2}{h_1 \cos \psi_1 + h_2 \cos \psi_2}, \quad (4.6)$$

где h_{Σ} - мгновенное значение напряженности квазиволнового поля.

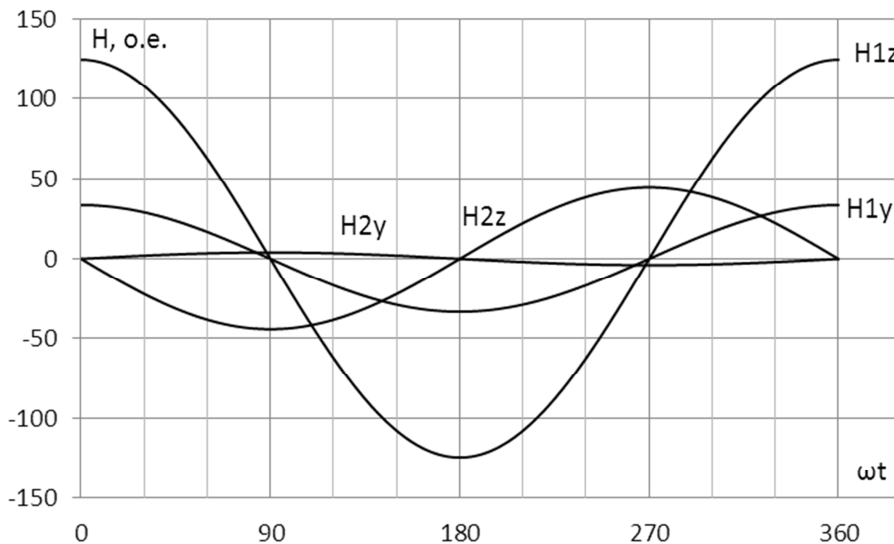


Рисунок 4.4. Изменение проекций векторов напряженности во времени в точке с координатами $y = 7,5$ м, $z = 2$ м при $2b = 30$ м

Для определения мгновенного положения вектора напряженности h_{Σ} и угла ψ между вертикалью и вектором h_{Σ} необходимо:

- разложить h_1 и h_2 на горизонтальную и вертикальную составляющие;
- сложить одноименные составляющие с учетом их знаков;
- определить мгновенные значения величины вектора h_{Σ} и его угла наклона ψ_{Σ} к вертикали.

Сказанное поясняется на рисунке 3.4 графиками мгновенных значений проекций векторов напряженности магнитного поля в точке с координатой $y = 7,5$ м при $2b = 30$ м, $z = 2$ м.

Графики мгновенных значений проекций и вектора суммарного магнитного поля в рассматриваемой точке приведены на рисунке 4.5.

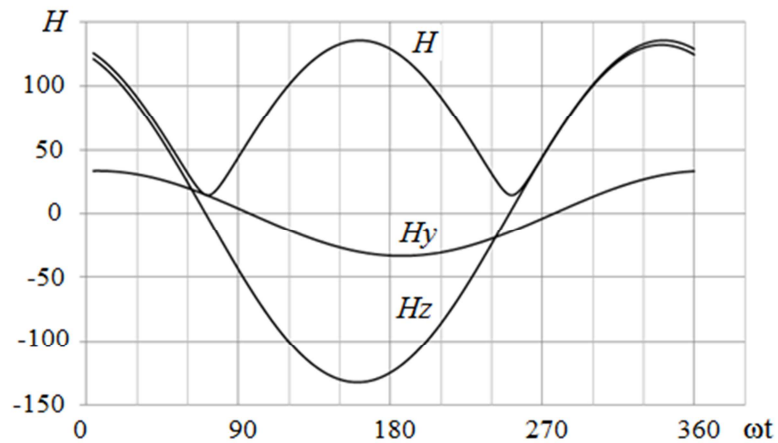


Рисунок 4.5. Графики мгновенных значений проекций и вектора напряженности магнитного поля при $y = 7,5$ м, $z = 2$ м, $2b = 30$ м

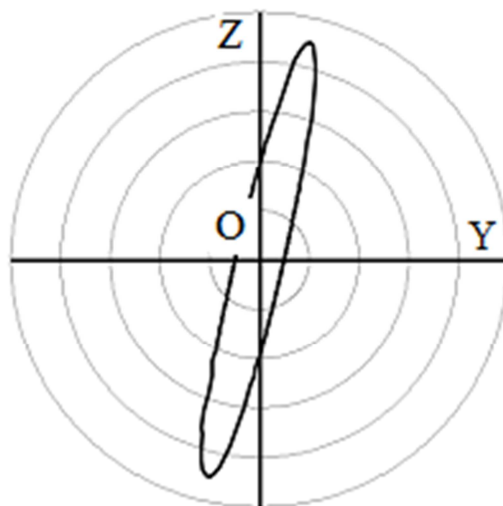


Рисунок 4.6. Эллипс поляризации квазиволнового магнитного поля в точке с координатами ($z = 2$ м; $y = 7,5$ м) при $2b = 30$ м

Численное решение (4.5) и (4.6) показывает, что вне плоскости проводов результирующее магнитное поле эллиптически поляризованное, т.е. конец вектора напряженности h_z в течение периода описывает в пространстве эллипс. На рисунке 4.6 приведена пространственная траектория конца вектора напряженности в точке с координатами $z = 2$ м, $y = 7,5$ м при $2b = 30$ м.

Основные параметры эллипса поляризации приведены в таблице 4.5, где ψ - угол наклона вектора напряженности к вертикали.

Табл. 4.5. Параметры эллипса поляризации

$\omega t, ^\circ$	h_{1z}	h_{1y}	h_{2z}	h_{2y}	H_z	H_y	H	Ψ
0	124,5	33,195	0	0	124,4813	33,19502	128,8313	14,93142
70,5	41,55	11,081	-41,57	3,6948	-0,01403	14,77555	14,77555	90,0544
71,9	38,67	10,313	-41,91	3,7257	-3,24056	14,0386	14,40776	102,998
90	0	0	-44,1	3,9196	-44,096	3,919647	44,2699	174,9204
96,75	-14,6	-3,902	-43,79	3,8925	-58,4216	-0,00918	58,42159	180,009
161,9	-118	-31,55	-13,7	1,2177	-132,021	-30,3346	135,4613	192,9403
180	-124	-33,2	0	0	-124,481	-33,195	128,8313	194,9314
251,9	-38,7	-10,31	41,914	-3,726	3,240557	-14,0386	14,40776	282,998
270	0	0	44,096	-3,92	44,09603	-3,91965	44,2699	354,9204
341,9	118,3	31,552	13,7	-1,218	132,0211	30,33465	135,4613	12,9403
360	124,5	33,195	0	0	124,4813	33,19502	128,8313	14,9314

Максимальное мгновенное значение модуля вектора напряженности 135,46 о. е. при $\omega t = 161,9^\circ$, а минимальное 14,08 о. е. при $\omega t = 71,9^\circ$. Отношение большой оси эллипса поляризации к малой равно 9,62. Большая ось эллипса поляризации образует с вертикалью угол $\psi = 12,94^\circ$. Скорость вращения вектора напряженности в пространстве неравномерная: изменение ωt от 70,5 до 71,9 $^\circ$ сопровождается поворотом вектора напряженности на угол $102,998 - 90,0544 = 12,9^\circ$, что составляет 9,2 пространственных градуса на один электрический. Из-

менение фазы от $341,9^\circ$ до 360° изменяет пространственное направление вектора напряженности на 2 градуса. Поэтому угловая скорость вращения вектора напряженности в течение периода в рассматриваемой точке пространства изменяется на два порядка; изменение тем больше, чем меньше значение координаты z .

Графики изменения мгновенных значений модуля h вектора напряженности и его угла наклона ψ к вертикали в течение одного периода приведены на рисунке 4.7.

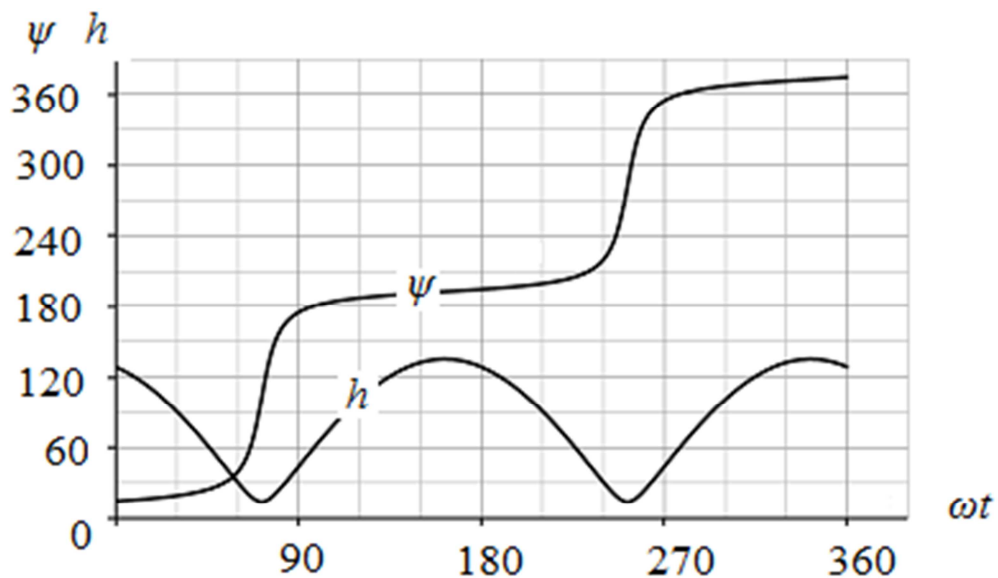


Рисунок 4.7. Изменение величины и угла наклона вектора напряженности

4.4. Изофазы в вертикальной плоскости YOZ

Опишем окружность в вертикальной плоскости на отрезке $2b$, как на диаметре, рисунок 4.8. Здесь I_1 и I_2 – проводники с токами, расположенные перпендикулярно к плоскости чертежа.

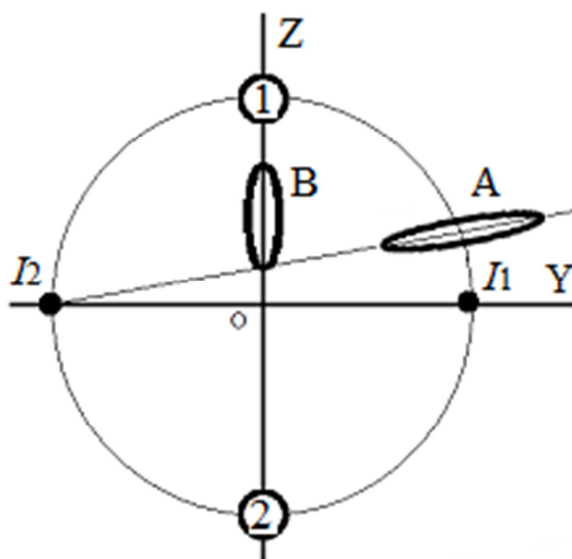


Рисунок 4.8. Квазиволновое поле в вертикальной плоскости

Прямые, проведенные из любой точки окружности к токам I_1 и I_2 , образуют между собой прямой угол. Векторы напряженности h_1 и h_2 , создаваемые токами I_1 и I_2 в точках дуги окружности, перпендикулярные к этим прямым, поэтому также образуют между собой прямой угол. В результате большая ось эллипса поляризации (A) совпадает с направлением на удаленный проводник, а малая ось – на ближний. Фаза напряженности результирующего поля, определяемая по максимальному мгновенному значению, совпадает с фазой тока в ближнем проводе по всей длине окружности, поэтому её 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 ось – амплитудному значению напряженности, создаваемой током в удаленном проводе. Другими словами, в точках П-окружности большая ось эллипса поляризации пропорциональна расстоянию до ближнего провода, а малая – до дальнего. Поэтому отношение осей эллипса поляризации для точек на П-окружности:

$$\frac{h_{\Sigma\text{мин}}}{h_{\Sigma\text{маx}}} = \sqrt{\frac{z^2 + (b - y)^2}{z^2 + (b + y)^2}}$$

Вертикальная срединная линия 1-2 делит П-окружность на две части. Поскольку 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 градусов. Вследствие равноправности левого и правого токов большая ось эллипса поляризации вдоль срединной линии вертикальная (эллипс В).

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:

$$h_{\Sigma\text{мин}} = 2 \frac{\sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \sin\psi_1}{b} = \sqrt{2} \frac{\sin\psi_1}{b}.$$

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:

$$h_{\Sigma\text{маx}} = 2 \frac{\sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) \cos\psi_1}{b} = \sqrt{2} \frac{\cos\psi_1}{b}.$$

Таким образом, вдоль срединной линии $h_{\Sigma\text{мин}}/h_{\Sigma\text{маx}} = \text{tg}\psi_1 = \text{tg}\psi_2 = z/b$, а эксцентриситет e эллипса поляризации:

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{z}{b}\right)^2}. \quad (4.7)$$

Точки пересечения П-окружности срединной линией, для которых $z = b$, можно назвать «полюсами изофаз». Расчет показывает, что все изофазы начинаются и заканчиваются на полюсах, рисунок 4.9.

На рисунке 3.8 полюса обозначены цифрами 1 и 2. Как следует из (4.7), в полюсах магнитное поле обладает круговой поляризацией ($e = 0$), т. е. мгновенное значение вектора напряженности постоянное, а вектор напряженности в пространстве вращается равномерно. При дальнейшем увеличении высоты ($z > b$) большая и малая оси эллипса поляризации меняются местами, т.е. большая ось располагается горизонтально.

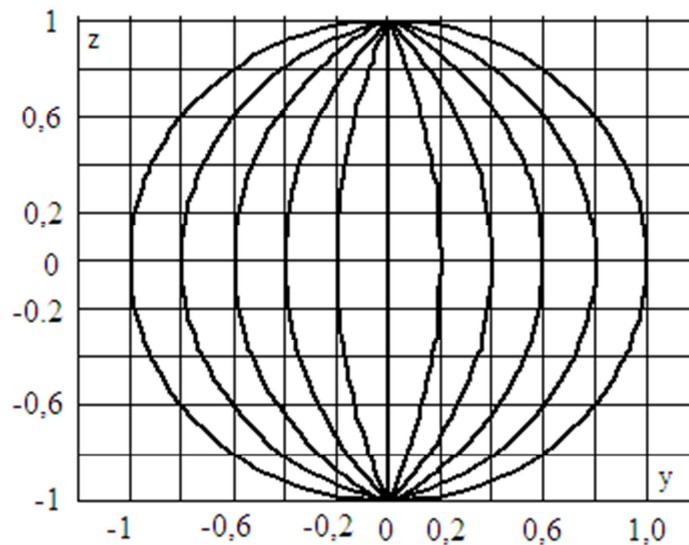


Рисунок 4.9. Изофазы квазиволнового поля в плоскости ZOY

4.5. Квазиволновое поле при фазовом сдвиге токов 120°

Выше предполагалось, что токи в смежных проводах сдвинуты по фазе на 90° , но сдвиг может быть произвольным. Так, если фазовый сдвиг 120° , то значение фазового угла:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{H_2 \sin \varphi_{12}}{H_1 + H_2 \cos \varphi_{12}} = \operatorname{arctg} \left(\sqrt{3} \frac{b-y}{b+3y} \right).$$

Если $y = b$, то $\varphi = 0$, а если $y = -b$, то $\varphi = (180^\circ - 60^\circ) = 120^\circ$. Мгновенное значение линейной скорости фазового фронта

$$V = \frac{dy}{dt} = \omega \frac{b^2 + 3y^2}{b\sqrt{3}}.$$

Минимальная фазовая скорость при $2b = 30$ м, $y = 0$ и $\omega = 314$ равна 2,7 км/с; максимальная скорость при $y = b$ в 4 раза больше.

Минимальное действующее значение напряженности в плоскости проводов при $y = 0$; модуль вектора напряженности квазиволнового поля в этой точке равен напряженности, создаваемой током одного из проводов, что в $\sqrt{2}$ меньше напряженности, создаваемой токами при $\varphi_{12} = 90^\circ$.

4.6. Таблица нормированных данных квазиволнового поля

Введем понятие нормированных значений: $\omega = 1$ рад; $2b = 1$ м; $I = 2\pi = 6,28$ (А). Результаты вычислений нормированных значений напряженностей H_1 , H_2 , H_Σ , угла φ и фазовой скорости $V = dy/dt$ в зависимости от приведенной координаты $(b-y)/2b$ точки наблюдения магнитного поля в плоскости бесконечно длинных проводов приведены в таблице 4.6.

Для определения фактических параметров магнитного поля по табличным (нормированным) данным необходимо:

- привести значение координаты $(b-y)$ точки наблюдения поля к расстоянию $2b$ между проводами, т.е. найти $(b-y)/2b$;
- в таблице 4.6 найти строку, соответствующую значению $(b-y)/2b$, и выписать нормированные значения параметров магнитного поля;

Табл. 4.6. Нормированные параметры квазиволнового поля

$(b-y)/2b$	H_1	H_2	H_Σ	φ , град	dy/dt
0,05	20,0	1,052632	20,02768	3,012788	0,905
0,1	10,0	1,111111	10,06154	6,340192	0,82
0,15	6,666667	1,176471	6,769677	10,00798	0,745
0,2	5,0	1,25	5,153882	14,03624	0,68
0,25	4,0	1,333333	4,21637	18,43495	0,625
0,3	3,333333	1,428571	3,626559	23,19859	0,58
0,35	2,857143	1,538462	3,245016	28,30076	0,545
0,4	2,5	1,666667	3,004626	33,69007	0,52
0,45	2,222222	1,818182	2,871247	39,28941	0,505
0,5	2,0	2,0	2,828427	45,0	0,5
0,6	1,666667	2,5	3,004626	56,30993	0,52
0,7	1,428571	3,333333	3,626559	66,80141	0,58
0,8	1,25	5,0	5,153882	75,96376	0,68
0,9	1,111111	10,0	10,06154	83,65981	0,82

- для определения фактических значений напряженностей необходимо их нормированные значения разделить на $4\pi b$ и умножить на ток I ;

- для определения фактической скорости перемещения фазового фронта V необходимо нормированное значение dy/dt перемножить на фактическое значение круговой частоты $\omega = 2\pi f$ тока в проводах и на расстояние $2b$ между проводами.

Пусть $2b=30$ м; $y=7,5$ м; $I = 1,5$ А; $\omega = 314$ ($f=50$ Гц). Тогда:

1. $(b-y)/2b = 0,25$;
2. $\varphi = 18,435^\circ$.
3. $H_1 = 4 \cdot 1,5 / (6,28 \cdot 30) = 0,031845$ А/м = 31,845 мА/м;
4. $H_2 = 1,333 \cdot 1,5 / (6,28 \cdot 30) = 0,01062$ А/м = 10,62 мА/м;
5. $H_\Sigma = 4,22 \cdot 1,5 / (6,28 \cdot 30) = 0,0336$ А/м = 33,6 мА/м;
6. $V = 0,625 \cdot 314 (1/\text{сек}) \cdot 30(\text{м}) = 5887,5$ м/с $\approx 0,6$ см/мкс.

4.7. Квазиволновое поле 2-х петель

В качестве источника переменного магнитного поля можно использовать заземленные на концах провода или изолированные от земли петли. В последнем случае отличие магнитного поля обусловлено влиянием токов удаленных и поперечных сторон петель, искривляющих прямолинейную форму изофаз. Расчет мгновенных значений напряженности в произвольной точке пространства можно выполнить векторным сложением мгновенных значений векторов, создаваемых каждой стороной петель.

В таблице 4.7 приведены координаты изофазы $\varphi = 13,37^\circ$ ($y = 7,5$ м) при $L = 1000$ м, ширине петель $2b_1 = 2b_2 = 30$ м, $2b = 30$ м (см. рис. 1.24 а).

Таблица 4.7. Изофаза петлевого источника квазиволнового поля

$x, \text{м}$	0	350	400	450	470	490	495	500
$y, \text{м}$	7,5	7,54	7,586	7,77	8	8,312	8,156	7,5

4.8. Квазиволновое поле 2-х рамок

Пусть две горизонтальные рамки лежат в одной плоскости на оси ОУ на расстоянии $2b$ друг от друга и питаются токами, сдвинутыми по фазе на 90° . Тогда в плоскости рамок фазовый сдвиг напряженности суммарного поля в точке с координатами (x, y) опишется уравнением:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{(b+y)^2 + x^2}{(b-y)^2 + x^2}}.$$

Зависимость фазы от бокового смещения y и продольного расстояния z приведена в таблице 4.8.

Табл. 4.8. Зависимость фазового сдвига квазиволнового магнитного поля рамок от координат y и x при $a = 1$ о.е.

y/a	-2	-0,2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,6	2
$x=3$	22,494	41,582	45	48,418	51,719	54,803	57,596	60,057	65,407	67,506
$x=5$	33,771	43,68	45	46,32	47,625	48,903	50,14	51,326	54,492	56,229
$x=10$	41,731	44,66	45	45,34	45,68	46,017	46,353	46,684	47,653	48,269

Выводы по главе 4

1. При питании двух параллельных проводов токами одной частоты, взаимно сдвинутыми по фазе на угол, отличный от нуля и 180° , в плоскости проводов создается суммарное магнитное поле, фаза которого зависит от расстояний точки наблюдения поля до проводов. Такое магнитное поле подобно радиоволне, поэтому может быть названо «квазиволновым».
2. Если сдвиг токов в проводах равен четверти периода, то перемещение точки наблюдения поля от одного провода к второму сопровождается изменением наблюдаемой фазы суммарного поля на 90° .
3. Скорость перемещения фазового фронта квазиволнового поля зависит от отношения расстояний до проводов. Минимальная скорость для точек с отношением расстояний, равным единице, и увеличивается по мере удаления точки наблюдения поля от срединной линии.
4. Вне плоскости проводов составляющие вектора напряженности квазиволнового поля не совпадают ни в пространстве, ни во времени, поэтому вектор результирующего поля можно определить только векторным сложением мгновенных значений составляющих, создаваемых токами каждого провода.

5. Вне плоскости проводов квазиволновое магнитное поле эллиптически поляризованное. Эксцентриситет эллипса поляризации зависит от расстояний до проводов и высоты точки наблюдения поля над плоскостью проводов.
6. В точках на высоте от плоскости проводов, равной половине расстояния между ними, и равноудаленной от проводов, магнитное поле обладает круговой поляризацией. В этих точках начинаются и заканчиваются все изофазы между проводами, что позволяет называть их «полюсами изофаз».
7. В плоскости проводов значение модуля вектора напряженности квазиволнового поля вдоль срединной линии в 1,41 раз превышает модуль вектора напряженности одиночного провода при прочих равных условиях.
8. Скорость углового вращения вектора напряженности квазиволнового поля в полюсах изофаз в течение периода равномерная. Неравномерность скорости вращения возрастает по мере приближения точки наблюдения поля к плоскости проводов.
9. Источниками квазиволновых полей являются токи заземленных проводов, изолированных от земли петель, мобильных рамок небольших размеров.

Глава 5. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ МТА В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

5.1. Навигационные параметры и алгоритмы

Индукционные методы позволяют программировать плановую траекторию геометрическим местом точек, напряженность магнитного поля которых удовлетворяет заданному условию. При этом фактическое положение относительно планового определяется по разности между плановым и измеренным либо вычисленным значениями навигационного параметра магнитного поля.

Индукционные навигационные параметры можно разделить на 3 уровня: а) измеряемые; б) первичные; в) вторичные.

Измеряемым навигационным параметром переменного магнитного поля является проекция вектора напряженности на нормаль к плоскости витков индукционного преобразователя, т.е. на его аксиальную ось.

В качестве первичных навигационных параметров магнитного поля могут использоваться:

- модуль вектора напряженности магнитного поля;
- проекция вектора напряженности на заданное направление;
- модуль проекции вектора напряженности на заданное направление.

Навигационное устройство местоопределения вычисляет значения первичных параметров магнитного поля в одной или нескольких точках пространства, и значение вторичного навигационного параметра, который характеризует направляющую линию, используемую для местоопределения МТА. При этом плановое значение вторичного навигационного параметра может быть постоянным для всех проходов МТА, постоянным в пределах одного гона, но изменяться от прохода к проходу, либо изменяться в зависимости от номера прохода и расстояния до поворотных полос.

Вторичные навигационные параметры программируют плановую траекторию МТА – сигнал траекторного рассогласования δ формируется как разность между фактическим и плановым значениями вторичного навигационного параметра:

$$\delta = p_{2ф} - p_{2пл}.$$

Качество местоопределения МТА индукционными методами зависит от многих факторов, в том числе от:

- типа индуктора (источника навигационного магнитного поля);
- алгоритма вычисления вторичного навигационного параметра;
- количества точек измерения напряженного магнитного поля;
- количества используемых частот магнитного поля;
- измеряемой координаты МТА;
- способа задания плановой траектории МТА, и др.

С учетом возможных комбинаций перечисленных факторов, общее количество индукционных методов и их вариантов достигает многих сотен; в настоящей работе рассматриваются лишь основные из них.

В зависимости от значения $p_{2пл}$, индукционные методы местоопределения МТА разделяются на 2 группы:

- дифференциальные, для которых $p_{2пл} = 0$;
- дальномерные, для которых $p_{2пл} \neq 0$.

Дифференциальные методы основаны на формировании сигнала траекторного рассогласования непосредственно по фактическому значению вторичного навигационного параметра, равного разности двух первичных:

$$\delta = p_{2ф} = p_1 - p_2, \quad (5.1)$$

В общем случае первичные навигационные параметры магнитного поля измеряются в двух точках МТА, на расстоянии $2a$ друг от друга, рисунок 5.1.

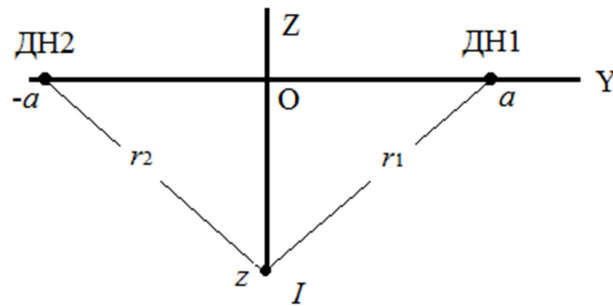


Рисунок 5.1. Расположение датчиков напряженности ДН1 и ДН2 разностно-амплитудных УМО относительно проводника I

Измерительная система координат $OXYZ$ может быть привязана либо к МТА, как на рисунке 5.1, либо к проводнику – выбор привязки определяется удобством вычислений, и не влияет на их результат. Структурная схема УМО МТА, реализующих алгоритм (5.1), приведена на рисунок 5.2, где обозначено: ИМП – источник магнитного поля (индуктор); ДН + ДН2 – магнито-приемник, состоящий из 2-х датчиков напряженности, выполненных в виде индукционных преобразователей с устройствами предварительной обработки выходных сигналов. Количество индукционных преобразователей в составе каждого датчика определяется алгоритмом местоопределения.

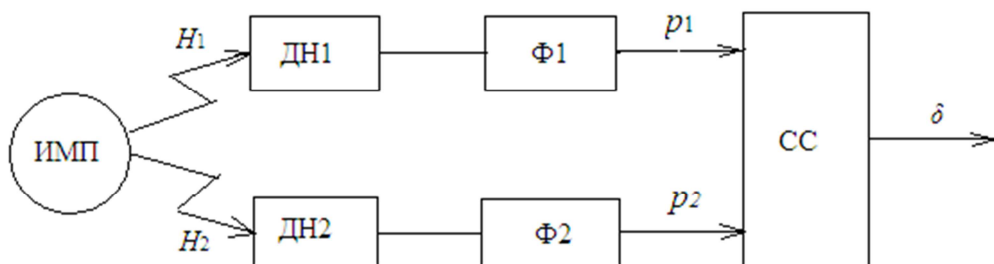


Рисунок 5.2. Структурная схема разностно-амплитудных УМО (ИМП – источник магнитного поля; ДН1, ДН2 – датчики напряженности; Ф1, Ф2 – формирователи первичных навигационных параметров; СС – схема сравнения первичных навигационных параметров)

5.2. Местоопределение по модулю вектора напряженности

5.2.1. Алгоритм местоопределения

Алгоритм местоопределения по модулю вектора напряженности:

$$\delta = H_1 - H_2.$$

Для математического описания метода расположим прямоугольную систему координат OXYZ на тракторе, совместив ось OX с продольной осью трактора и направив ось OZ вертикально вниз. Сигнал траекторного рассогласования определяется выходными сигналами датчиков напряженности, расположенных на концах отрезка $2a$, параллельного поперечной оси трактора и называемого ниже «измерительной базой». При полной симметрии левого и правого датчиком репер МТА располагается посередине базы, то есть совпадает с началом измерительной системы координат. Другими словами, репером МТА является геометрический и магнитный центр магнито-приемника.

Измеряемые значения модулей векторов напряженности:

$$H_1 = \frac{1}{r_1} = \frac{1}{\sqrt{(a+y)^2 + z^2}}; \quad H_2 = \frac{1}{r_2} = \frac{1}{\sqrt{(a-y)^2 + z^2}}.$$

Алгоритм местоопределения, выраженный через геометрические координаты места нахождения проводника, создающего навигационное магнитное поле, в подвижной системе координат OXYZ, связанной с МТА:

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

где y – боковое смещение продольной оси трактора относительно вертикальной плоскости, совмещенной с токоведущим проводником.

5.2.2. Чувствительность устройств местоопределения

Устройства местоопределения МТА характеризуются статической и динамической чувствительностями. Статическая чувствительность:

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

Динамическая чувствительность равна отношению приращения сигнала рассогласования δ к вызвавшему его приращению координаты y :

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

Начальные значения (при $y = 0$) статической и динамической чувствительности равны между собой:

$$K_{(0)} = \frac{2a}{\sqrt{a^2 + z^2}^3}$$

Чувствительность УМО зависит от длины базы $2a$, рисунок 5.3.

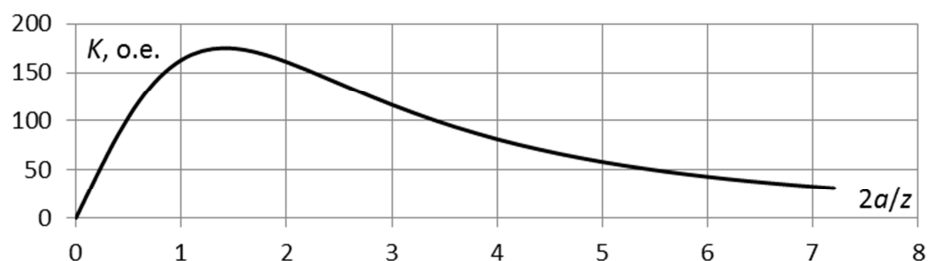


Рисунок 5.3. Зависимость начальной чувствительности УМО от длины измерительной базы $2a$, приведенной к координате z

Максимальному значению начальной чувствительности соответствует условие:

$$\frac{dK_{\text{дин}}}{da} = 0,$$

откуда оптимальная длина базы $2a$, соответствующая максимальной начальной чувствительности: $2a_{\text{опт}} = z\sqrt{2}$.

Статическая чувствительность УМО положительная, динамическая – знакопеременная. Отрицательным значениям статической чувствительности соответствует неустойчивое положение МТА и потеря работоспособности системой траекторного управления. Отрицательным значениям динамической чувствительности соответствует снижение сигнала траекторного рассогласования δ при увеличении траекторного рассогласования y , рисунок 5.4.

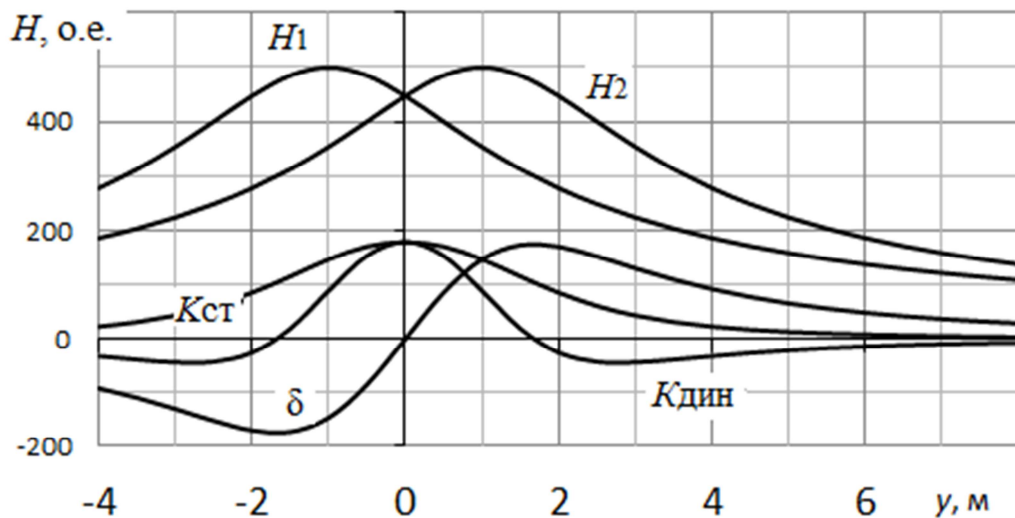


Рисунок 5.4 Параметры УМО при $2a = z = 2$ м

Диапазон положительных значений динамической чувствительности условно можно принять за минимальную ширину рабочей зоны системы траекторного управления. Реальная ширина в 2-3 раза больше, что определяется

структурой автоматического регулятора траекторного управления. Так, если регулятор формирует максимальный управляющий сигнал при $\delta = 0,5\delta_{\max}$, то ширина рабочей зоны системы траекторного управления, параметры УМО которой показаны на рисунке 5.4, превысит ± 4 м.

Расчет показывает, что увеличение базы с 2-х до 6 м снижает начальную чувствительность примерно на 30%, а ширину рабочей зоны и δ_{\max} увеличивает примерно в 2 раза, рисунок 5.5.

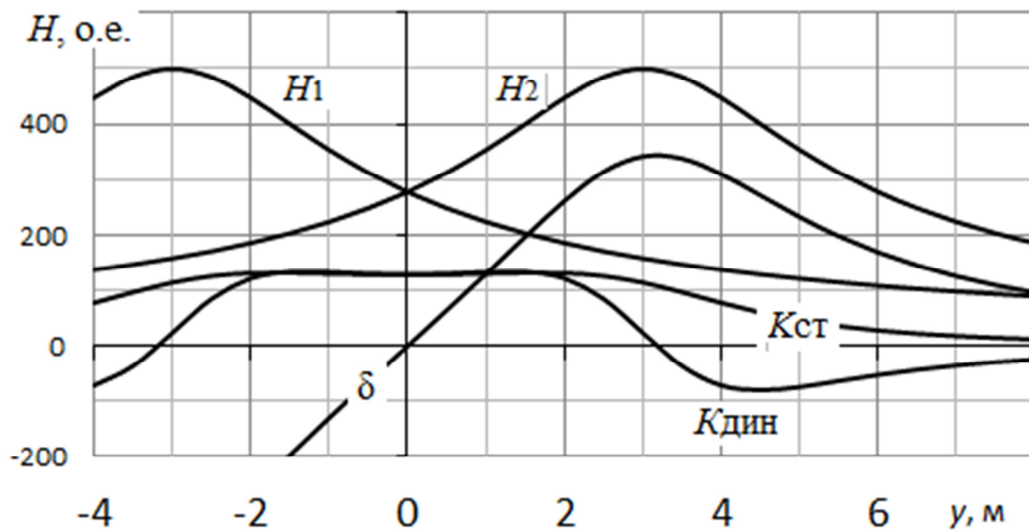


Рисунок 5.5. Параметры УМО при $2a = 6$ м, $z = 2$ м.

Наблюдаемая при $2a = 6$ м стабильность статической и динамической чувствительности в диапазоне $y = \pm 2$ м позволяет корректировать фактическую траекторию МТА относительно плановой в диапазоне более $\pm 1,0$ м; корректировка осуществляется добавлением в алгоритм местоопределения постоянной составляющей, равной сигналу траекторного рассогласования в месте требуемого положения МТА. Алгоритм местоопределения:

$$\delta = H_1 - H_2 + C,$$

где $C = \text{const}$ – сигнал корректировки величины бокового смещения МТА относительно токоведущего проводника.

5.2.3. Помехоустойчивость УМО по модулю вектора напряженности

Индукционные УМО подвержены воздействию различных помех:

- ориентационных, вызываемых изменениями пространственной ориентации осей трактора;
- внешних электромагнитных, вызываемых работой электрооборудования трактора, линий электропередач и других технических средств, грозowymi разрядами;
- вибрационно-акустических, вызываемых изменением пространственной ориентации индукционных преобразователей в магнитном поле Земли под действием вибраций трактора и акустических шумов;
- приборных, вызываемых нестабильностью параметров источника магнитного поля и УМО;
- индукционных, создаваемых токами индукции в проводящих телах, в том числе - в земле;
- ферромагнитных, обусловленных искажениями навигационного магнитного поля близлежащими ферромагнитными телами, и др.

Детальный анализ помех и методов борьбы с ними выходит за рамки настоящей работы; здесь кратко рассматриваются лишь некоторые из них.

5.2.3.1. Влияние мультипликативной погрешности

Мультипликативная погрешность обусловлена различием коэффициентов передачи K_1 и K_2 датчиков напряженности, каналов обработки и

сравнения напряженностей. Если отношение $K_2/K_1 = C \neq 1$, то фактический алгоритм местоопределения принимает вид:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{(y+a)^2 + z^2}} - \frac{C}{\sqrt{(y-a)^2 + z^2}}. \quad (5.2)$$

Геометрическому месту возможных положений МТА соответствует $\delta = 0$. Приравняв (5.2) к нулю, после преобразования получим уравнение линии возможного положения МТА:

$$y^2 - 2ay \frac{C^2 + 1}{C^2 - 1} + (a^2 + z^2) = 0.$$

Откуда зависимость бокового смещения МТА от C :

$$y = a \frac{C^2 + 1}{C^2 - 1} \pm \sqrt{a^2 \left(\frac{C^2 + 1}{C^2 - 1} \right)^2 - (a^2 + z^2)}.$$

На рисунке 5.6 приведен график зависимости y от длины базы $2a$ при $C = 0,98$ и $z = 2$ м. График показывает, что минимальная погрешность соответствует длине базы 4 м, что в 2 раза больше высоты z ; уменьшение длины базы до 2 м увеличит погрешность на 25%.

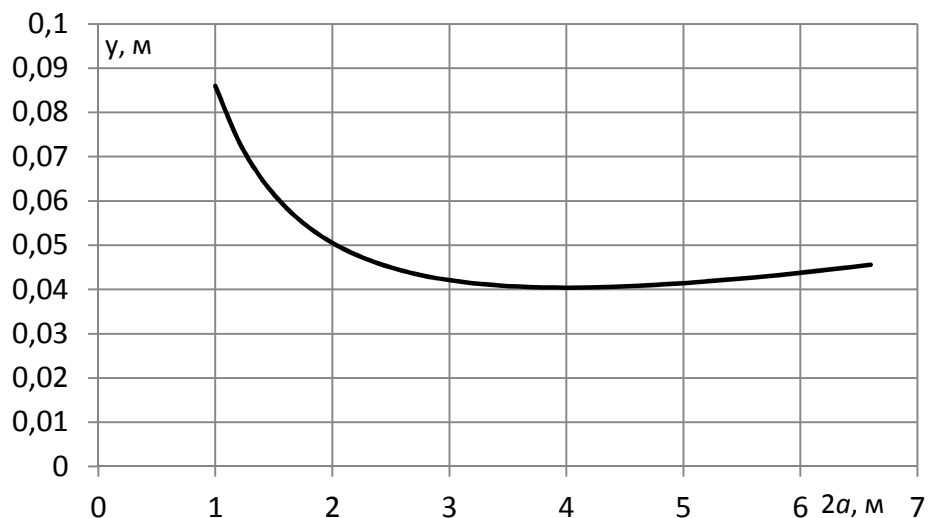


Рисунок 5.6. Зависимость бокового смещения МТА от длины измерительной базы $2a$ при $z = 2$ м и $C = 0,98$

Зависимость погрешности местоопределения от небаланса каналов измерения напряженности практически линейная – увеличение небаланса до 5% увеличивает погрешность в 2,5 раза.

Зависимость бокового смещения от высоты z при $2a = 4$ м и $C = 0,98$ приведена в таблице 5.1.

Табл.5.1. Зависимость погрешности местоопределения от высоты z при $2a = 4$ м, $C = 0,98$

z , м	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3
y , см	3,5	3,7	3,8	4	4,2	4,5	4,7

5.2.3.2. Влияние аддитивной погрешности

При дрейфе нуля схемы сравнения на величину $C = \text{const}$ фактический алгоритм местоопределения принимает вид:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{(a \pm y)^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(a \mp y)^2 + z^2}} \pm C. \quad (5.3)$$

Влияние дрейфа нуля $C = \Delta\delta$ на погрешность местоопределения МТА зависит от статической чувствительности в месте нахождения УМО, так как линейная величина погрешности Δy равна:

$$\Delta y = \frac{C}{K_{\text{ст}}}.$$

При одновременном наличии аддитивной и мультипликативной погрешностей их влияние суммируется с учетом знаков. Поэтому влияние мультипликативной погрешности можно компенсировать аддитивной со-

ставляющей противоположного знака, и наоборот. Это удобно делать при большой длине базы $2a$, когда чувствительность практически постоянная в широком диапазоне изменения координаты y (см. рис. 5.5).

5.2.3.3. Влияние нестабильности тока индуктора

Нестабильность тока источника напряженности магнитного поля и вызываемое этим изменение выходных напряжений индукционных преобразователей не оказывает влияния на равновесное (начальное) положение МТА, но приводит к пропорциональному изменению чувствительности УМО. При наличии аддитивной составляющей $C \neq 0$ нестабильность тока смещает начальное положение МТА.

5.2.3.4. Влияние крена трактора

Крен трактора смещает измерительную базу $2a$ в сторону крена на расстояние, пропорциональное углу крена и высоте расположения базы $2a$ над земной поверхностью.

Причиной крена является изменение высоты одного из движителей трактора. При этом центр вращения базы $2a$ находится в месте контакта второго движителя с почвой, т. е. на поверхности земли. Поэтому ось OZ подвижной системы координат сместится относительно провода в сторону, противоположную крену, на расстояние, пропорциональное углу крена и глубине прокладки провода под землей, рисунок 5.7.

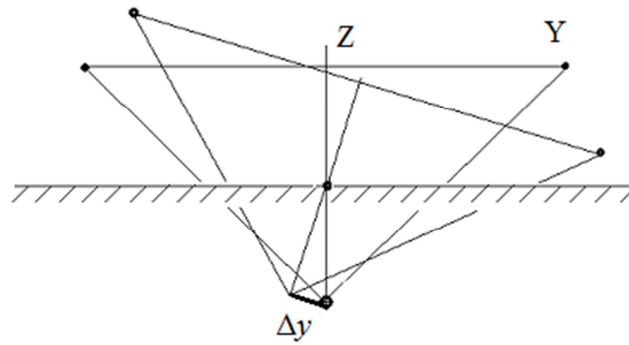


Рисунок 5.7. Влияние крена МТА на погрешность местоопределения

Так, если глубина заложения провода 1 м, то крен 3° вправо вызовет такой же сигнал рассогласования, как и линейное отклонение трактора влево на 0,05 м. Эта величина зависит от глубины прокладки провода и угла крена, и не зависит от высоты магнитоприемника над земной поверхностью.

5.2.3.5. Влияние галопирования трактора

Галопирование («тангаж») наблюдается при одновременном переезде движителей трактора, например, через свальные или развальные борозды. В отличие от крена, который может наблюдаться длительное время, галопирование носит кратковременный характер и изменяет значение координаты z , оказывая незначительное влияние на чувствительность УМО. Длительное изменение высоты датчиков над земной поверхностью возможно, например, при изменении давления в шинах колесных тракторов.

5.2.3.6. Влияние рыскания трактора

Рыскание трактора – следствие недостаточной устойчивости системы автоматического тракторного управления. Режим автоколебаний в системе

траекторного управления недопустимый и должен устраняться соответствующей настройкой автоматического регулятора траекторного управления. Само по себе изменение курсового угла свидетельствует о предстоящем изменении бокового смещения МТА, и может быть использовано для упреждения нежелательного изменения.

5.2.3.7. Влияние типа источника навигационного магнитного поля

Тип индуктора оказывает влияние на симметричность магнитного поля в вертикальной плоскости XOZ , в которой находится проводник с током, то есть на зависимость плановой траектории от координаты z .

Пусть $2a = 3,1$ м и магнитное поле создается током длинной узкой петли; параметры поля приведены на рис. 2.20. Тогда, согласно разделу 2.9, нулевому сигналу траекторного рассогласования будет соответствовать расположение одного датчика модуля вектора напряженности в точке с координатой $y = 8,1$ м, а второго – в точке с координатой $11,2$ м. При этом середина базы $2a$, т.е. реперная точка МТА, окажется смещенной внутрь петли на $\Delta y = 0,35$ м.

В магнитном поле широкой петли влияние составляющей удаленного провода менее значительное, но возрастает влияние поперечных перемычек, по мере приближения к которым плоскость симметрии магнитного поля и траектория МТА смещается внутрь петли. Зависимость величины смещения от координат $(x; z)$ и базы $2a$ можно определить, расположив начало системы координат в углу длинной и широкой петли, и совместив ось OX с гоновым проводом. Тогда для точки с координатами $(x, a+y, z)$ внутри угла, где расположен внутренний датчик напряженности, модуль вектора напряженности, создаваемой током гонового провода и перемычки:

$$H_{\text{вг}} = \frac{1}{2\sqrt{(y+a)^2 + z^2}} \left(1 + \frac{x}{\sqrt{x^2 + (a+y)^2 + z^2}} \right);$$

$$H_{\text{вп}} = \frac{1}{2\sqrt{x^2 + z^2}} \left(1 + \frac{a + y}{\sqrt{x^2 + (a + y)^2 + z^2}} \right).$$

Аналогично для наружного датчика напряженности:

$$H_{\text{нг}} = \frac{1}{2\sqrt{(a - y)^2 + z^2}} \left(1 + \frac{x}{\sqrt{x^2 + (a - y)^2 + z^2}} \right);$$

$$H_{\text{нп}} = \frac{1}{2\sqrt{x^2 + z^2}} \left(1 - \frac{a - y}{\sqrt{x^2 + (a - y)^2 + z^2}} \right).$$

Определить суммарную напряженность в местах нахождения датчиков напряженности внутри петли можно по величине проекций на оси системы координат OXYZ:

$$H_{\text{BZ}} = H_{\text{вг}} \frac{a + y}{(a + y)^2 + z^2} + H_{\text{вп}} \frac{x}{x^2 + z^2}; \quad H_{\text{By}} = H_{\text{вг}} \frac{z}{(a + y)^2 + z^2};$$

$$H_{\text{Bx}} = H_{\text{вп}} \frac{z}{x^2 + z^2}; \quad H_{\text{B}\Sigma} = \sqrt{H_{\text{BZ}}^2 + H_{\text{By}}^2 + H_{\text{Bx}}^2}.$$

Аналогично для наружного датчика напряженности:

$$H_{\text{HZ}} = H_{\text{нг}} \frac{a - y}{(a - y)^2 + z^2} - H_{\text{нп}} \frac{x}{x^2 + z^2}; \quad H_{\text{Hy}} = H_{\text{нг}} \frac{z}{(a - y)^2 + z^2};$$

$$H_{\text{Hx}} = H_{\text{нг}} \frac{z}{x^2 + z^2}; \quad H_{\text{H}\Sigma} = \sqrt{H_{\text{HZ}}^2 + H_{\text{Hy}}^2 + H_{\text{Hx}}^2}.$$

Смещение программы плановой траектории («направляющей линии») определяется значениями координаты y , удовлетворяющими условию:

$$\delta = H_{B\Sigma} - H_{H\Sigma} = 0.$$

В качестве примера в таблице 5.2 приведена зависимость бокового смещения плановой траектории МТА от расстояния до угла широкой прямоугольной петли при местоопределении по модулю вектора напряженности, $a = z = 2$ м.

Табл. 5.2. Зависимость бокового смещения плановой траектории от расстояния до конца широкой прямоугольной петли при $2a = 4$ м, $z = 2$ м

x , м	100	50	45	40	35	30	20	20	15	10	5	4	3	2
Δy , см	0,1	0,2	0,3	0,44	0,55	0,81	1,45	1,6	3	7,7	20,7	30,5	48,6	82

Зависимость бокового смещения плановой траектории от координаты z отсутствует, если навигационное магнитное поле симметрично относительно вертикальной плоскости. Таким свойством обладают поля, создаваемые токами:

1. заземленного провода;
2. двух заземленных проводов с равными синфазными токами;
3. двух заземленных проводов с равными противофазными токами;
4. двух соприкасающихся петель с противофазными токами (рис. 2.24б);
5. двух разнесенных петель (рис. 2.24а) с синфазными токами;
6. двух разнесенных петель (рис. 2.24а) с противофазными токами.

Варианты 4, 5 и 6 обеспечивают создание вертикальной плоскости симметрии, если петли одинакового размера, а токи одинаковой силы. Если же токи не равны, то вертикальная поверхность симметрии изгибается по длине гона и по высоте, и смещается относительно срединной линии в сторону меньшего тока.

Наибольший практический интерес представляет вариант 4, обеспечивающий однонаправленные токи в соприкасающихся сторонах обеих петель. Если петли одинаковые и токи равны, то над общей стороной происходит

полная компенсация магнитных полей, создаваемых обратными токами перемычек и удаленных сторон, а распределение напряженности над общей стороной подчиняется закону Био-Савара-Лапласа (2.9).

5.2.4. Местоопределение относительно срединной линии 2-х проводников с синфазными токами

Магнитное поле одиночного проводника симметрично относительно вертикальной плоскости XOZ , в которой лежит проводник. Суммарное магнитное поле, создаваемое одинаковыми токами двух проводов, симметрично относительно срединной вертикальной плоскости, точки которой равноудалены от обоих проводов. Эту плоскость можно использовать в качестве направляющей при определении местоположения МТА относительно неё по разности модулей напряженностей, измеряемых с двух сторон от плоскости, рисунок 5.8.

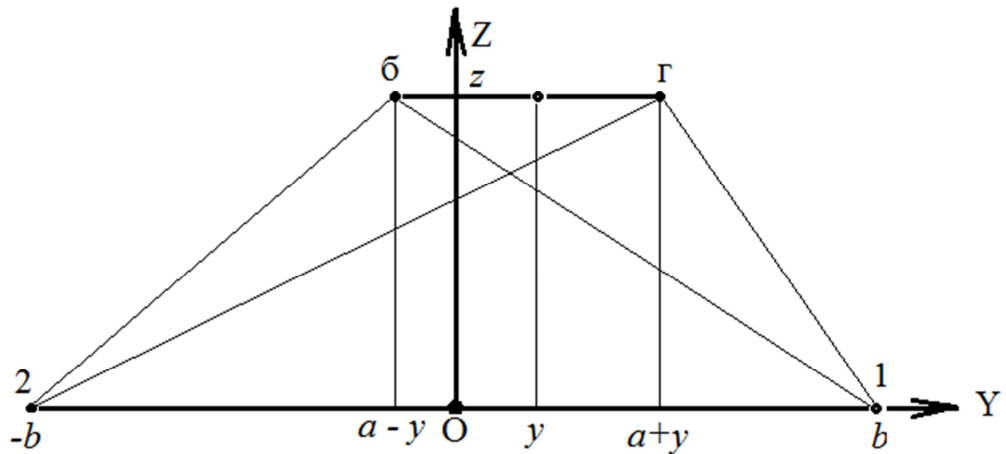


Рисунок 5.8. Положение измерительной базы «б-г» относительно токоведущих проводов 1 и 2

Пусть расстояние между смежными бесконечно длинными проводами $2b$, ось OX системы координат проходит посередине между ними. Тогда

напряженность суммарного магнитного поля синфазных проводов в точке с координатами $(y; z)$:

$$H_z = \frac{b - y}{(b - y)^2 + z^2} - \frac{b + y}{(b + y)^2 + z^2};$$

$$H_y = \frac{z}{(b - y)^2 + z^2} + \frac{z}{(b + y)^2 + z^2};$$

$$H = \sqrt{H_z^2 + H_y^2}.$$

На рисунке 5.9 показано распределение напряженности H между двумя синфазными проводами при $2b = 10$ м, $z = 2$ м, зависимость сигнала траекторного рассогласования и статической чувствительности от бокового смещения магнитоприемника при $2a = 4$ м.

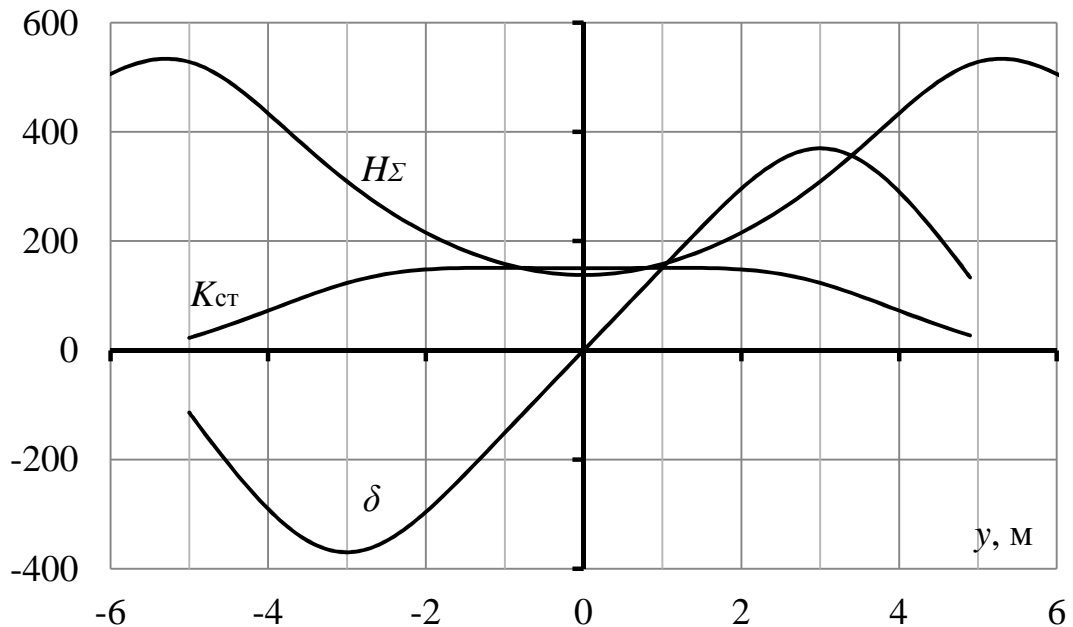


Рисунок 5.9. Параметры местоопределения МТА по модулю вектора напряженности относительной срединной линии синфазных токов при $2b = 10$ м, $z = 2$ м, $2a = 4$ м

Важным параметром индукционных методов местоопределения является помехоустойчивость соответствующих УМО МТА к крену трактора. Наиболее просто этот параметр можно определить числовым методом, по зависимости сигнала траекторного рассогласования от угла крена и линейного рассогласования магнитоприемника, рисунок 5.10.

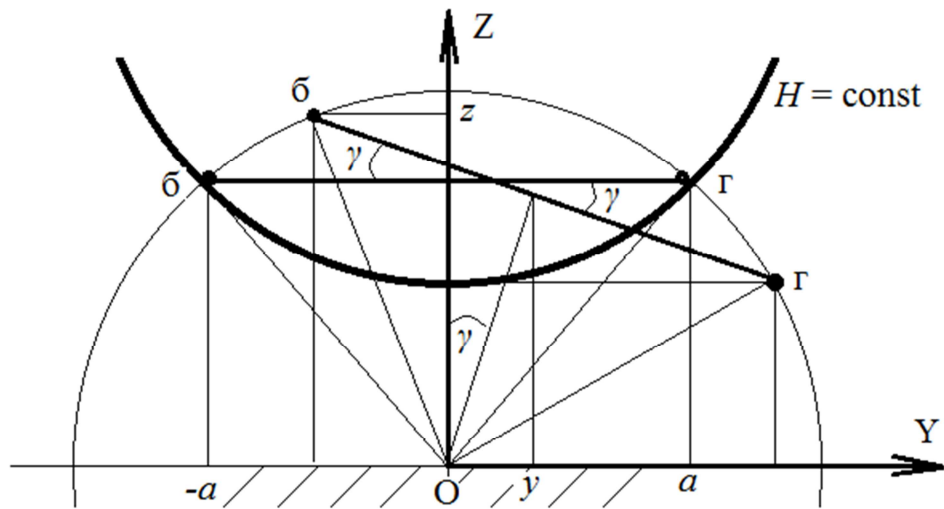


Рисунок 5.10. Положение магнитоприемника «б-г» относительно срединной плоскости XOZ при крене трактора на угол γ

В таблице 5.3. приведены результаты расчета влияния крена магнитоприемника на его боковое смещение при местоопределении дифференциальным методом по модулю вектора напряженности, расстоянии между проводами $2b = 10$ м, $z = 2$ м, $2a = 4$ м.

Табл. 5.3. Влияние крена на погрешность местоопределения разностно-амплитудным методом по модулю вектора напряженности относительно срединной плоскости при $2b = 10$ м, $z = 2$ м, $2a = 4$ м.

γ , град	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
y , см	-8,5	-7	-5,7	-4,3	-3	-1,4	0	1,4	3	4,3	5,7	7	8,5

5.2.5. Местоопределение относительно срединной линии 2-х проводников с противофазными токами

Как было показано в разделе 2.9, при противофазных токах магнитное поле более равномерное, чем при синфазных. Поэтому чувствительность соответствующих устройств к боковому смещению трактора будет ниже, чем при питании проводов синфазными токами.

5.2.6. Двухчастотный метод местоопределения относительно срединной линии

Навигационное магнитное поле, симметричное срединной плоскости, можно создать, питая смежные провода токами разной частоты. Такой метод обладает более широкими потенциальными возможностями по сравнению с одночастотным, так как позволяет отдельно измерять обе напряженности, а также уменьшить длину измерительной базы $2a$ магнитоприемника вплоть до нулевого значения.

5.3. Местоопределение по квадрату модуля напряженности

Модуль вектора напряженности можно вычислить как корень квадратный из суммы квадратов проекций вектора на три взаимно-перпендикулярные направления. Начальное положение МТА не изменится, если сравнивать квадраты модулей векторов напряженности. Тогда алгоритм местоопределения принимает вид:

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

Разность квадратов можно разложить на сомножители:

$$\delta^{(2)} = H_1^2 - H_2^2 = (H_1 - H_2)(H_1 + H_2) = \delta(H_1 + H_2).$$

Таким образом, сигнал рассогласования, сформированный как разность квадратов модулей векторов напряженности, превышает разностно-амплитудный в (H_1+H_2) раз. Если принять, что $H_1+H_2 \approx \text{const}$, можно ограничиться вычислением и сравнением квадратов модулей напряженностей, что позволит уменьшить последующее усиление разностного сигнала. В остальном качество местоопределения существенно не изменится.

5.4. Местоопределение по проекции вектора напряженности на поперечную ось трактора

5.4.1. Местоопределение при движении над проводом

Местоопределение по модулю вектора напряженности требует выполнения математических операций возведения в степень измеренных значений проекций вектора напряженности. Однако, как следует из рисунка 2.10,

распределение модуля вектора напряженности вблизи проводника с током близко к распределению проекции вектора напряженности на поперечную ось. Это позволяет формировать сигнал траекторного рассогласования непосредственно по разности двух измеряемых навигационных параметров – проекций векторов напряженности на поперечную ось трактора, что технически проще в реализации.

Алгоритм местоопределения по проекции вектора напряженности на поперечную ось трактора:

$$\delta = H_{y1} - H_{y2} = \frac{z}{z^2 + (a + y)^2} - \frac{z}{z^2 + (a - y)^2}.$$

Динамическая чувствительность УМО:

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

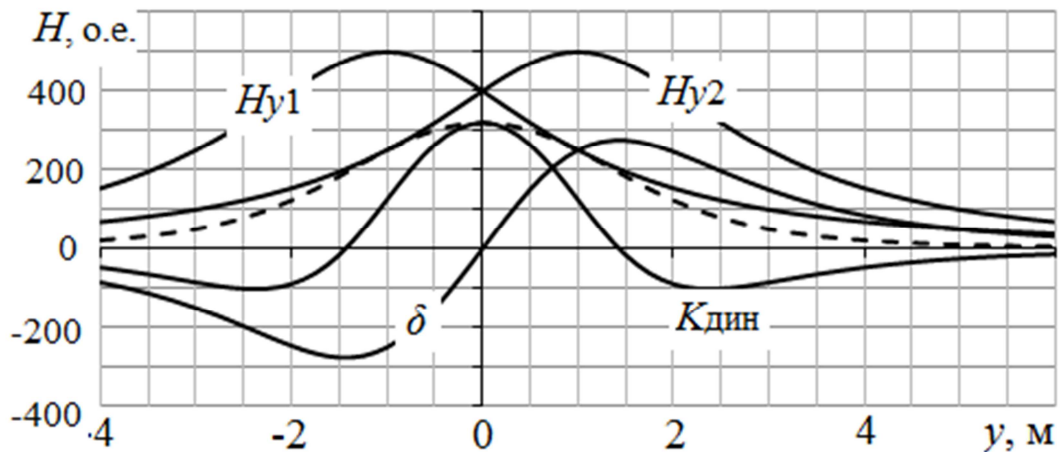


Рисунок 5.11. Параметры УМО по проекции вектора напряженности на поперечную ось трактора при $z = 2a = 2\text{ м}$

(Пунктиром обозначен график статической чувствительности)

На рисунке 5.11 показана зависимость от y при $z = 2a = 2$ м:

- проекций H_{y1} и H_{y2} вектора напряженности;
- сигнала траекторного рассогласования δ ;
- динамической чувствительности $K_{\text{дин}}$.
- статической чувствительности $K_{\text{ст}}$.

Сравнение графиков чувствительности на рисунках 5.4 и 5.11 показывает, что чувствительность УМО по величине проекции вектора напряженности на поперечную ось трактора почти в 2 раза превышает чувствительность по величине вектора напряженности. Это объясняется тем, что при местоопределении по проекции вектора на поперечную ось трактора изменение координаты y изменяет не только модуль, но и угол наклона вектора напряженности. Различие в чувствительности УМО при местоопределении по модулю и по проекции вектора напряженности на поперечную ось трактора можно оценить по графикам на рисунке 2.13, где приведена зависимость градиентов H_y и H от y .

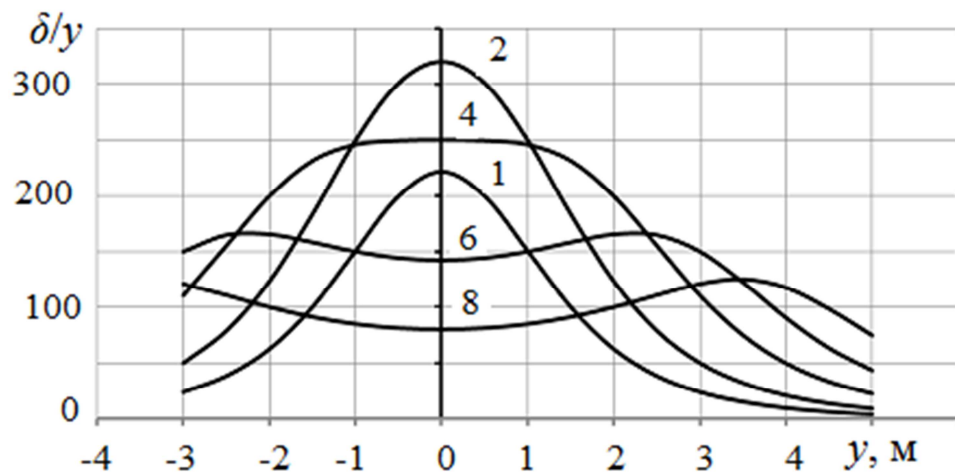


Рисунок 5.12. Зависимость чувствительности δ/y от рассогласования y и длины измерительной базы $2a$ (цифры над кривыми)

Зависимость статической чувствительности от величины рассогласования при различных значениях измерительной базы $2a$ показана на рисунке 5.12. Как видно, максимальная чувствительность наблюдается при $2a = z = 2$ м, но максимальная стабильность чувствительности в диапазоне $y = \pm 1$ м наблюдается при $2a = 4$ м.

Влияние крена, галопирования и рыскания при местоопределении по проекции вектора напряженности на поперечную ось трактора примерно такое же, как и при местоопределении по модулю вектора напряженности.

5.4.2. Местоопределение МТА между проводами

Алгоритм местоопределения при питании проводов синфазными (однаправленными) токами:

$$\delta = (H_{y1\Gamma} + H_{y2\Gamma}) - (H_{y1\delta} + H_{y2\delta}),$$

где $H_{y1\Gamma} + H_{y2\Gamma}$ – сумма проекций векторов напряженности, создаваемых токами первого и второго проводников на аксиальную ось первого ИП; $H_{y1\delta} + H_{y2\delta}$ – сумма проекций векторов напряженности, создаваемых токами первого и второго проводников на аксиальную ось второго ИП.

Пусть система координат связана с индуктором, а ось ОХ системы координат проходит посередине между синфазными проводами 1 – 2 индуктора. Тогда проекции векторов напряженности на оси индукционных преобразователей магнитоприемника (б-г), рисунок 5.8:

$$H_{y1\Gamma} = \frac{z}{(b - a - y)^2 + z^2}; \quad H_{y2\Gamma} = \frac{z}{(b + a + y)^2 + z^2};$$

$$H_{y2\delta} = \frac{z}{(b - a + y)^2 + z^2}; \quad H_{y1\delta} = \frac{z}{(b + a - y)^2 + z^2}.$$

Поэтому сигнал траекторного рассогласования:

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

Чувствительность устройств, определяющих местоположение магнитоприемника относительно срединной линии синфазных проводов по проекции векторов напряженности на поперечную ось трактора, описывается уравнением:

$$K = 2z \frac{b-y+a}{[(b-y+a)^2+z^2]^2} + 2z \frac{b+y+a}{[(b+y+a)^2+z^2]^2} - 2z \frac{b+y-a}{[(b+y-a)^2+z^2]^2} - 2z \frac{b-y-a}{[(b-y-a)^2+z^2]^2}$$

График H_y на рисунке 2.17 позволяет сделать вывод, что метод целесообразно применять при $2a \approx 2b - 2z$, так как при этом чувствительность максимальна.

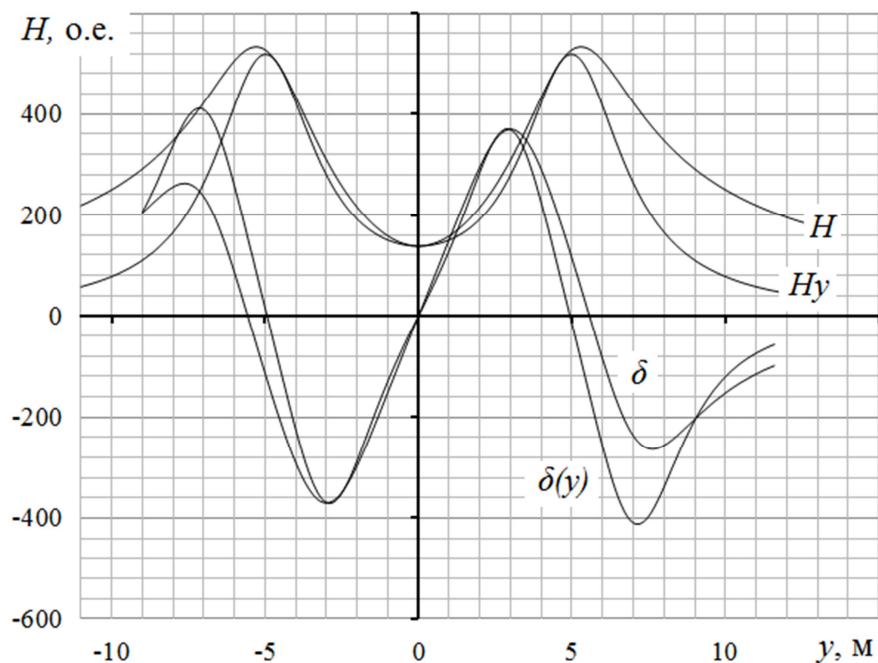


Рисунок 5.13. Сравнительные характеристики местоопределения по модулю и по проекции вектора напряженности на поперечную ось трактора

Для сравнения на рисунке 5.13 приведена зависимость модуля H и проекции H_y вектора напряженности, а также сигнала траекторного рассогласования δ и $\delta(y)$ от бокового смещения при местоопределении по модулю и по проекции вектора напряженности на поперечную ось трактора. Зависимости приведены при расстоянии между проводами $2b = 10$ м, измерительной базе $2a = 4$ м, высоте $z = 2$ м. Как видно, в пространстве между проводниками сигнал траекторного рассогласования в обоих случаях практически одинаковый.

Алгоритм местоопределения по проекции вектора на поперечную ось трактора при питании проводов противофазными (встречными) токами:

$$\delta = z \left(\frac{1}{(b+a+y)^2 + z^2} - \frac{1}{(b-a-y)^2 + z^2} - \frac{1}{(b-a+y)^2 + z^2} + \frac{1}{(b+a-y)^2 + z^2} \right).$$

5.5. Местоопределение МТА по проекции вектора напряженности на вертикальную ось

Алгоритм формирования сигнала траекторного рассогласования по разности проекций векторов напряженности на ось OZ системы координат:

$$\delta = H_{z1} - H_{z2} = \frac{y+a}{(y+a)^2 + z^2} - \frac{y-a}{(y-a)^2 + z^2}.$$

Зависимость проекции вектора напряженности на вертикальную ось от величины траекторного рассогласования y и длины базы $2a$ при $z = 2$ м показана на рисунке 5.14, где сплошными линиями обозначены графики для датчика напряженности ДН1, а пунктиром – для датчика ДН2.

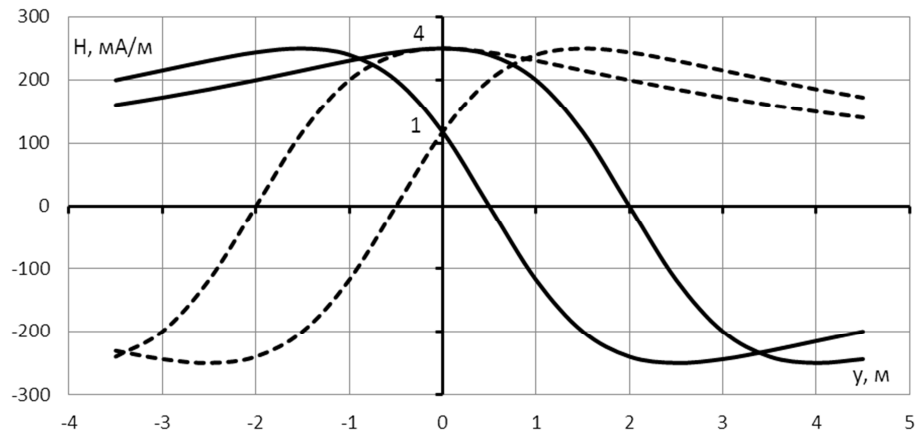


Рисунок 5.14. Зависимость H_z от y и $2a$ (цифры возле кривых) при $z = 2$ м

Зависимость сигнала траекторного рассогласования от длины измерительной базы $2a$ при $z = 2$ м приведена на рисунке 5.15.

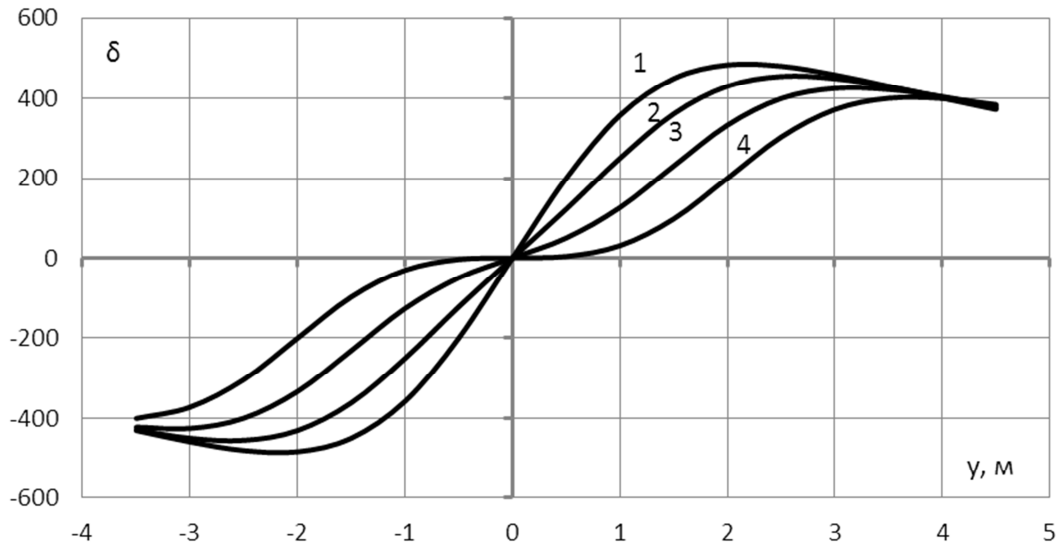


Рисунок 5.15. Зависимость сигнала траекторного рассогласования от рассогласования y и длины базы $2a$ (м; цифры возле кривых)

Влияние крена, галопирования и рыскания трактора на погрешность местоопределения МТА по проекции вектора напряженности на вертикальную ось практически такое же, как и по проекции на горизонтальную поперечную ось.

Динамическая чувствительность УМО:

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

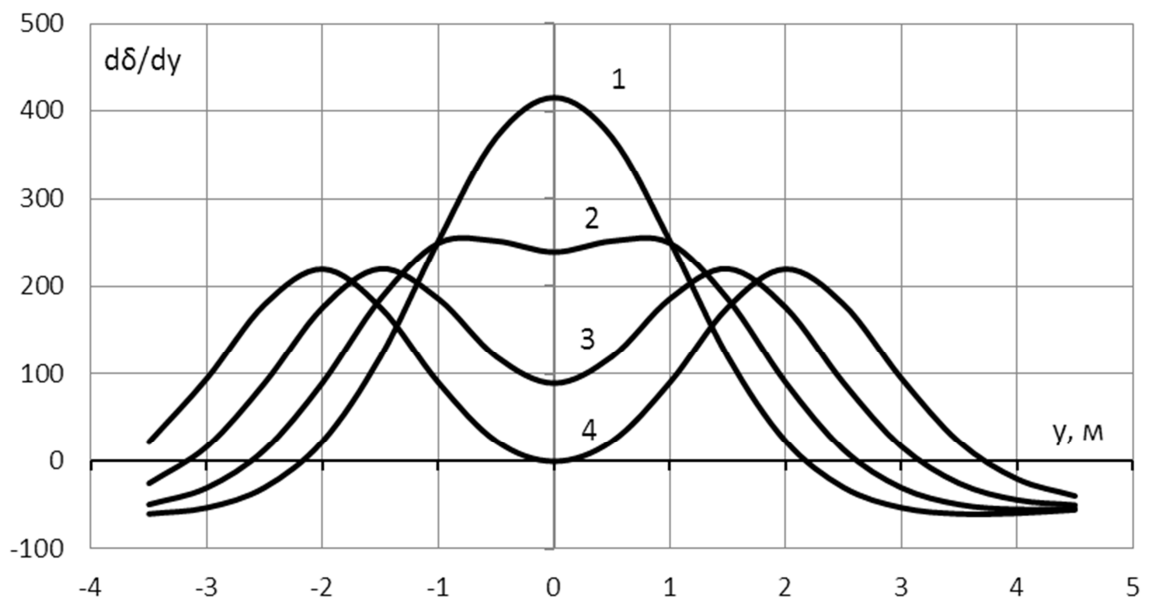


Рисунок 5.16. Зависимость динамической чувствительности УМО от координаты y и базы $2a$ (цифры над кривыми, м) при $z = 2$ м

Зависимость динамической чувствительности УМО от рассогласования y и длины измерительной базы $2a$ при $z = 2$ м приведена на рисунке 5.16. Как видно, если длина базы превышает координату z в два раза, то начальная чувствительность УМО снижается до нуля.

Метод может найти применение для местоопределения МТА в магнитном поле двух синфазных токов (см. рис. 2.17). Алгоритм местоопределения при этом:

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

5.6. Местоопределение по модулю проекции на вертикальную ось

Выше предполагалось, что проекции векторов сравниваются с учетом фазы. Более простым в реализации является формирование сигнала траекторного рассогласования δ по величине модулей проекций, то есть без учета фаз.

Зависимость модулей проекций векторов напряженности от траекторного рассогласования показана на рисунке 5.17.

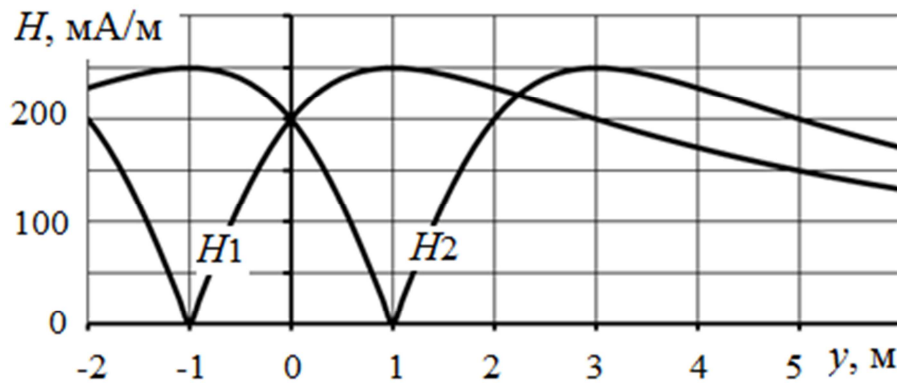


Рисунок 5.17. Зависимость модулей проекций векторов напряженности на вертикальную ось y при $z = 2a = 2$ м

При местоопределении по модулю проекций вектора напряженности на вертикальную ось алгоритм формирования сигнала траекторного рассогласования принимает вид:

$$\delta = |H_{z1}| - |H_{z2}| = \left| \frac{a + y}{(a + y)^2 + z^2} \right| - \left| \frac{a - y}{(a - y)^2 + z^2} \right|$$

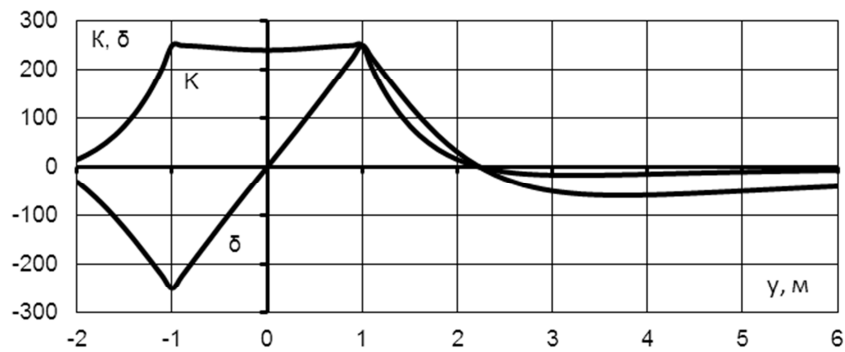


Рисунок 5.18. Чувствительность УМО по модулю проекции вектора напряженности на вертикальную ось при $2a = z = 2$ м

Зависимость сигнала траекторного рассогласования δ и статической чувствительности $K = \delta/y$ от y приведена на рисунке 5.18. Как видно, в диапазоне $-a \leq y \leq a$ этот метод обеспечивает такое же качество местоопределения, как и по проекции вектора напряженности. Но выход за указанные границы сопровождается резким снижением сигнала траекторного рассогласования и даже изменением его знака, что ограничивает ширину рабочей зоны длиной $2a$.

5.7. Местоопределение по модулю проекции вектора напряженности на поперечную ось

Алгоритм местоопределения:

$$\delta = |H_{y1}| - |H_{y2}| = \left| \frac{z}{(a+y)^2 + z^2} \right| - \left| \frac{z}{(a-y)^2 + z^2} \right|.$$

Так как фаза проекции вектора на поперечную ось трактора не меняется во всем диапазоне возможного изменения бокового смещения, то качество местоопределения по проекции и по модулю проекции вектора напря-

женности на поперечную ось одинаковое, различие только в схемных решениях УМО.

5.8. Местоопределение по проекции вектора напряженности на произвольное направление

В общем случае оси проекций могут занимать в плоскости ZOY промежуточное положение между вертикальным и горизонтальным – образовывать с этой плоскостью произвольные углы $\pm\gamma$, рисунок 5.19.

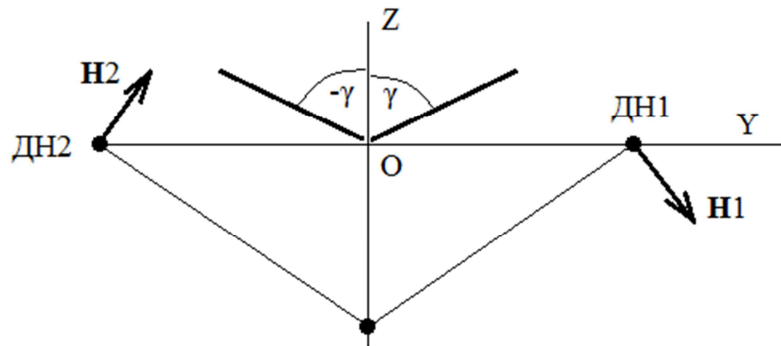


Рисунок 5.19. Разностно-амплитудный метод местоопределения по проекции вектора напряженности на направления $\pm\gamma$

Поскольку, согласно (2.14), $H_\gamma = H_z \cos\gamma + H_y \sin\gamma$, то сигнал траекторного рассогласования:

$$\delta = \frac{a+y}{(a+y)^2+z^2} \cos\gamma_1 + \frac{z}{(a+y)^2+z^2} \sin\gamma_1 - \frac{a-y}{(a-y)^2+z^2} \cos\gamma_2 - \frac{z}{(a-y)^2+z^2} \sin\gamma_2.$$

Зависимость сигнала δ при $2a = z = 2$ м от углов $\pm\gamma$ и координаты y приведена на рисунке 5.20.

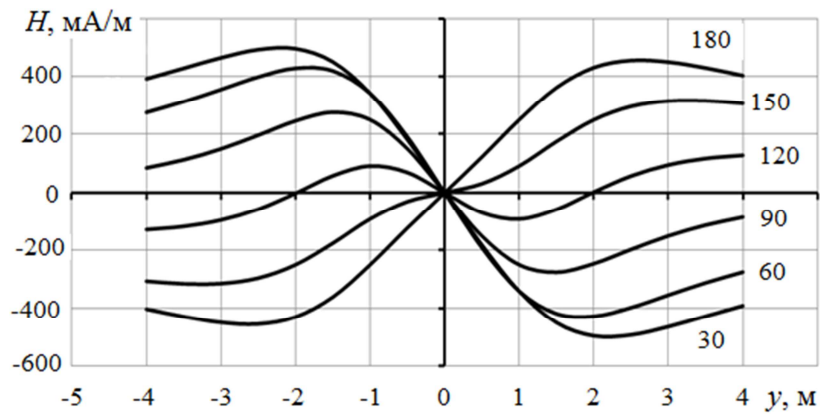


Рисунок 5.20. Зависимость сигнала траекторного рассогласования от бокового смещения при углах $\gamma = 30^\circ \dots 180^\circ$, $2a = 2$ м, $z = 2$ м

На рисунке 5.21 показана зависимость $\delta(y)$ при $z = 2$ м, $\gamma = 30^\circ$, значениях измерительной базы $2a = 0$ и $2a = 3$ м.

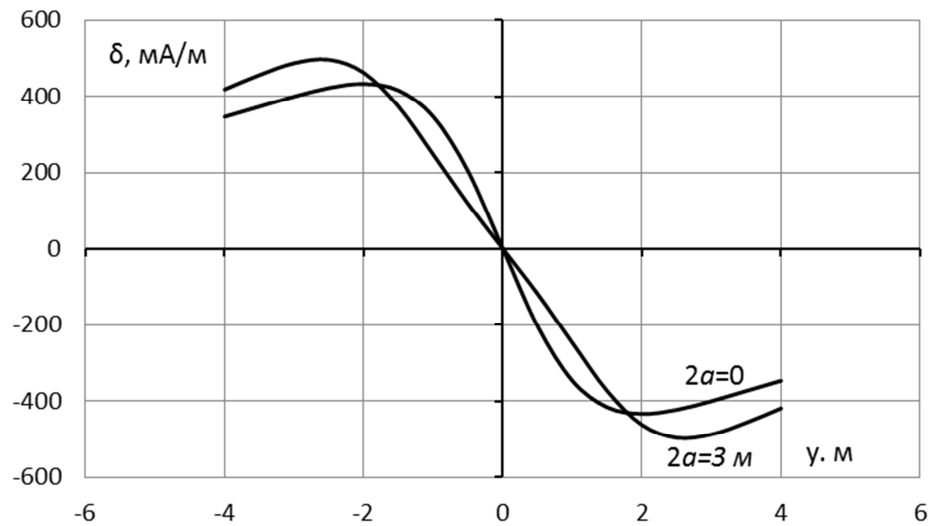


Рисунок 5.21. Зависимость δ от y при $z = 2$ м, $\gamma = 30^\circ$, $2a = 0$ и 3 м

5.9. Одноточечный разностно-амплитудный метод

Графики на рисунке 5.21 подтверждают возможность нулевой длины измерительной базы $2a$. При этом измеряются проекции одного и того же вектора на два направления, а плановая траектория МТА определяется не модулем, а направлением вектора напряженности, то есть магнитной силовой линией, которая проходит через индукционные преобразователи.

Алгоритм местоопределения одноточечным разностно-амплитудным методом:

$$\delta = H [\cos(\psi - \gamma_1) - \cos(\psi - \gamma_2)], \quad (5.4)$$

где ψ – угол между вектором напряженности и вертикалью;

γ_1 и γ_2 – углы между осями проекций и вертикалью.

Углы γ_1 и γ_2 являются конструктивными постоянными; угол ψ является функцией координат (y, z) индукционных преобразователей.

Для магнитного поля тока заземленного проводника:

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

Поэтому, согласно (2.14):

$$\delta = \frac{y}{z^2 + y^2} \cos \gamma_1 + \frac{z}{z^2 + y^2} \sin \gamma_1 - \frac{y}{z^2 + y^2} \cos \gamma_2 - \frac{z}{z^2 + y^2} \sin \gamma_2.$$

На рисунке 5.22 приведены выходные характеристики одноточечных разностно-амплитудных методов местоопределения в зависимости от величины угла проекций γ с учетом направления (фазы) проекций.

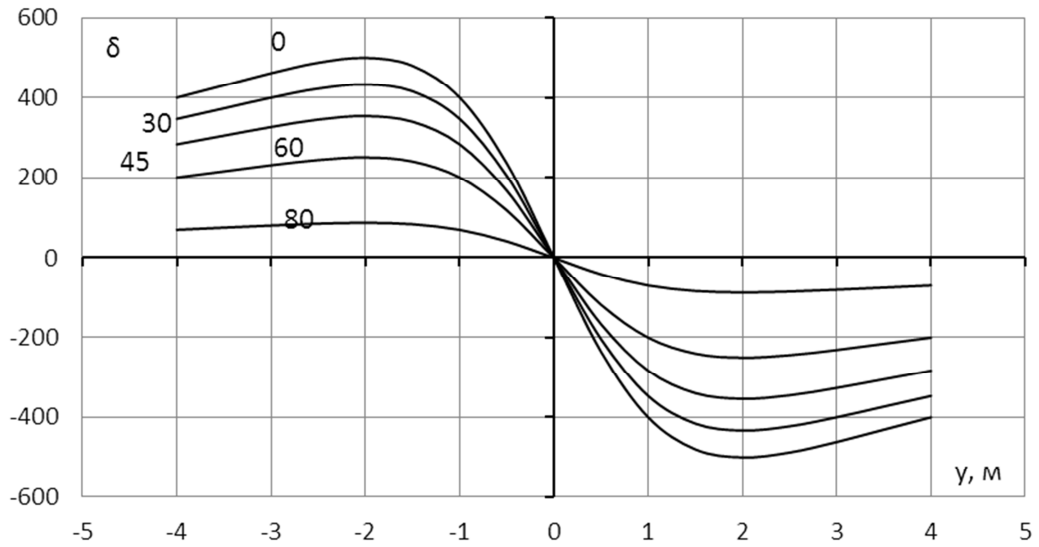


Рисунок 5.22. Выходные характеристики одноточечных ($2a = 0$) УМО МТА при $z = 2$ м и углах проекции $\gamma = 0 \dots 80^\circ$.

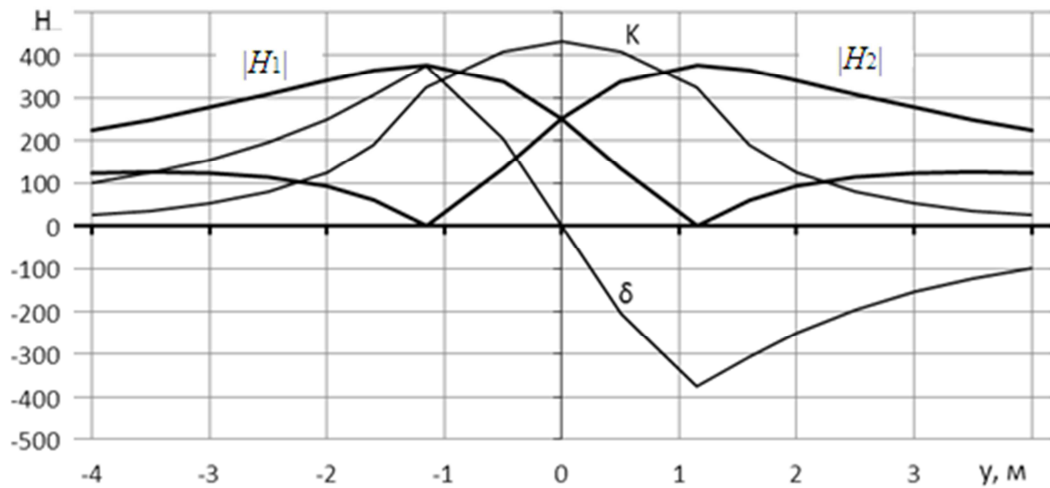


Рисунок 5.23. Параметры одноточечного УМО по модулю проекции вектора напряженности на направления $\gamma = \pm 30^\circ$ при $z = 2$ м

Характеристики УМО по модулю проекций вектора напряженности при $|\gamma| = 30^\circ$ приведены на рисунке 5.23. Как видно, при $y > |1,15|$ м происхо-

дит резкое уменьшение сигнала траекторного рассогласования δ и чувствительности $K = \delta/y$ вследствие возрастания вычитаемого. Увеличение угла $|\gamma|$ до 60° позволяет отодвинуть точку перегиба кривой $\delta(y)$ до $|y| = 2$ м, рисунок 5.24.

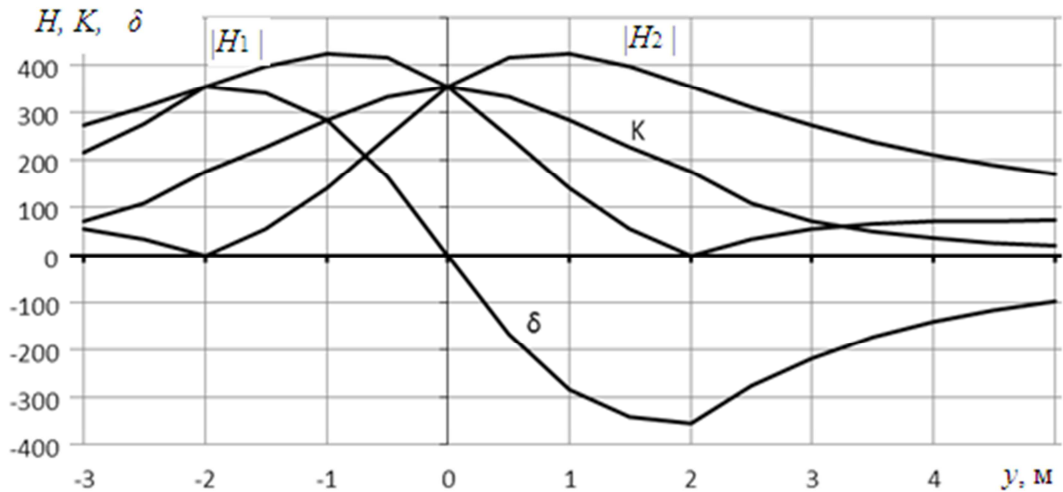


Рисунок 5.24. Параметры УМО при $|\gamma| = 60^\circ$, $z = 2$ м.

На рисунке 5.25 приведена зависимость начальной чувствительности одноточечных разностно-амплитудных УМО по проекции вектора напряженности от угла наклона оси проекции к вертикали.

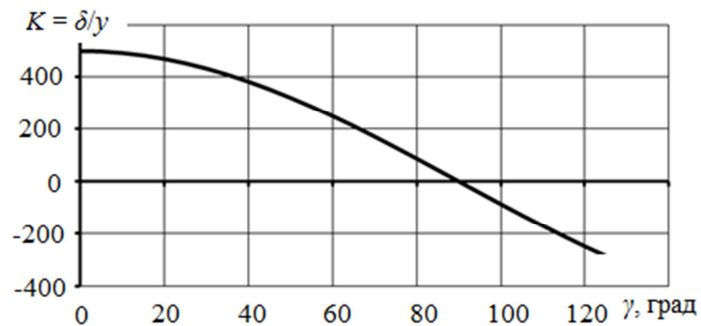


Рисунок 5.25. Зависимость чувствительности УМО от $|\gamma|$

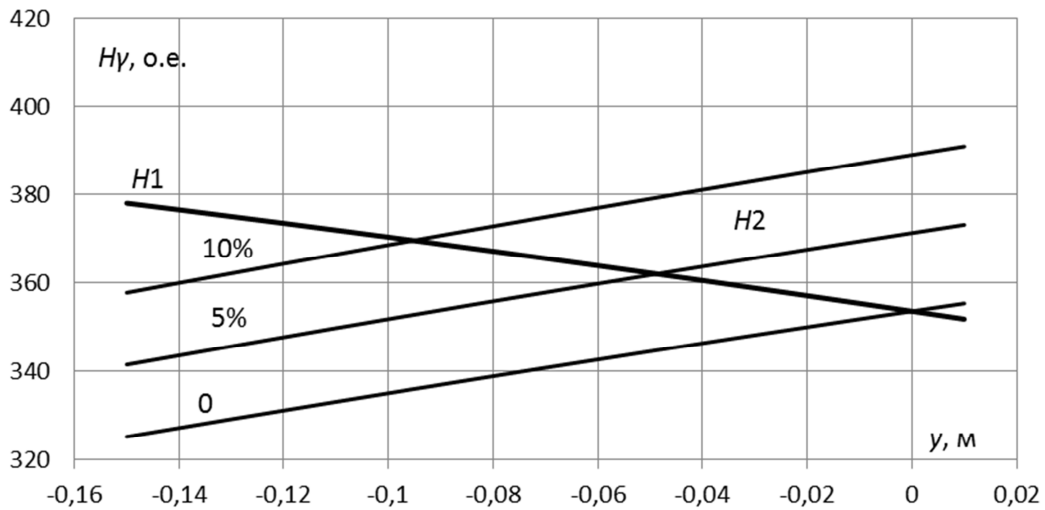


Рисунок 5.26. Влияние неравенства коэффициентов передачи ИП на погрешность местоопределения одноточечным методом

Влияние неравенства коэффициентов передачи индукционных преобразователей на погрешность местоопределения можно определить по графику на рисунке 5.26, где показана зависимость проекций H_1 и H_2 вектора напряженности на направления $\pm 45^\circ$ при $z = 2$ м от координаты y . Как видно, изменение коэффициента H_2 на 5 % вызывает погрешность не более 0,05 м.

5.10. Амплитудно-фазный метод местоопределения

Алгоритм местоопределения одноточечным амплитудно-фазным методом:

$$\delta = H_z = \frac{y}{z^2 + y^2}. \quad (5.5)$$

Знак траекторного рассогласования определяется по знаку фазового сдвига относительно опорного сигнала, в качестве которого используется проекция H_y вектора напряженности на горизонтальную ось. Поэтому соответствующее УМО по-прежнему содержит два ИП, выходной сигнал одного из которых определяет величину, а второй – знак траекторного рассогласо-

вания. Амплитудно-фазный метод может быть реализован УМО, структурная схема которого изображена на рисунке 5.27, где ФЧВ – фазочувствительный выпрямитель.

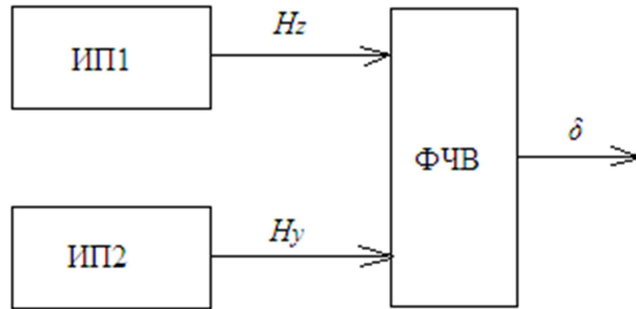


Рисунок 5.27. Структурная схема амплитудно-фазного УМО

Для определения знака траекторного рассогласования ИП2 следует расположить горизонтально и использовать в качестве задатчика опорной фазы, относительно которой определяется фаза сигнала и направление рассогласования.

Чувствительность амплитудно-фазных УМО:

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

Сигнал траекторного рассогласования достигает максимального значения при $y = z$, что соответствует $K_{\text{дин}} = 0$. Расчетная ширина рабочей зоны системы траекторного управления с амплитудно-фазным УМО равна удвоенному значению координаты z ; фактическая ширина может превышать расчетное значение в несколько раз.

Зависимости вертикальной H_z и горизонтальной H_y проекций вектора напряженности, формирующих сигналы траекторного рассогласования и опорной фазы при $z = 2$ м, показаны на рисунке 5.28.

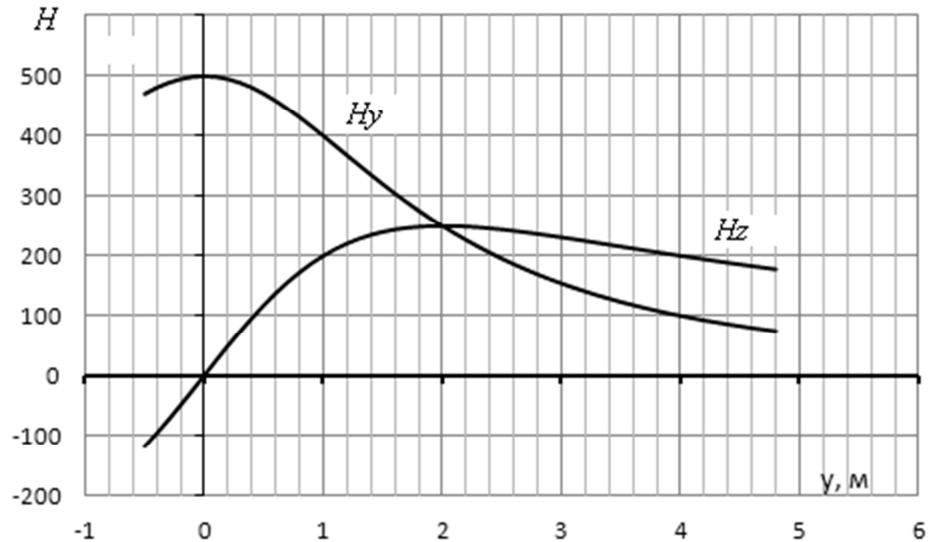


Рисунок 5.28. Выходные характеристики сигнального и опорного каналов амплитудно-фазного УМО при $z = 2$ м

Кривая $H_z = \delta(y)$ на рис. 5.28 позволяет определить влияние дрейфа нуля на погрешность местоопределения. Так, дрейфу нуля УМО на 100 единиц от нулевого значения, что составляет 40% от 250 единиц, соответствует смещение плановой траектории на 0,4 м, поэтому помехоустойчивость к дрейфу нуля составляет 0,01 м/%.

Рассматриваемый амплитудно-фазный метод использует в качестве плановой траектории геометрическое место точек, для которых $\psi = 90^\circ$. На рисунке 5.29 приведена величина бокового смещения плановой траектории относительно стороны прямоугольной петли 1000 x 80 м, при $z = 2$ м; смещение вызывается влиянием магнитного поля, создаваемого обратным током

петли. Смещение отсутствует, если магнитное поле создается током трехсторонней петли (рисунок 2.24б).

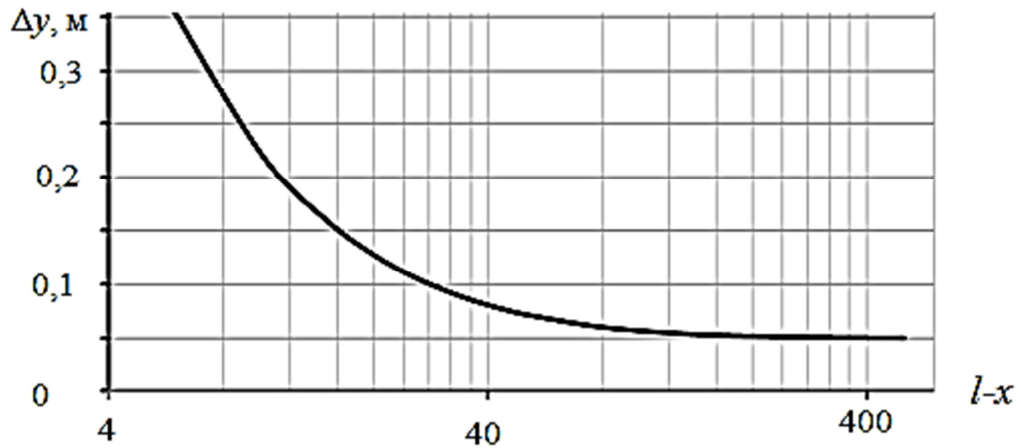


Рисунок 5.29. Смещение плановой траектории по длине гона для петли 1000x80 м

Выводы по главе 5

1. Измеряемым навигационным параметром является проекция вектора напряженности на аксиальную ось катушки индукционного преобразователя. Вычисляемыми первичными навигационными параметрами могут быть:
 - модуль вектора напряженности;
 - проекция вектора напряженности на заданное направление;
 - модуль проекции вектора напряженности на заданное направление;
 - направление вектора напряженности.

2. Вторичным вычисляемым навигационным параметром, программирующим плановую траекторию МТА, является результат математической обработки первичных параметров.
3. Алгоритм местоопределения МТА в общем случае заключается в сравнении вычисленного значения вторичного навигационного параметра с плановым значением, и формировании сигнала траекторного рассогласования как разности сравниваемых значений.
4. Дифференциальные, или разностно-амплитудные, методы местоопределения МТА предполагают нулевое плановое значение вторичного навигационного параметра. В этом случае сигнал траекторного рассогласования равен фактическому значению вторичного навигационного параметра, и определяется как разность двух первичных навигационных параметров.
5. Дифференциальные методы используют в качестве направляющей линии, программирующей плановую траекторию МТА, линию пересечения плоскости симметрии навигационного магнитного поля с горизонтальной плоскостью, в которой лежит магнитоприемник индукционного устройства местоопределения.
6. В качестве источника навигационного магнитного поля целесообразно использовать симметричную трехстороннюю петлю, магнитное поле которой обладает симметрией относительно вертикальной плоскости, в которой лежит средний провод петли.
7. Динамическая чувствительность устройств местоопределения к изменению боковой координаты МТА пропорциональна производной от сигнала траекторного рассогласования по боковой координате. Максимальному значению сигнала рассогласования соответствует нулевое значение динамической чувствительности.
8. Статическая чувствительность устройств местоопределения пропорциональна частному от деления сигнала рассогласования на ве-

личину траекторного рассогласования. Статическая чувствительность всегда положительная, так как отрицательным значениям соответствует потеря системой траекторного управления МТА устойчивости.

9. При реализации дифференциальных методов местоопределения МТА в навигационном магнитном поле одиночного провода крен трактора вызывает погрешность местоопределения, которая пропорциональна углу крена и глубине прокладки проводов в земле, и не зависит от высоты индукционных преобразователей над земной поверхностью.
10. Одноточечные разностно-амплитудные и амплитудно-фазный методы формируют сигнал траекторного рассогласования по направлению вектора напряженности в месте нахождения магнитоприемника, то есть ориентируют МТА относительно магнитных силовых линий навигационного поля.

Глава 6. ДАЛЬНОМЕРНЫЕ МЕТОДЫ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

6.1. Амплитудный метод с изменяемым компенсационным сигналом

Алгоритм формирования сигнала траекторного рассогласования МТА относительно удаленного проводника с током по модулю вектора напряженности H :

$$\delta = H - C,$$

где C – компенсационный сигнал, соответствующий плановому значению вторичного навигационного параметра, программирующего плановую траекторию МТА. В общем случае значение C зависит от положения МТА на гоне и от номера прохода, т.е. от расстояния до токоведущего провода.

Метод предложен сотрудниками Одесского филиала тракторного НИИ [27]; предполагалось, что он обеспечит требуемую точность местоопределения на расстояниях до 200 м от провода [28].

Алгоритм местоопределения, выраженный через координаты места нахождения магнитоприемника:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{y^2 + z^2}} - C.$$

Зависимость динамической чувствительности УМО, реализующих метод, от координат места нахождения магнитоприемника:

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

Чувствительность равна нулю при $y = 0$ и при $y \rightarrow \infty$. Следовательно, рабочая зона метода ограничена некоторыми минимальным и максимальным расстоя-

ниями до провода. Значение координаты y_3 , соответствующее максимальной чувствительности, определяется условием:

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

откуда: $y_3 = \frac{z}{\sqrt{2}} = 0,707z$.

Согласно данному методу, переход агрегата на смежный проход осуществляется изменением величины компенсационного сигнала C , в результате чего нулевой сигнал рассогласования наблюдается при приближении МТА к проводнику или удалению от него.

Результаты вычислений δ и K при $z = 2$ м и $y = 4...25$ м приведены в таблице 6.1. Здесь принято $C = 100\%$ при $y = 4$ м.

Табл. 6.1. Основные показатели амплитудно-компенсационных УМО с изменяемым компенсационным сигналом при $z = 2$ м

1	y , м	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	25
2	C , %	100	83,05	70,71	54,23	43,85	36,76	31,6	27,7	24,69	22,2	17,83
3	$K_{дин}$	100	71,59	53,03	31,9	21,08	14,9	11,1	8,53	6,775	5,51	3,544
4	100/ K_d	1	1,397	1,886	3,135	4,743	6,71	9,03	11,7	14,76	18,2	28,22

В строках таблицы указано:

1. координаты y места нахождения магнитоприемника;
2. требуемая величина компенсационного сигнала;
3. значение динамической чувствительности, приведенное к номинальному значению 100 отн. ед. при $y = 4$ м;
4. коэффициент усиления сигнала траекторного рассогласования, необходимый для обеспечения номинальной ширины зоны нечувствительности системы траекторного управления МТА.

Метод может быть реализован устройством, состоящим из вычислителя модуля напряженности, источника компенсационного сигнала C , схемы сравнения напряженности с компенсационным сигналом, программируемого усилителя сигнала траекторного рассогласования, восстанавливающего динамическую чувствительность УМО до 100%.

Пусть МТА должен перейти с траектории $y = 4$ м на смежную траекторию $y = 6$ м. Для этого компенсационный сигнал следует уменьшить в $100/70,71 = 1,414$ раза, а коэффициент усиления разностного сигнала увеличить в 1,886 раза. Для перехода на траекторию $y = 20$ м изменения должны быть больше соответственно в $100/22,2 = 4,5$ и $100/5,51 = 18,2$ раз.

При реализации метода, с целью минимизации влияния краевых эффектов, навигационное магнитное поле можно создавать «двойной петлей», рисунок 6.1.

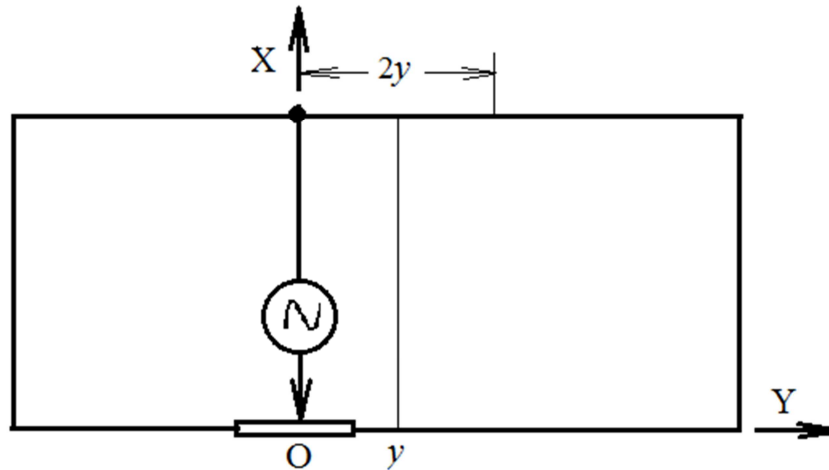


Рисунок 6.1. Источник навигационного магнитного поля в виде двойной петли с отдельной регулировкой токов полупетель

Пусть ось OX системы координат совмещена со средним проводом петли, плановая траектория МТА отстоит от него на расстоянии y и обратные токи

левой и правой полупетель равны. Тогда, согласно разделу 2.11, вдоль плановой траектории произойдет взаимная компенсация магнитных полей, создаваемых обратными токами, за исключением отрезка $2y$. Изменяя распределение обратных токов между полупетлями, можно добиваться требуемой прямолинейности каждого прохода МТА.

Прямолинейность плановых траекторий можно также обеспечить, вычисляя плановые значения напряженности в требуемом месте нахождения МТА согласно методике, описанной в разделе 2.11.

Так как равносигнальные поверхности модуля вектора напряженности образуют концентрические цилиндры, рассматриваемый метод чувствителен к изменению координаты z , т. е. к галопированию трактора. Зависимость бокового смещения от высоты тем больше, чем ближе магнитоприемник к токоведущему проводу:

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

Так, если $y = 10$ м, $z = 2$ м, то изменение высоты магнитоприемника на $\pm 0,2$ м смещает плановую траекторию на $\pm 0,04$ м.

Влияние крена ограничивается пространственным перемещением датчика напряженности в сторону крена на расстояние, пропорциональное высоте датчика над земной поверхностью, и углу крена.

Метод чувствителен к нестабильности тока токоведущего провода и компенсационного сигнала, изменения которых пропорционально смещают равносигнальные поверхности модуля вектора напряженности.

Метод позволяет увеличить расстояние между смежными проводами до десяти и более метров без увеличения габаритных размеров МТА. Однако он чувствительный к изменению удельного электрического сопротивления грунта, поэтому нуждается в дополнительном теоретическом и экспериментальном обосновании.

6.2. Метод с изменяемым коэффициентом передачи магнитоприемника

При неизменном компенсационном сигнале C переход МТА на очередной гон можно осуществлять, изменяя коэффициент усиления выходного сигнала магнитоприемника. Основные технические параметры соответствующих УМО приведены в таблице 6.2, где строка 3 содержит требуемое увеличение коэффициента передачи магнитоприемника, а строка 5 – усиления сигнала δ .

Табл. 6.2. Основные параметры УМО с управляемым предусилителем

1	$y, м$	4	5	6	8	10	12	14	16	20	25
2	$H, \%$	100	83,05	70,71	54,23	43,85	36,76	31,6	27,7	22,2	17,83
3	$100/H$	1	1,204	1,414	1,844	2,28	2,72	3,16	3,61	4,5	5,608
4	K_d	100	71,59	53,03	31,9	21,08	14,9	11,1	8,53	5,51	3,544
5	H/K_d	1	1,16	1,333	1,7	2,08	2,467	2,86	3,25	4,04	5,032

6.3. Метод с изменяемой напряженностью

Амплитудно-компенсационный метод можно реализовать, изменяя не коэффициент передачи магнитоприемника, а ток, создающий навигационное магнитное поле. В обоих случаях выходной сигнал магнитоприемника одинаковый, поэтому обработка сигналов и качество местоопределения одинаковое.

6.4. Двухчастотный разностно-амплитудный метод

Вследствие краевых эффектов РСЛ модуля вектора напряженности непрямолинейные, приближаются к токоведущему проводу или отклоняются от него по мере приближения к поворотной полосе. Так, согласно данным таблицы 2.3, если боковое смещение трактора относительно заземленного провода

составляет 10 м, то отклонение от прямой на 0,1 м наблюдается уже на расстоянии 100 м до заземления. Поэтому при переходе МТА от одного провода к соседнему между обрабатываемыми полосами земли вблизи поворотных полос образуются огрехи, что снижает качество полевых работ.

Смежные провода, между которыми движется МТА, можно питать токами разной частоты. Тогда, измеряя напряженность магнитного поля одной частоты, значение компенсационного сигнала можно формировать по напряженности магнитного поля другой частоты. При этом алгоритм местоопределения:

$$\delta = H_1 - KH_2 ,$$

где K – отношение коэффициентов усиления напряженности обоих каналов измерения напряженности для данной плановой траектории МТА.

Зависимость K от координаты y при расстоянии между смежными проводами $2b = 20$ м и высоте $z = 2$ м приведена в таблице 6.3.

Табл. 6.3. Зависимость коэффициента K от бокового смещения y относительно срединной линии при $2b = 20$ м и $z = 2$ м, $x = 0$

y , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8
K	1	1,213	1,475	1,8067	2,236	2,810	3,60555	4,7475	6,403

Достоинством двухчастотного метода по сравнению с одночастотными является прямолинейность срединной линии $y = 0$, что предотвращает накопление ошибок местоопределения и образование огрехов или перекрытий при переключении электропитания проводов. В качестве примера в таблице 6.4 приведены координаты точек плановой траектории, удовлетворяющих условию $\delta = 0$ при $2l = 1000$ м, $2b = 20$ м, $z = 2$ м.

Изменение электропроводимости грунта оказывает одинаковое влияние на магнитные поля обеих частот, что может способствовать снижению влияния электропроводимости грунта на точность местоопределения.

Табл. 6.4. Координаты точек плановой траектории двухчастотного метода при $2l = 1000$ м, $2b = 20$ м, $z = 2$ м

x , м	0	300	400	450	480	490	495	497	499	500
y , м	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	1,998	1,991	1,963	1,829	1,662	1,611	1,667	1,839	2
	4	3,996	3,983	3,934	3,691	3,381	3,266	3,361	3,684	4,001
	6	5,995	5,979	5,916	5,614	5,208	5,012	5,105	5,529	6,001
	8	7,995	7,976	7,906	7,580	7,142	6,859	6,898	7,348	8,002

6.5. Местоопределение импульсно-фазовым методом

6.5.1. Формирование опорной фазы магнитного поля

Способ получения квазиволнового магнитного поля с низкой скоростью фазового фронта рассмотрен в главе 3; ниже рассматривается индукционный метод получения опорной фазы [29].

Опорную фазу можно формировать по радиосигналу, синхронизированному током одного из проводов. Индукционный способ заключается в создании опорного магнитного поля другой частоты; его можно реализовать, питая провода токами прямоугольной формы. В этом случае взаимный фазовый сдвиг магнитных полей, создаваемых третьими гармониками прямоугольного тока, составит $90 \times 3 = 270^\circ = -90^\circ$; фазовый фронт магнит-

ного поля третьей гармоникой перемещается навстречу фазовому фронту магнитного поля первой гармоникой, рисунок 6.2.

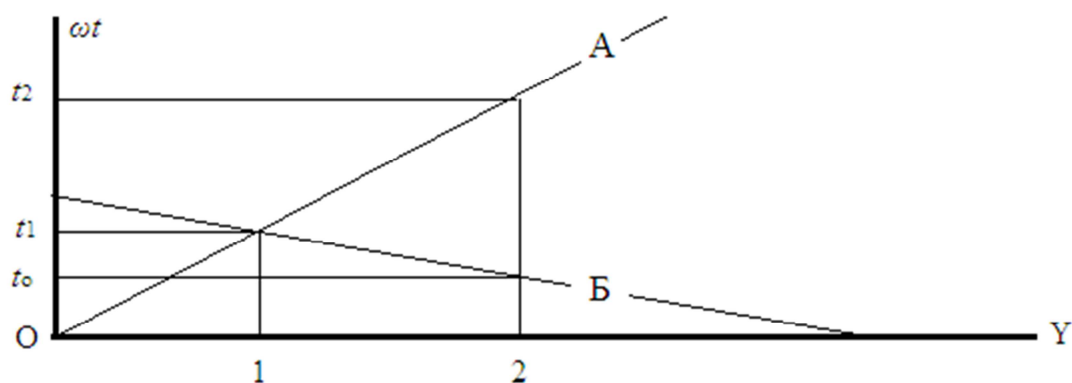


Рисунок 6.2. Чувствительность двухчастотных импульсно-фазовых УМО

Пусть фазовый фронт А основной гармоникой перемещается от первого провода ко второму, рисунок 6.2. Тогда фазовый фронт В третьей гармоникой перемещается от второго провода к первому. Пусть также место МТА переместилось на некоторое расстояние от точки 1 к точке 2. При этом фазовый фронт основной гармоникой придет в новую точку местонахождения МТА в момент t_2 , а третьей – в момент t_0 . Как видно, временной отрезок $(t_2 - t_0)$ на $1/3$ больше отрезка $(t_2 - t_1)$, который был бы при формировании опорной фазы по радиоканалу.

Графики мгновенных значений магнитных полей основной и третьей гармоник приведены на рисунке 6.3 для точек с $H_1 = 2H_2$. В рассматриваемой точке:

- напряженность поля гармоникой $H1-1$ меняет знак при $\omega t = 270^\circ$;
- напряженность поля гармоникой $H2-1$ меняет знак при $\omega t = 0$ и 360° ;
- напряженность суммарного поля $H\Sigma-1$ меняет знак при $\omega t = 297^\circ$;
- напряженность суммарного поля $H\Sigma-3$ меняет знак при $\omega t = 261^\circ$.

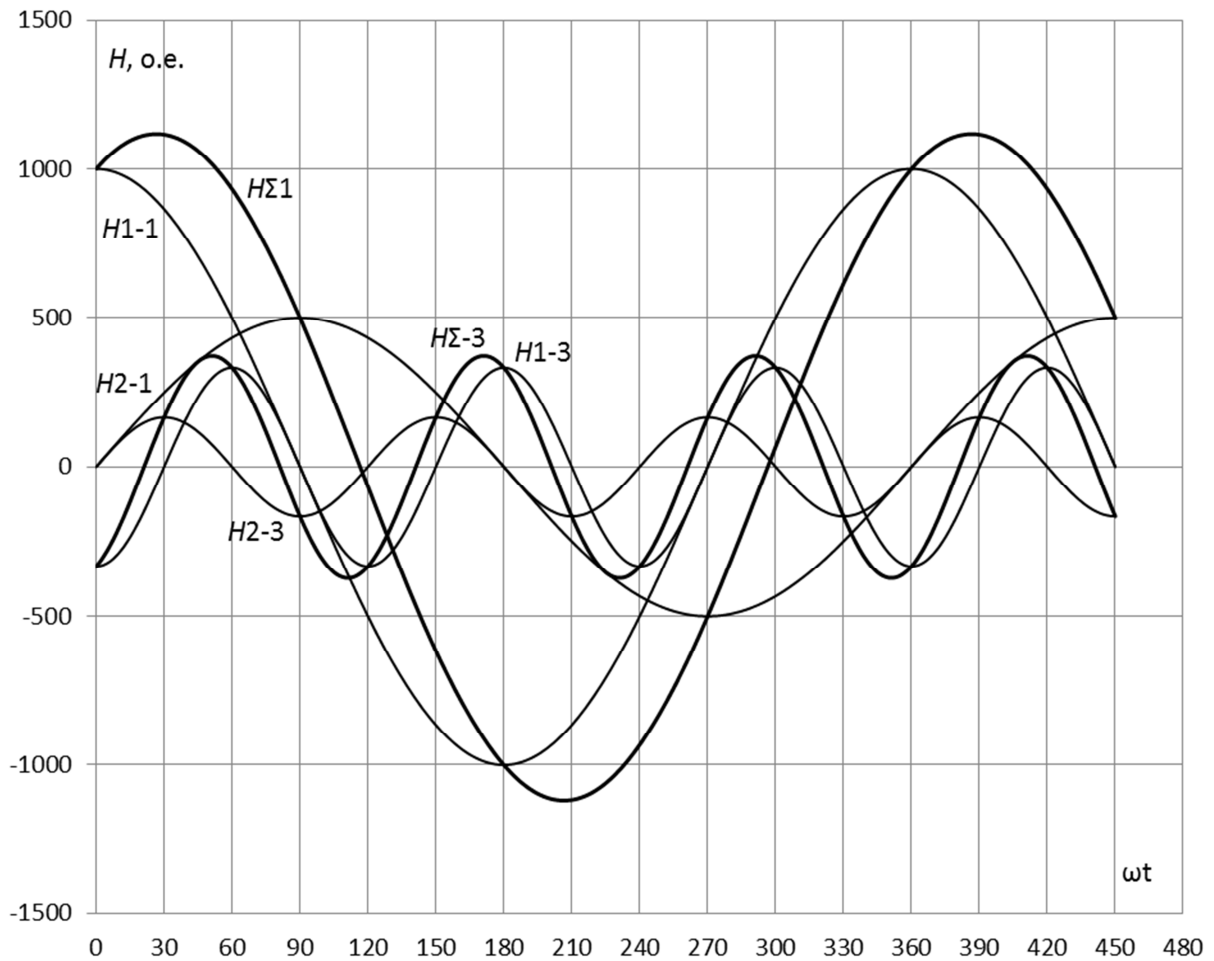


Рисунок 6.3. Фазовые сдвиги составляющих напряженности первой и третьей гармоник прямоугольных токов

Пусть, например, отношение напряженностей, создаваемых токами проводов, равно 1,5. Затем точка наблюдения поля перемещается к ближнему проводу на $0,0308b$, отношение напряженностей возрастает до 1,6. Расчет показывает, что при этом изменение фазы первой гармоники квазиволнового поля относительно тока составит $1,7^\circ$, третьей $0,5^\circ$, а измеряемая разность фаз первой гармоники относительно третьей изменится на $2,2^\circ$.

6.5.2. Определение фазы квазиволнового магнитного поля

Вне плоскости проводов поле эллиптически поляризованное, поэтому модуль вектора напряженности не приобретает нулевое значение, что усложняет точное измерение фазы, рисунок 6.4, а).

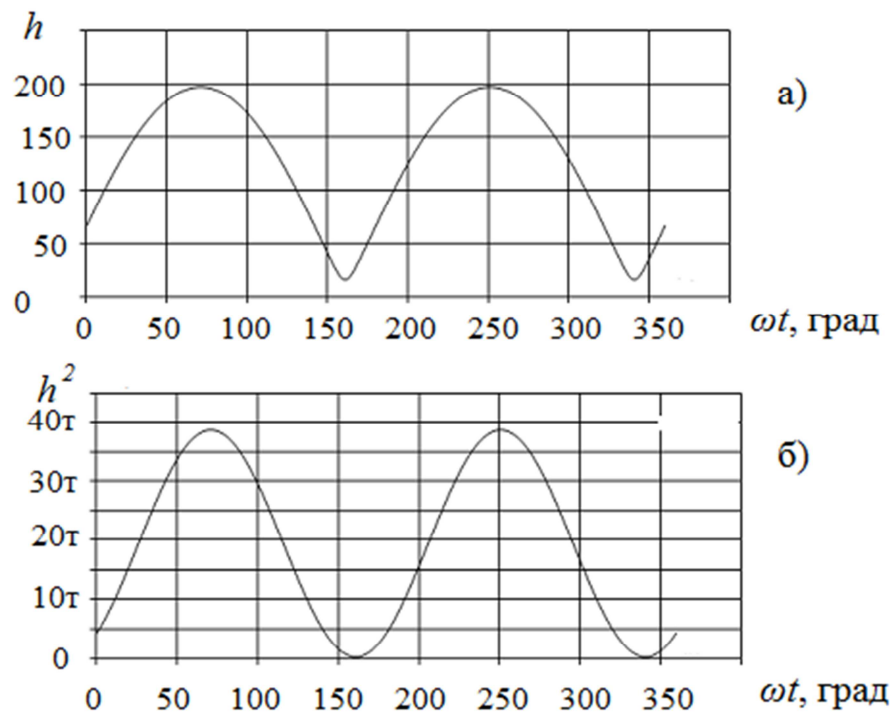


Рис. 6.4. Модуль (а) и квадрат модуля (б) вектора напряженности квазиволнового магнитного поля

Мгновенное значение модуля вектора напряженности, возведенное в квадрат, равно сумме квадратов мгновенных значений проекций вектора на три взаимно-перпендикулярные направления:

$$\begin{aligned}
 h &= \sqrt{h_x^2 + h_y^2 + h_z^2} = \sqrt{H_x^2 \sin^2(\omega t) + H_y^2 \sin^2(\omega t) + H_z^2 \sin^2(\omega t)} = \\
 &= \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \cdot \sqrt{0,5 - 0,5\cos 2\omega t},
 \end{aligned}$$

откуда: $h^2 = 0,5H^2(1 - \cos 2\omega t)$.

Следовательно, квадрат мгновенного значения модуля вектора напряженности состоит из постоянной и переменной составляющих, что позволяет использовать последнюю в качестве источника опорной фазы, рисунок 6.4, б). При этом изменение переменной составляющей с удвоенной частотой позволяет удвоить частоту измерения фазы квазиволнового поля в точке измерения.

Структурная схема двухчастотного импульсно-фазового УМО, работающего на основной и высшей гармонике прямоугольных токов, изображена на рис. 6.5.



Рисунок 6.5. Структурная схема импульсно-фазовых УМО

(ДН1 и ДН2 – датчики напряженности основной и высшей гармоник; Φ – фазометр; ДП – датчик пути; ВУ – вычислительное устройство; СС – схема сравнения)

Плановое значение координаты y хранится в памяти вычислительного устройства ВУ. Фактическое расстояние до поворотной полосы измеряется датчиком пути ДП (спидометром). Схема сравнения сравнивает воспроизведенное из памяти значение фазы с вычисленным, и формирует сигнал траекторного рассогласования как разность сравниваемых значений.

6.6. Вычислительный метод местоопределения

Высокую слитность смежных проходов МТА можно обеспечить, формируя компенсационный сигнал путем вычисления фактического значения вторичного навигационного параметра вдоль плановой траектории движения по известным параметрам источника магнитного поля и расстоянию до поворотных полос.

Метод требует измерения второй, продольной координаты x , значение которой могут определяться, например, средствами одометрической навигации. При этом допустимая погрешность измерения координаты x зависит от кривизны РСЛ модуля вектора напряженности.

На рисунке 6.5 показан график зависимости напряженности магнитного поля снаружи прямоугольной петли 1000×20 м от координаты x при $y = 10$ м и $z = 2$ м. Если принять допустимую погрешность местоопределения равной 1%, то примерно такой же будет и допустимая погрешность вычисления напряженности. График показывает, например, что при $x = 480$ м этому условию соответствует ошибка измерения координаты $\Delta x \approx \pm 1$ м.

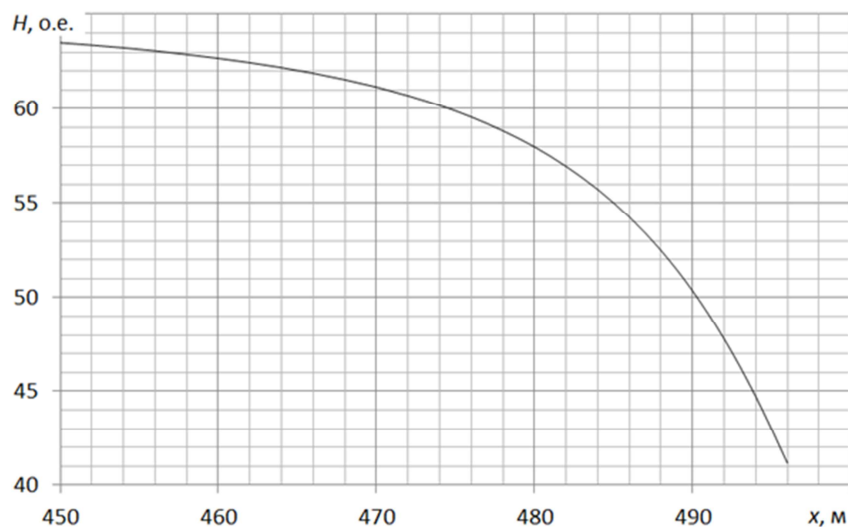


Рисунок 6.6. Зависимость напряженности от координаты x снаружи прямоугольной петли 1000×20 м при $y = 10$ м, $z = 2$ м

6.7. Следовый индукционный метод местоопределения МТА

Вычисление фактического значения напряженности сопряжено с получением данных о токе источника магнитного поля и конфигурации последнего, электропроводимости почвы, параметрах индукционных преобразователей, длине гона. Однако фактические значения напряженности вдоль предстоящей траектории движения можно получать без вычислений – достаточно при предыдущем смежном проходе МТА измерять и запоминать в функции пути мгновенные значения напряженности магнитного поля вдоль программируемой для очередного прохода направляющей линии [15]. Качество местоопределения в обоих случаях может быть примерно одинаковым, что определяется конкретным исполнением реализующих их УМО МТА. Наличие в запоминающем устройстве информации о напряженности вдоль всего гона позволяет усреднять компенсационное значение и тем самым предотвращать прогрессирующее накопление ошибок траекторного управления.

6.8. Определение места МТА на дистанции

Непрерывное определение координаты x места нахождения МТА на дистанции может осуществляться средствами одометрической навигации, т.е. спидометром.

Индукционными средствами можно осуществлять установку начального состояния спидометра по изменению фазы вертикальной составляющей вектора напряженности H_z в момент пересечения датчиком напряженности поперечного провода с током, частота которого отличается от основной навигационной частоты. Зависимость напряженности от расстояния до поперечного провода при $z = 1,5$ м и 3 м приведена на рисунке 6.7.

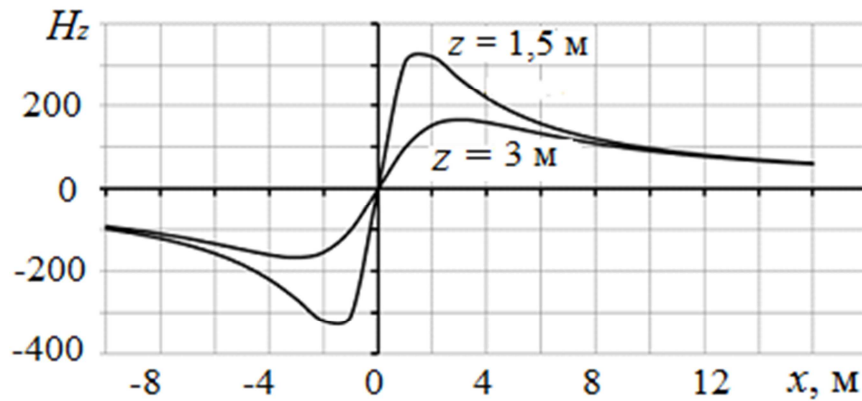


Рисунок 6.7. Зависимость выходного сигнала датчика H_z от расстояния x до проводника.

График на рисунке 6.7 подтверждает также возможность измерения продольного расстояния 3...10 м до поперечного проводника с током по величине проекции вектора напряженности на вертикальную ось при $z \approx 1,5$ м.

6.9. Определение пространственной ориентации осей трактора

Для корректировки влияния ориентационных помех и повышения устойчивости автоматического управления траекторией МТА целесообразно измерять углы крена, рыскания (курса) и галопирования («тангажа»).

Так как проекции вектора напряженности на вертикальную и горизонтальные оси пропорциональны косинусам углов между вектором напряженности и осями, то искомые углы можно определять по измеренным значениям проекций и модулю вектора напряженности:

$$\psi_i = \arctg \frac{H_i}{H}.$$

Курсовой угол можно определять рассмотренными выше разностно-амплитудными УМО, расположив измерительную базу $2a$ параллельно про-

дольной оси трактора. Более просто можно определять по величине проекции вектора напряженности на продольную ось трактора:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{H_x}{H}.$$

Дополнительная погрешность измерения курсового угла может возникнуть при создании магнитного поля током петли, так как продольная составляющая вектора создается токами перемычек, и при $z \neq 0$ наблюдается как внутри, так и снаружи петли:

$$H_x = H_{\Pi} \frac{z}{x^2 + z^2},$$

где H_{Π} - модуль вектора напряженности, создаваемого в точке измерения током перемычки петли.

Выводы по главе 6

1. Дальномерные методы местоопределения позволяют формировать физическую плановую траекторию МТА как линию пересечения горизонтальной плоскости, проведенной на высоте магнитоприемника, с равносигнальной поверхностью модуля вектора напряженности квазистационарного магнитного поля, либо с изоповерхностью изофаз квазиволнового поля.
2. Расчетный метод позволяет вычислять фактическое положение магнитоприемника по известным параметрам источника магнитного поля и места МТА на гоне, однако требует дополнительного измерения второй (продольной) координаты места нахождения МТА. Допустимая погрешность измерения продольной координаты зависит от кривизны навигационной направляющей линии, и может составлять доли метра.

3. Следовой метод программирования плановой траектории позволяет заметить вычисление текущего значения вторичного навигационного параметра его вычислением по фактическим значениям первичных навигационных параметров и запоминанием в функции пройденного в процессе предыдущего смежного прохода МТА пути.
4. Квазиволновое магнитное поле позволяет определять боковую координату МТА импульсно-фазовым методом, по величине фазового сдвига магнитного поля относительно тока в проводах.
5. Значение опорной фазы импульсно-фазовых устройств местоопределения можно формировать индукционным методом, питая провода током другой частоты, кратной частоте основного, сигнального тока.
6. Явление магнитной индукции позволяет измерять курсовой угол трактора непосредственно по величине проекции вектора напряженности на продольную ось трактора.
7. Явление магнитной индукции позволяет с высокой точностью определять расстояние до поворотной полосы по переходу МТА через поперечный токоведущий провод с током вспомогательной частоты.

Глава 7. МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЕ МТА ПРИ ДУБЛЕРНОМ ВОЖДЕНИИ ШЕРЕНГОЙ

Введение

Источник магнитного поля в виде небольшой рамки можно расположить на ведущем МТА. Тогда, измеряя напряженность магнитного поля на ведомом, можно определять его положение относительно рамки и организовать движение по траектории, определяемой траекторией ведущего агрегата.

В общем случае взаимное положение ведущего и ведомого тракторных агрегатов (лидера и дублера) характеризуется [30]:

- интервалом (взаимным боковым смещением);
- дистанцией (расстоянием в направлении движения);
- углами взаимного крена и галопирования;
- углом рыскания (взаимным курсовым углом).

Из этих параметров наиболее важным является интервал, погрешность измерения которого не должна превышать сотых долей метра. Дистанция в процессе движения может изменяться на несколько метров, поэтому требуемая точность её измерения ниже.

Измерение взаимных углов крена и галопирования может требоваться для корректировки сигнала тракторного рассогласования δ .

Угол рыскания характеризует изменение взаимного курсового угла агрегатов. При прямолинейном движении лидера изменение курсового угла связано с изменением направления движения дублера; при движении по криволинейным траекториям величина курсового угла дублера зависит также от направления движения лидера.

7.1. Местоопределение в плоскости рамки

Для математического описания навигации МТА в магнитном поле горизонтальной рамки совместим начало прямоугольной системы координат $OXYZ$ с центром рамки на лидере А, рисунок 7.1. Ось OX направим параллельно продольной оси лидера, а OZ – вертикально. При этом интервал будет определяться значением координаты y датчика напряженности на дублере Б, а дистанция – значением координаты x .

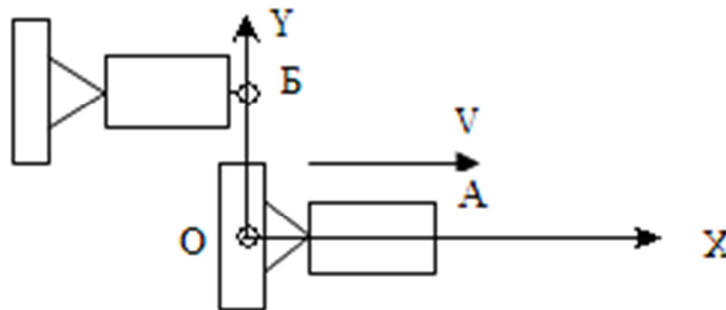


Рисунок 7.1. Взаимное положение лидера (А) и дублера (Б) при движении шеренгой в направлении вектора скорости V

Дублерное вождение МТА шеренгой может применяться при групповой работе широкозахватных агрегатов на этапе перехода от ручного управления МТА к автоматическому, когда оператор находится в кабине трактора-лидера или трактора-дублера. В этом случае трактор-лидер ориентируется по токоведущему проводу, а трактор-дублер – по ведущему агрегату. При этом оператор не управляет движением, а только осуществляет контроль окружающей обстановки, технического состояния агрегатов и качества выполнения технологической операции, устраняет выявляемые нарушения, при необходимости изменяет программу работы агрегатов.

7.1.1. Определение интервала по модулю вектора напряженности

В плоскости рамки зенитный угол датчика напряженности $\theta = 90^\circ$; алгоритм формирования сигнала траекторного рассогласования:

$$\delta = H - H_0 = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}^3} - C,$$

где $H_0 = C = \text{const}$ – плановое значение напряженности.

Условию $\delta = 0$ соответствует:

$$\sqrt{x^2 + y^2} = r_0 = \text{const},$$

поэтому при изменении дистанции x взаимное перемещение агрегатов осуществляется по дуге окружности, радиус r которой равен плановому расстоянию между рамкой и датчиком напряженности. Если $y \approx r$, то отклонение Δy ведомого агрегата от касательной к окружности в точке $x = 0$, согласно (2.2), составит:

$$\Delta y = r - \sqrt{r^2 + x^2} \approx \frac{x^2}{2y}. \quad (7.1)$$

Так, если $y_{\max} = 10$ м, то изменение дистанции 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.

Динамическая чувствительность УМО при $x \approx 0$ обратно пропорциональна четвертой степени интервала y :

$$K = \frac{d\delta}{dy} = -\frac{3y}{\sqrt{x^2 + y^2}^5}. \quad (7.2)$$

Метод обладает низкой чувствительностью к нестабильности тока рамки, так как относительное изменение расстояния r примерно в 3 раза меньше

вызвавшего его изменения тока рамки. Так, увеличение тока на 3% увеличит интервал в $\sqrt[3]{1,03} = 1,01$ раза, или на 1%.

Изменение пространственной ориентации датчика напряженности не оказывает влияния на результат измерения модуля вектора напряженности и не вызывает дополнительной погрешности определения интервала. Но крен рамки изменяет зенитный угол $\theta = 90^\circ$ на угол крена γ , поэтому, согласно (3.2), вызывает погрешность местоопределения:

$$\Delta y(\%) = 100(\sqrt[6]{1 + 3\sin^2\gamma} - 1).$$

Так, $\gamma = 6^\circ$ увеличит интервал на $\Delta y = 0,54\%$; изменение угла γ наклона оси рамки в плоскости OYZ на 90° увеличит напряженность в 2 раза, а y на 26%.

7.1.2. Определение интервала по проекции вектора напряженности на вертикальную ось

Вектор напряженности перпендикулярен к плоскости рамки, поэтому измерение модуля можно заменить измерением проекции H_z на вертикальную ось дублера. Качество местоопределения при этом практически не изменится, однако возрастет влияние крена как рамки, так и магнитоприемника, что видно на рисунке 7.2.

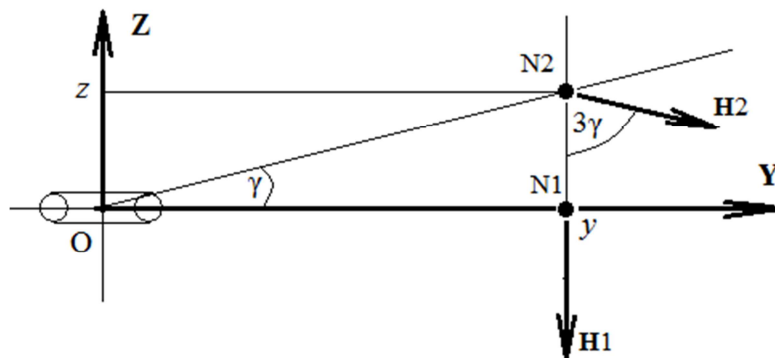


Рисунок 7.2. Влияние крена на погрешность местоопределения

При крене рамки проекция вектора напряженности на вертикальную ось дублера равна тангенциальной составляющей вектора (см. раздел 3.1) H_θ . Поэтому крен рамки на угол γ уменьшает интервал на:

$$\Delta y = 100(1 - \sqrt[3]{\cos \gamma}), \%$$

Так, углу крена 6° соответствует $\Delta y = 0,18\%$.

Аналогично при крене дублера на угол γ проекция вектора напряженности на его вертикальную ось уменьшится пропорционально $\cos \gamma$, поэтому углу крена $\gamma = 6^\circ$ будет соответствовать уменьшение проекции вектора напряженности на $0,55\%$, а интервала y на $0,18\%$.

При одновременном крене ИП и рамки в одну сторону на 6° уменьшится зенитный угол $\theta = 84^\circ$, поэтому возрастет модуль вектора напряженности на $\sqrt{1 + 3\cos^2 \theta}$, то-есть на $1,6\%$. Индукционный преобразователь переместится в точку N2 (рис. 7.2), поэтому угол между осью ИП и вектором напряженности утроится. Проекция вектора напряженности уменьшится до $\cos 18^\circ = 0,9511$ первоначальной величины, или на 5% . В итоге дублер приблизится к лидеру на $(5-1,6)/3 = 1,1\%$.

В таблице 7.1 приведена зависимость смещения плановой траектории y при одностороннем крене рамки и индукционного преобразователя.

Табл.7.1. Влияние одностороннего наклона рамки и индукционного преобразователя на погрешность местоопределения

γ_0 , град	0	1	2	3	4	5	6	7
θ_0 , град	90	89	88	87	86	85	84	83
ψ_0 , град	180	177	174,0	171,016	168,04	165,075	162,13	159
y , м	10	9,997	9,988	9,973	9,951	9,923	9,89	9,85
Δy , см	0,0	0,3	1,2	2,7	4,9	7,6	11,0	15,0

7.1.3. Многорамочный метод

Зависимость интервала y от дистанции x можно уменьшить, создавая магнитное поле с помощью двух и более разнесенных вдоль оси Ox рамок с синфазными или противофазными токами согласно раздела 3.5.

Форма РСЛ двух рамок изображена на рис. 3.10. Применение третьей рамки в начале системы координат позволяет корректировать форму РСЛ простым изменением величины и направления тока этой рамки. В качестве примера в таблице 7.2 приведены координаты x и y РСЛ суммарного магнитного поля трех рамок; здесь M – отношение магнитного момента средней рамки к магнитным моментам крайних; за относительную единицу расстояния принято b .

Табл. 7.2. Координаты y точек РСЛ суммарного поля трех рамок

x/b		$\pm 0,8$	$\pm 0,7$	$\pm 0,6$	$\pm 0,5$	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	0
M	0	4,9512	4,9625	4,9723	4,98073	4,9876	4,993	4,9969	4,999	5
	-0,85	2,9994	3,0013	3,0021	3,00218	3,0018	3,0012	3,0006	3	3
	-0,175	1,9998	2,0013	2,0021	2,00218	2,0018	2,0012	2,0006	2	2
	0,67	0,9998	1,0001	0,9983	0,99639	0,9956	0,9963	0,9978	0,999	1

7.1.4. Однорамочный суммарно-амплитудный метод

Такой же результат можно получить, применяя одну рамку и 2-3 индукционных преобразователя, расстояние между которыми $2a$ соответствует расстоянию $2b$ между рамками [32]. Этот вариант обладает тем преимуществом, что позволяет оперативно изменять вклад каждого преобразователя в суммарный сигнал простым поворотом движка потенциометра, что расширяет потенциальные возможности суммарно-амплитудных УМО. Может быть реализован

при измерении модулей или проекций векторов напряженности. Алгоритм местоопределения аналогичный многорамочному методу:

$$\delta = \sum_{i=1}^n H_i - C.$$

7.1.5. Двухчастотный суммарно-амплитудный метод

Питая 2-3 рамки токами разной частоты, можно отдельно измерять напряженность каждой рамки и суммировать их с необходимыми коэффициентами. Этот вариант имеет то преимущество, что позволяет увеличить расчетное значение измерительной базы $2a$ посредством суммирования баз рамок А, В и датчиков С, D, рисунок 7. 3.

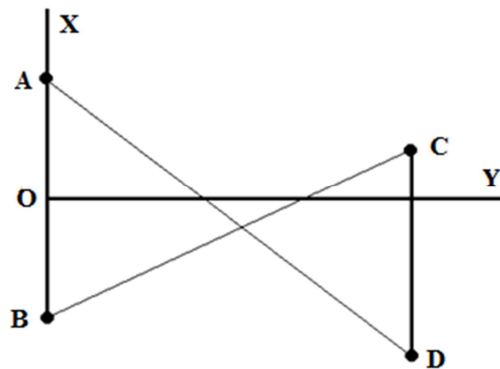


Рисунок 7.3. Измерительные базы двухчастотного метода

Особенность метода также в том, что сигнал траекторного рассогласования изменяется при повороте каждой из баз вокруг своей вертикальной оси, т.е. реагирует на изменение пространственной ориентации горизонтальных осей обоих агрегатов.

7.1.6. Вычислительный метод

Пусть прямоугольная система координат XOY связана с базой $2a$ дублера; рамка находится на лидере в точке N , рисунок 7.4.

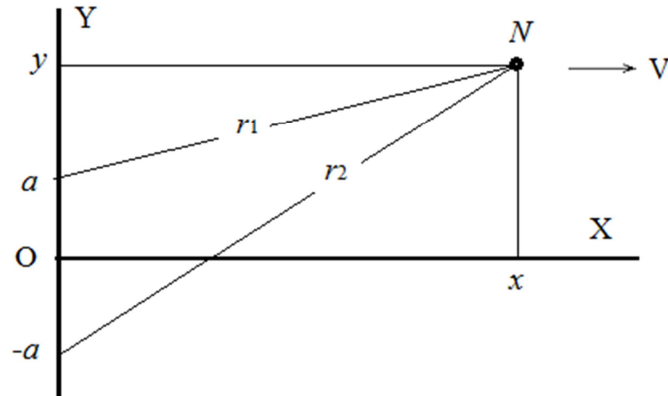


Рисунок 7.4. Вычисление интервала y

Согласно (1.1):

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

Так как $4a = \text{const}$ и $r = (H)^{-1/3}$, то алгоритм вычисления y [32]:

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

где K – конструктивная постоянная УМО.

Преимуществом вычислительного метода является независимость результата вычислений от дистанции x . Это позволяет создавать универсальные УМО, пригодные для определения интервала при произвольном взаимном положении агрегатов и изменении дистанции в широких пределах.

Применение цифровой техники обеспечивает высокую точность вычисления интервала. При этом основным источником погрешности являются нестабильность магнитного момента рамки и погрешности индукционных датчиков напряженности. Как показали расчеты, относительная погрешность изме-

рения интервала вычислительным методом примерно на порядок превышает относительную взаимную погрешность измерения напряженностей магнитного поля.

Зависимости погрешности местоопределения от взаимной погрешности измерения напряженности и координат места нахождения рамки приведены на рисунке 7.5, где первая цифра над/под графиком соответствует координате x , а вторая – координате y в отн. ед: 1 о.е. = a .

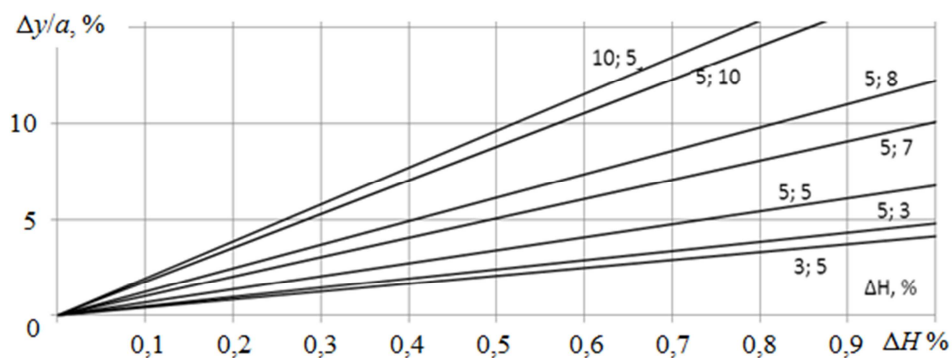


Рисунок 7.5. Зависимость погрешности вычисления y от взаимной погрешности ΔH (Цифры у графиков – значения дистанции и интервала ($x; y$) в a)

Увеличение длины базы в 2 раза пропорционально уменьшает относительные значения координат ($x; y$), что уменьшает относительную погрешность местоопределения примерно в 4 раза.

Нестабильность напряженности, вызываемая нестабильностью тока рамки, вызывает погрешность местоопределения, которая в несколько раз меньше вызываемой взаимной погрешностью датчиков напряженности.

Метод можно реализовать в двухчастотном варианте, рисунок 7.3, увеличив расчетное значение измерительной базы $2a$. При этом дополнительная погрешность возникает вследствие взаимной нестабильности токов рамок.

7.1.7. Метод с программируемым компенсационным сигналом

Зависимость интервала от дистанции можно уменьшить, если предварительно запомнить зависимость напряженности от дистанции, а в процессе движения воспроизводить запомненные значения напряженности в функции дистанции и использовать их в качестве плановых [33] аналогично разделу 6.7.

7.2. Местоопределение в меридиональной плоскости рамки по модулю вектора напряженности при $\theta \approx 90^\circ$

Местоопределение дублера в меридиональной плоскости рамки имеет место при вертикальном положении плоскости рамки, когда её аксиальная ось OZ лежит в горизонтальной плоскости. При этом зенитный угол θ точки измерения напряженности магнитного поля может изменяться от нуля до 180° , что оказывает заметное влияние на качество местоопределения.

7.2.1. Амплитудный метод

Как следует из рисунка 3.6 и таблицы 3.1, равносигнальные линии модуля вектора напряженности содержат практически прямолинейные участки, длина которых превышает 50 % расстояния до оси OZ рамки. Эти участки можно использовать в качестве направляющих линий дублера при движении шеренгой и изменении дистанции, для чего ось OZ рамки следует расположить параллельно продольной оси лидера.

Нормально датчик напряженности располагается в плоскости рамки или вблизи от неё, поэтому чувствительность амплитудных УМО описывается (7.2). При этом влияние крена рамки и датчика напряженности ограничивается их пространственным перемещением.

7.2.2. Двухрамочный суммарно-амплитудный метод

Длину прямолинейного участка РСЛ можно увеличить с помощью второй вертикальной рамки с синфазным током. Комбинируя взаимное положение рамок, можно получать РСЛ различной формы, выбирая наиболее приемлемую. Но так как напряженность суммарного поля равна векторной сумме составляющих, возможно появление локальных зон с пониженной и даже нулевой напряженностью в точках, где векторы напряженности обеих рамок равны по модулю и направлены встречно.

7.2.3. Двухчастотный суммарно-амплитудный метод

Рамки можно питать токами разной частоты. Измеряя напряженность каждой рамки и суммируя измеренные значения, можно формировать РСЛ как арифметическую сумму составляющих. А изменяя коэффициенты передач датчиков напряженности в зависимости от дистанции, можно в 2-3 раза увеличить прямолинейный участок допустимого диапазона изменения дистанции.

7.2.4. Однорамочный суммарно-амплитудный метод

Предыдущий метод можно реализовать, применяя одну рамку и 2-3 датчика напряженности, расположенные вдоль прямой, параллельной продольной оси дублера. Изменяя усиление суммируемых сигналов, можно придавать требуемую прямолинейность линии возможного положения дублера в заданном диапазоне изменения дистанции.

7.3. Местоопределение в меридиональной плоскости рамки по модулю вектора напряженности при $\theta \approx 0^\circ$

7.3.1. Амплитудный метод

Аксиальную ось OZ рамки можно расположить перпендикулярно к продольной оси лидера и определять место нахождения дублера амплитудно-компенсационным методом при значениях зенитного угла $\theta \approx 0$. Это в 2 раза повышает помехоустойчивость УМО при том же интервале либо увеличивает интервал на 26% при той же помехоустойчивости. Вместе с тем, это заметно увеличит погрешность местоопределения при изменении дистанции, поскольку дублер будет перемещаться относительно рамки по дуге окружности, радиус R которой:

$$R = (1/1,26) = 0,8y.$$

Если в исходном состоянии $\theta \approx 0$, то крен рамки вокруг радиальной оси OX увеличит зенитный угол на величину крена, в результате чего измеряемое значение напряженности уменьшится и дублер приблизится к лидеру. Так, согласно (3.1) и (3.2), крен рамки на 6° снижает модуль вектора напряженности на 0,41%, а боковое смещение - на 0,14%.

7.3.2. Двухчастотный суммарно-амплитудный метод

На рисунке 7.8 приведена зависимость от координаты x модулей векторов напряженности, создаваемых двумя вертикальными рамками, лежащими в одной плоскости, при расстоянии между рамками $2b = 10$ м, на расстоянии $z = 10$ м от плоскости рамок.

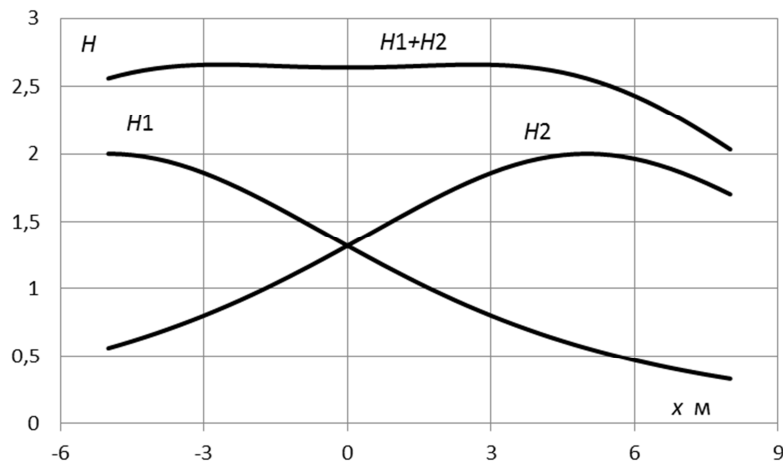


Рисунок 7.8. Зависимость суммы модулей напряженностей, создаваемых двумя рамками, от боковой координаты x при размещении рамок в одной плоскости и расстоянии $2b = 10$ м

На рисунке 7.9 приведен аналогичный график при уменьшении межрамочного расстояния $2b$ с 10 до 4 м и повороте аксиальных осей рамок в противоположных направлениях на углы $\pm 50^\circ$.

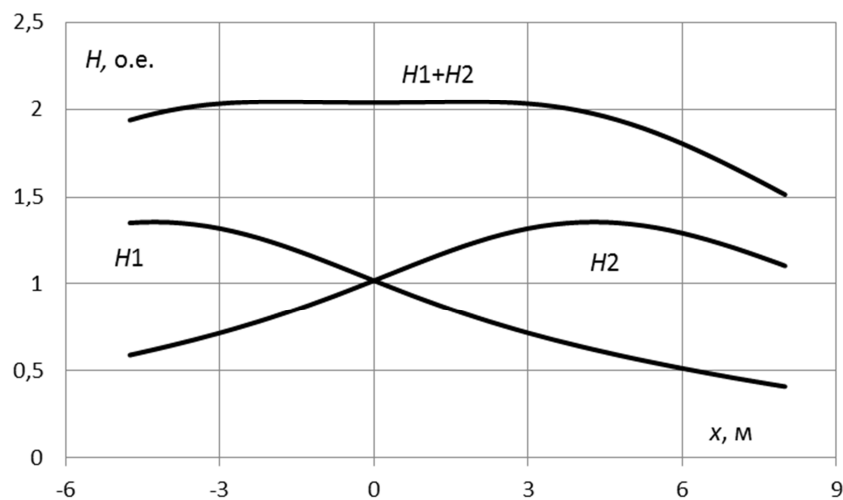


Рисунок 7.9. Зависимость суммы модулей напряженностей, создаваемых двумя рамками, от x при $z = 10$ м, $2b = 4$ м и угле между плоскостями рамок 50°

7.3.3. Одночастотный двухрамочный метод

Согласно двум предыдущим методам, напряженности суммируют арифметически. При последовательном включении обеих рамок, лежащих в одной вертикальной плоскости, и питании их одним током, напряженность суммарного поля равна векторной сумме составляющих. Вдоль срединной линии составляющие H_z однонаправленны, а составляющие H_x разнонаправленны. Если обе рамки лежат в одной плоскости, то в точке с зенитными углами рамок $\theta_1 = \theta_2 = |54,74^\circ|$ напряженность отсутствует, так как в этой точке векторы напряженности равны по величине и направлены встречно.

7.4. Определение интервала в меридиональной плоскости по проекции вектора напряженности при $\theta \approx 90^\circ$

При значении зенитного угла $\theta = 90^\circ$ вектор напряженности направлен параллельно оси OZ рамки, что позволяет определять модуль вектора напряженности по его проекции на продольную ось дублера. Учитывая (3.4) и (3.5), проекция вектора напряженности на ось OZ рамки запишется в виде:

$$H_z = \frac{\sqrt{y^2 + 4z^2}}{(y^2 + z^2)^2} \cdot \frac{2z^2 + y^2}{\sqrt{4z^4 + 5y^2z^2 + y^4}}.$$

Пусть, например, номинальное место дублера характеризуется координатами ($z = 0$; $y = 10$ м). Тогда изменение дистанции в диапазоне $z = \pm 2$ м снижает проекцию вектора напряженности на 2,1 %, а интервал – на 0,7 %, или 7 см (рис. 3.7 а).

Особенностью метода является возникновение положительной обратной связи в системе траекторного управления при расположении рамки впереди датчика проекции вектора напряженности.

Положение дублера относительно рамки устойчивое, если поворот ИП вокруг вертикальной оси не меняет его выходной сигнал, либо знак изменения совпадает со знаком изменения при линейном перемещением ИП в сторону поворота. Сказанное поясняется на рисунке 7.10, где показаны направления вектора напряженности вблизи экваториальной плоскости рамки ОХУ.

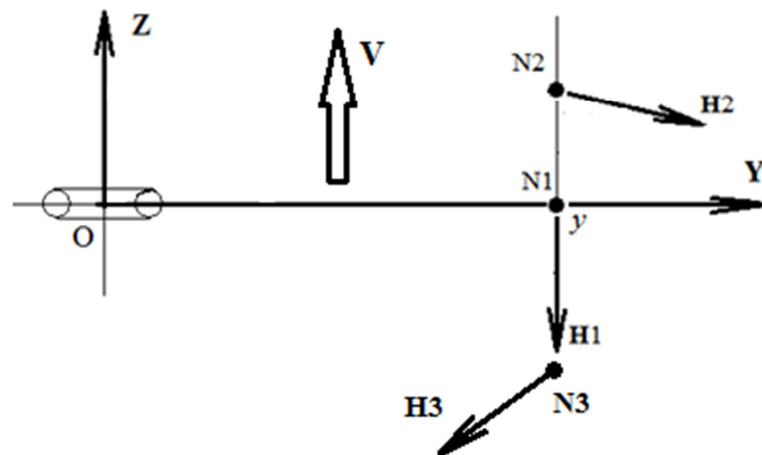


Рисунок 7.10. Устойчивость положения дублера относительно лидера

В точке N2 поворот ИП против часовой стрелки уменьшит угол между вектором напряженности и аксиальной осью, поэтому его выходной сигнал возрастет. Перемещение дублера влево, в сторону поворота ИП, также увеличивает его выходной сигнал. Поэтому положение дублера относительно рамки будет устойчивым.

В точке N1 поворот ИП в любую сторону уменьшает проекцию вектора напряженности. При повороте ИП против часовой стрелки его выходной сигнал уменьшится и система траекторного управления повернет дублер к рамке, что еще больше снизит выходной сигнал датчика напряженности – положение дублера будет неустойчивым. Еще более неустойчивым будет положение дублера при нахождении ИП в точке N3.

7.5. Определение интервала в меридиональной плоскости по проекции вектора напряженности при $\theta \approx 0$

При повороте рамки вокруг вертикальной оси на 90° ИП окажется на оси OZ рамки, напряженность возрастет в 2 раза, направление вектора напряженности изменится на 90° , соответствующие равносигнальные линии удалятся от рамки на 26%. Модуль вектора напряженности равен его проекции на поперечную ось трактора-дублера. Равносигнальные линии проекции вектора напряженности имеет форму, представленную на рисунке 3.7, а). РСЛ $H_z = \text{const}$ обладает повышенной кривизной, радиус которой менее $0,5z$, поэтому изменение дистанции между агрегатами приводит к существенному изменению интервала. Вопрос устойчивости положения дублера относительно лидера остается актуальным, хотя и в меньшей степени по сравнению с предыдущим вариантом, так как зависимость угла ψ поворота вектора напряженности от зенитного угла θ близи оси OZ рамки выражена в два раза слабее, чем вблизи оси OY.

7.6. Измерение дистанции между лидером и дублером

Измерение дистанции между агрегатами требуется для:

- регулирования скорости движения трактора-дублера с целью предотвращения столкновений или потери связи с лидером;
- корректировки чувствительности УМО с целью стабилизации зоны нечувствительности системы траекторного управления при изменении дистанции.

7.6.1. Измерение дистанции в магнитном поле горизонтальной рамки

В общем случае, если датчик напряженности смещен относительно горизонтальной рамки на x и y , сигнал рассогласования дистанции формируется по модулю вектора напряженности согласно алгоритму:

$$\delta_x = H - C = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}^3} - C,$$

где $C = \text{const}$ определяет номинальное значение дистанции.

Чувствительность измерителя дистанции:

$$K_x = \frac{d\delta_x}{dx} = \frac{3x}{\sqrt{x^2 + y^2}^5}.$$

Зависимость чувствительности от дистанции при движении агрегатов шеренгой с боковым смещением $y = 1$ отн. ед. показана на рисунке 7.11. Как видно, максимальная чувствительность измерителя наблюдается, если дистанция равна половине интервала, т. е. угол между направлением движения агрегатов и отрезком, соединяющим рамку и магнитоприемник дистанции, равен $\arctg(1/0,5) \approx 63,4^\circ$. При перемещении магнитоприемника измерителя дистанции по следу рамки $y = 0$, поэтому чувствительность обратно пропорциональна четвертой степени дистанции.

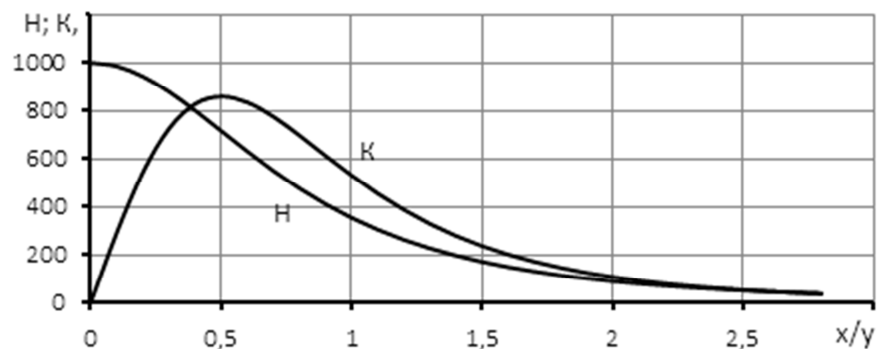


Рисунок 7.11. Чувствительность амплитудных измерителей дистанции при движении агрегатов шеренгой и $y = 1$ о.е.

Разностно-амплитудный метод измерения интервала по величине модуля или проекции вектора напряженности, описываемый в разделе 7.3. Аналогичный метод и технические средства можно использовать для измерения дистанции, расположив измерительную базу $2a$ параллельно направлению движения агрегатов. Однако рабочая зона при этом ограничивается положительными значениями динамической чувствительности, так как отрицательным значениям соответствует неоднозначность результатов измерения.

7.6.2. Измерение дистанции в магнитном поле вертикальной рамки

В магнитном поле вертикальной рамки дистанцию можно измерять:

- амплитудным методом по модулю вектора напряженности;
- амплитудным по проекции вектора напряженности;
- амплитудно-фазным методом, аналогичным описываемому в разделе 5.10;
- разностно-амплитудным, аналогичным описываемому в разделе 5.8.

Выводы по главе 7

1. При расположении рамки в вертикальной плоскости, направлении аксиальной оси рамки параллельно продольной оси трактора и использовании в качестве направляющей линии устройства местоопределения равносигнальной линии модуля вектора напряженности, изменение дистанции в диапазоне $\pm 26\%$ интервала вызывает погрешность измерения интервала не более $\pm 0,2\%$.
2. При расположении рамки в вертикальной плоскости и направлении аксиальной оси перпендикулярно к продольной оси трактора и измерении модуля вектора напряженности направляющая линия УМО представляет дугу окружности, радиус которой составляет 80% интервала.

3. При определении интервала по проекции вектора напряженности направляющая линия УМО представляет дугу окружности, радиус которой менее 50 % интервала.
4. При горизонтальном расположении рамки и изменении дистанции ведомый агрегат перемещается относительно ведущего по дуге окружности, радиус которой равен интервалу.
5. Уменьшить зависимость интервала от дистанции можно, формируя значение вторичного навигационного параметра как сумму напряженностей, создаваемых двумя и более горизонтальными рамками.
6. Две и более горизонтальные рамки можно питать токами одной или разных частот. Линию планового положения ведомого агрегата относительно ведущего можно корректировать, изменяя величину и полярность напряженности, создаваемой третьей рамкой, располагаемой между первыми двумя.
7. При определении интервала в магнитном поле вертикальной рамки по величине проекции вектора напряженности на горизонтальную ось положение дублера относительно лидера может быть неустойчивым.
8. Фактическое значение интервала можно вычислять по 2-м измеренным значениям напряженностей горизонтальной рамки.
9. На методы местоопределения дублера в магнитном поле рамки распространяется принцип взаимности перемещений – рамки и магнитоприемники (датчики напряженности) можно менять местами без заметного изменения качества местоопределения дублера.
10. При движении шеренгой измерять дистанцию можно амплитудными, разностно-амплитудными и амплитудно-фазным методами на основной либо другой частоте магнитного поля.

Глава 8. МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЕ МТА ПРИ ДУБЛЕРНОМ ВОЖДЕНИИ АГРЕГАТОВ КОЛОННОЙ

8.1. Местоопределение в плоскости рамки

8.1.1. Разностно-амплитудный метод местоопределения по модулю вектора напряженности

В плоскости горизонтальной рамки равносигнальные линии модуля вектора напряженности образуют концентрические окружности, аналогичные РСЛ длинного проводника в вертикальной плоскости, что позволяет использовать для местоопределения дублера разностно-амплитудный алгоритм (5.1):

$$\delta = H_1 - H_2 = \frac{1}{\sqrt{[(a-y)^2 + x^2]^3}} - \frac{1}{\sqrt{[(a+y)^2 + x^2]^3}}$$

Динамическая чувствительность УМО:

$$K = \frac{d\delta}{dy} = 3 \left[\frac{y+a}{\sqrt{[(y+a)^2 + x^2]^5}} - \frac{y-a}{\sqrt{[(y-a)^2 + x^2]^5}} \right].$$

На рисунке 8.1 приведены зависимости от y/a параметров УМО:

- выходных сигналов датчиков напряженности H_1 и H_2 ;
- статической чувствительности $K_{ст} = \delta/y$;
- динамической чувствительности $K_{дин} = d\delta/dy$;
- сигнала траекторного рассогласования $\delta = H_2 - H_1$.

Значения приведены в относительных единицах при $a = 1$, $x = 5a$.

Начальная чувствительность УМО при $y = 0$:

$$K = \frac{6a}{\sqrt{a^2 + x^2}^5}$$

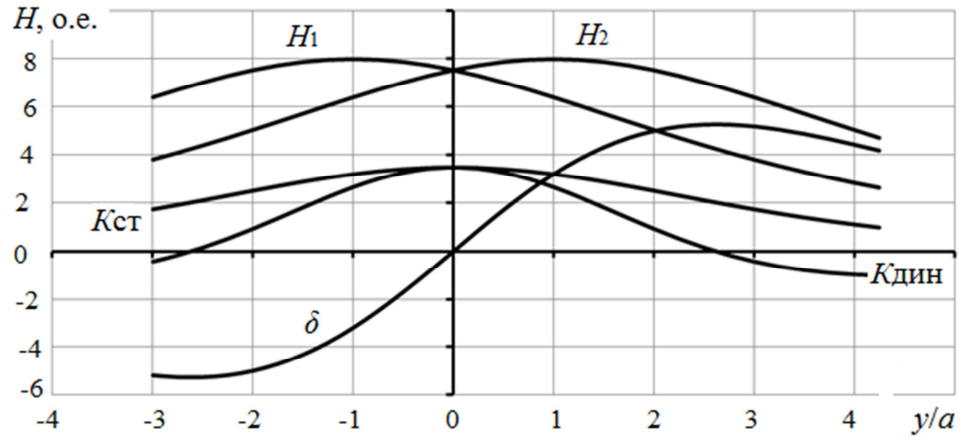


Рисунок 8.1. Параметры разностно-амплитудных УМО по модулю вектора напряженности

Зависимость начальной чувствительности УМО от длины полубазы a , приведенной к дистанции x , показана на рисунке 8.2. Максимальная чувствительность наблюдается при длине базы $2a$, равной дистанции x .

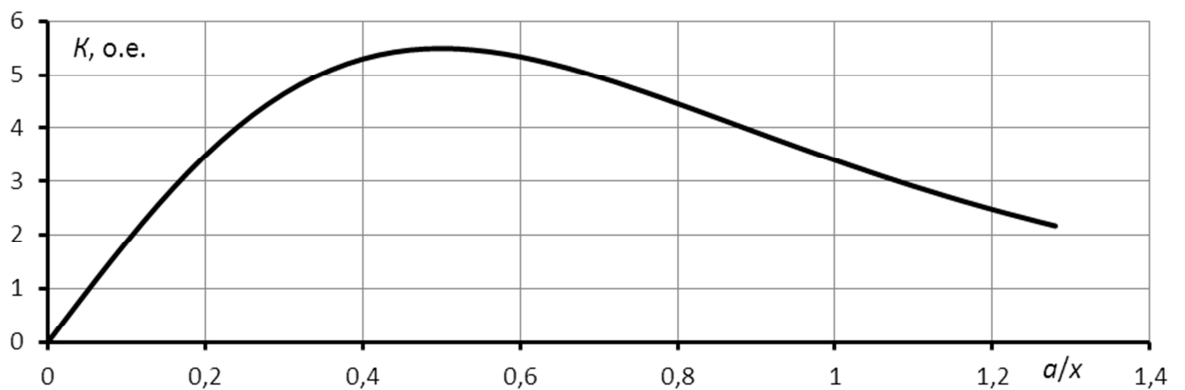


Рисунок 8.2. Зависимость чувствительности УМО от a при $y = 0, x = 5$ м

Мультипликативная погрешность местоопределения возникает при неодинаковых коэффициентах передачи датчиков напряженности. Приняв $K_1 = 1$ отн. ед. и обозначив $K_2/K_1 = C$, для сигнала рассогласования в этом случае можно записать:

$$\delta = H_1 - CH_2 = \frac{1}{r_1^3} - \frac{C}{r_2^3} = \frac{1}{\sqrt{(a-y)^2+x^2}^3} - \frac{C}{\sqrt{(a+y)^2+x^2}^3}.$$

Линия возможного взаимного положения лидера и дублера удовлетворяет условию $\delta = 0$; эта линия описывает окружность:

$$y^2 + x^2 + 2ay \frac{C^{2/3} + 1}{C^{2/3} - 1} + a^2 = 0,$$

радиус которой:

$$R = 2a \frac{C^{2/3}}{1 - C^{2/3}},$$

а центр лежит на оси ОУ, на расстоянии $y_{\text{ц}}$ от центра рамки:

$$y_{\text{ц}} = \frac{C^{2/3} + 1}{1 - C^{2/3}} a.$$

Зависимость боковой координаты y от значений C и a :

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

Решения этого уравнения числовым методом при $a = 1$ и $C = 1,01; 1,02; 1,03$ показаны на рисунке 8.3.

Аддитивная погрешность возникает при наличии дрейфа нуля УМО, и соответствует алгоритму местоопределения:

$$\delta = H_1 - H_2 \pm C = \frac{1}{\sqrt{[(a-y)^2 + x^2]^3}} - \frac{1}{\sqrt{[(a+y)^2 + x^2]^3}} \pm C.$$

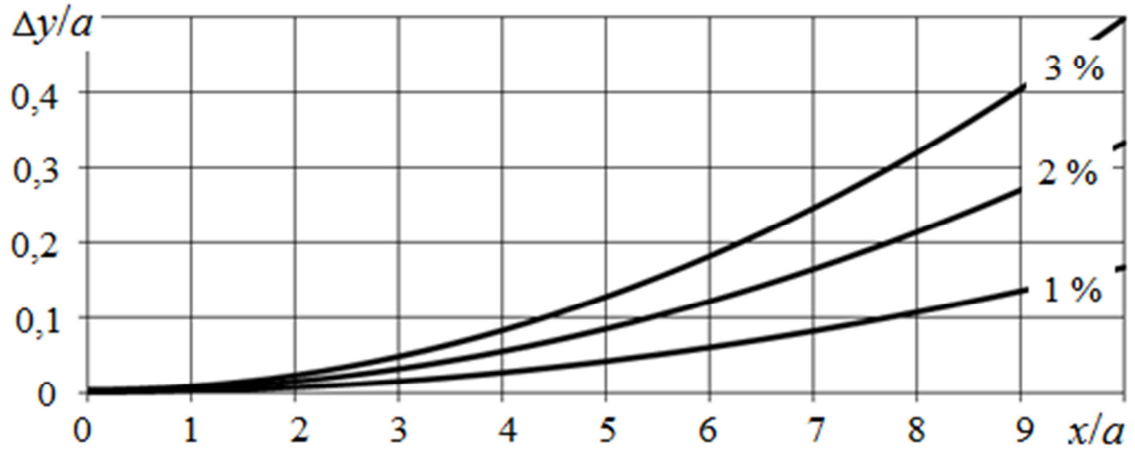


Рисунок 8.3. Зависимость Δy от x/a и C

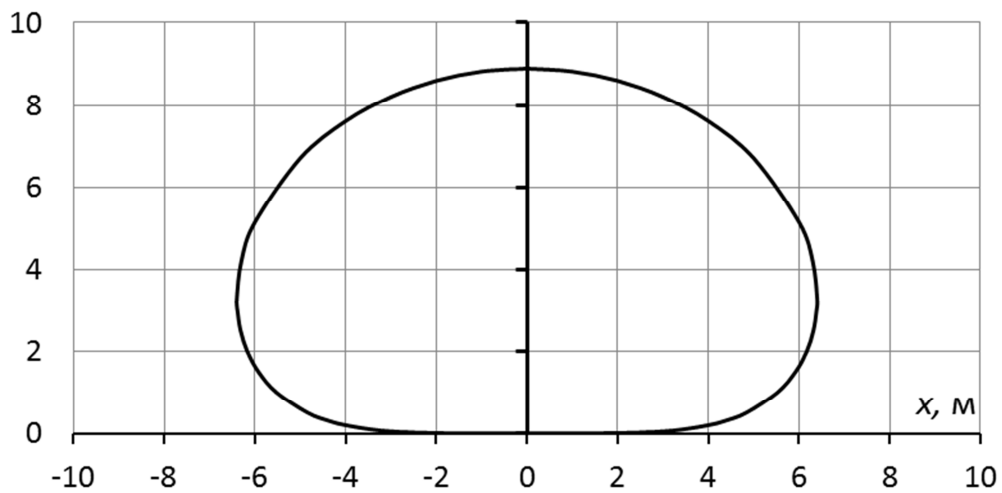


Рисунок 8.4. Линия возможного положения дублера относительно лидера при наличии аддитивной погрешности, равной напряженности магнитного поля в точке с координатами $y = 0$, $x = 10$ м, при $2a = 2$ м

На рисунке 8.4 приведена форма линии возможного положения магнитоприемника относительно рамки при значениях $a = 1$ м и C , равном напряженности магнитного поля в точке с координатами $y = 0, x = 10$ м; движение агрегатов в направлении оси ОХ рамки.

При одновременном наличии разнополярных мультипликативной и аддитивной погрешностей линия возможного положения принимает бобовидную форму, а при однополярных – каплевидную.

8.1.2. Двухрамочный метод местоопределения по модулю вектора напряженности

На основании принципа взаимности перемещений на месте датчиков напряженности можно расположить две горизонтальные противофазные рамки, а на месте рамки – датчик модуля вектора напряженности суммарного поля. При этом качество местоопределения сохранится неизменным, если рамки расположены на дублере, а напряженность на лидере измеряется амплитудно-фазным методом.

8.1.3. Разностно-амплитудный метод измерения интервала по проекции вектора напряженности на вертикальную ось

Местоопределение по величине проекции вектора напряженности на вертикальную ось позволяет формировать сигнал траекторного рассогласования как разность проекций вектора напряженности на вертикальные оси, без вычисления модулей. Качество местоопределения при этом примерно такое же, как по модулю, а реализация заметно проще.

8.1.4. Импульсно-фазовый метод

Квазиволновое магнитное поле, создаваемое токами двух горизонтальных рамок, рассмотрено в разделе 4.8. Там же в таблице 4.8 показана зависимость фазового сдвига от координат точки измерения напряженности магнитного поля 2-х рамок, рисунок 8.5.

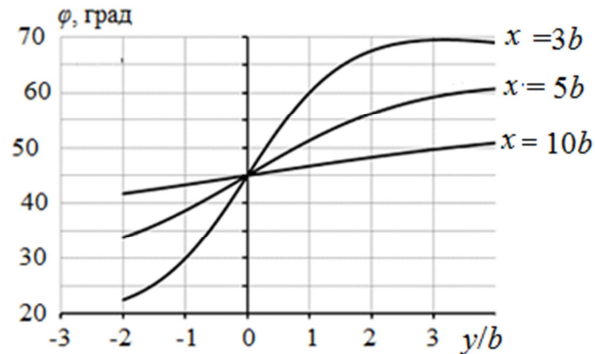


Рисунок 8.5. Зависимость фазового сдвига квазиволнового магнитного поля рамок от бокового смещения y/b

На оси OZ, в точках с координатами $z = 3,562b$ и $z = 0,562b$ векторы напряженности обеих рамок образуют с вертикалью углы $\pm 45^\circ$, поэтому в этих точках магнитное поле обладает круговой поляризацией, так как векторы напряженности взаимно-перпендикулярны и равны по модулю. В точке с координатой $z = 1,414b$ поле линейно поляризовано, причем вектор напряженности направлен параллельно базе $2b$.

Метод может быть реализован устройством, аналогичным изображенному на рисунке 6.4. Основное отличие заключается в замене датчика пути датчиком дистанции, и применении иной программы вычислений. Так как расстояние между агрегатами незначительное, то для передачи опорной фазы может использоваться любой маломощный канал связи.

8.2. Определения интервала в меридиональной плоскости рамки

При движении агрегатов колонной и расположении рамки в вертикальной плоскости интервал между ведущим и ведомым агрегатами можно определять методами:

1. двухточечным разностно-амплитудным по модулю вектора напряженности;
2. двухточечным разностно-амплитудным по проекции вектора напряженности;
3. двухточечным разностно-амплитудным по модулю проекции вектора напряженности;
4. одноточечным разностно-амплитудным по проекции вектора напряженности;
5. одноточечным разностно-амплитудным по модулю проекции вектора напряженности;
6. одноточечным амплитудно-фазным.

При этом качество местоопределения зависит от пространственной ориентации аксиальной оси OZ рамки, так как напряженность магнитного поля в меридиональной плоскости зависит от зенитного угла θ .

8.2.1. Определение интервала разностно-амплитудными методами по модулю вектора напряженности при $\theta \approx 0$

Данный метод применим для местоопределения дублера относительно оси OZ рамки, которую следует располагать параллельно продольной оси ведущего МТА. При этом значение координаты z описывает дистанцию между агрегатами. Алгоритм формирования сигнала траекторного рассогласования по модулю вектора напряженности двухточечным разностно-амплитудным методом в прямоугольной системе координат, связанной с рамкой:

$$\delta = H_1 - H_2 = \frac{\sqrt{1 + 3\cos^2\theta_1}}{\sqrt{(a+y)^2 + z^2}^3} - \frac{\sqrt{1 + 3\cos^2\theta_2}}{\sqrt{(a-y)^2 + z^2}^3} =$$

$$= \frac{\sqrt{4z^2 + (a+y)^2}}{[z^2 + (a+y)^2]^2} - \frac{\sqrt{4z^2 + (a-y)^2}}{[z^2 + (a-y)^2]^2}.$$

Зависимость параметров УМО от интервала y при дистанции $z = 5$ м и измерительной базе $2a = 2$ м приведена на рисунке 8.6.

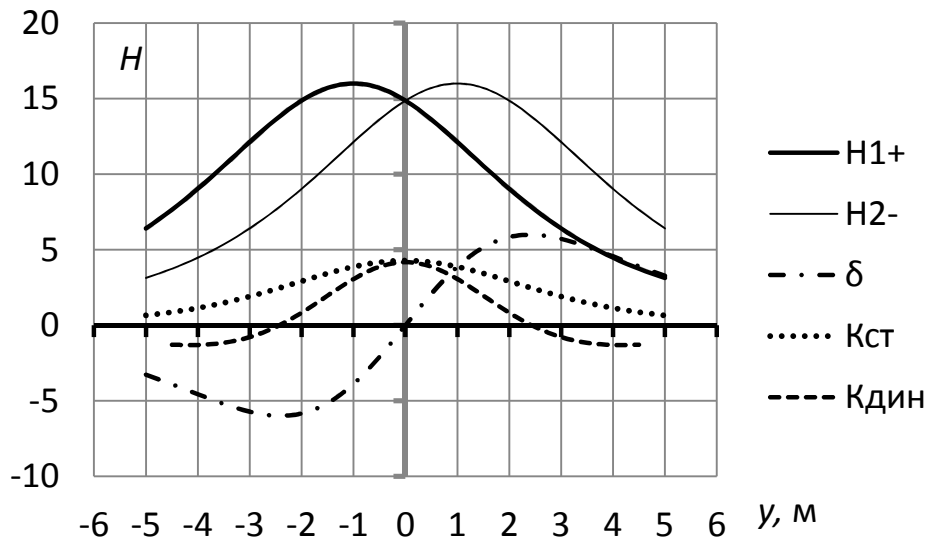


Рисунок 8.6. Параметры разностно-амплитудных УМО по модулю вектора напряженности при $z = 5$ м, $2a = 2$ м

Зависимость начальной чувствительности разностно-амплитудных устройств местоопределения по модулю вектора напряженности от дистанции при $2a = 2$ м определена числовым методом и приведена на рисунке 8.7. Как видно, чувствительность обратно-пропорциональна дистанции в четвертой – пятой степени.

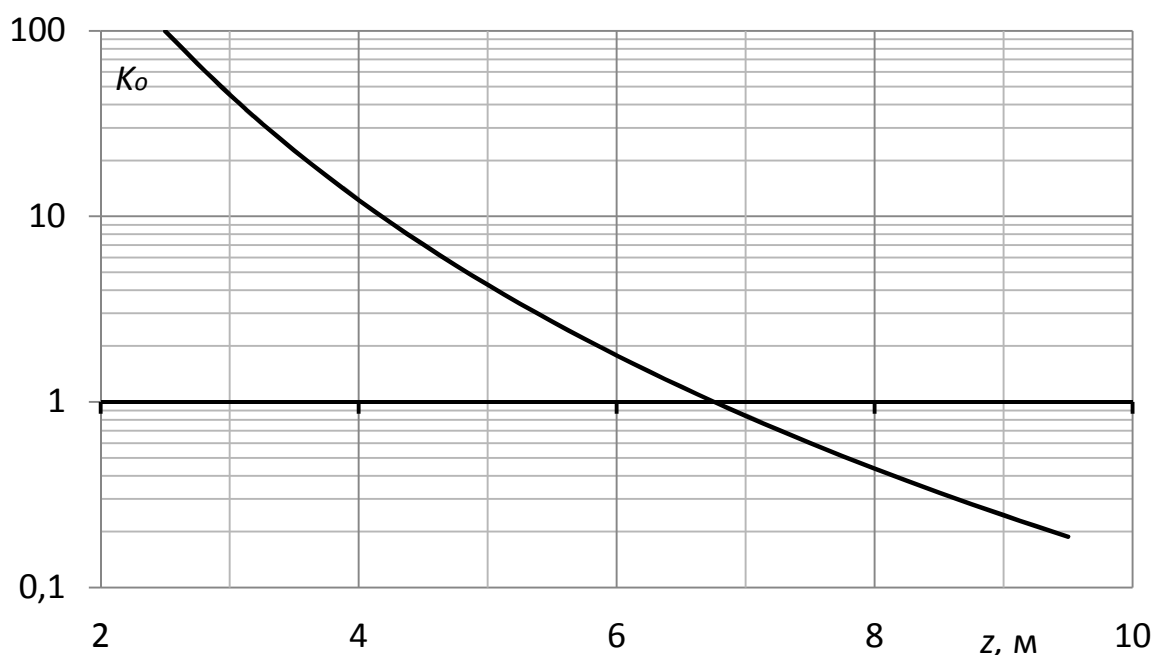


Рисунок 8.7. Зависимость начальной чувствительности K_0 разностно-амплитудных УМО по модулю вектора напряженности от дистанции z при $2a = 2$ м, отн. ед.

8.2.2. Двухточечный разностно-амплитудный метод местоопределения по проекции вектора напряженности

Предыдущий метод можно реализовать, измеряя проекции векторов напряженности на заданные направления в горизонтальной плоскости. Алгоритм формирования сигнала траекторного рассогласования:

$$\delta = H_{\gamma_1} - H_{\gamma_2}.$$

Проекция вектора напряженности на направление, образующее угол γ с осью OZ рамки, описывается уравнением:

$$H_\gamma = \frac{\sqrt{4z^2 + (a + y)^2}}{[z^2 + (a + y)^2]^2} \cos(\psi - \gamma),$$

поэтому алгоритм формирования сигнала траекторного рассогласования:

$$\delta = \frac{\sqrt{4z^2 + (a + y)^2}}{[z^2 + (a + y)^2]^2} \cos(\psi_1 - \gamma_1) - \frac{\sqrt{4z^2 + (a - y)^2}}{[z^2 + (a - y)^2]^2} \cos(\psi_2 - \gamma_2),$$

где z - дистанция между рамкой и магнитоприемником,

ψ - угол наклона вектора напряженности к оси OZ рамки:

$$\psi = \theta + \operatorname{arctg}(0,5\operatorname{tg}\theta) = \operatorname{arctg} \frac{3(a \pm y)z}{2z^2 - (a \pm y)^2}.$$

На рисунке 8.8 приведены зависимости H_γ от величины угла γ и интервала y при $z = 1$ о. е., $a = 0$; значения углов γ указаны над кривыми.

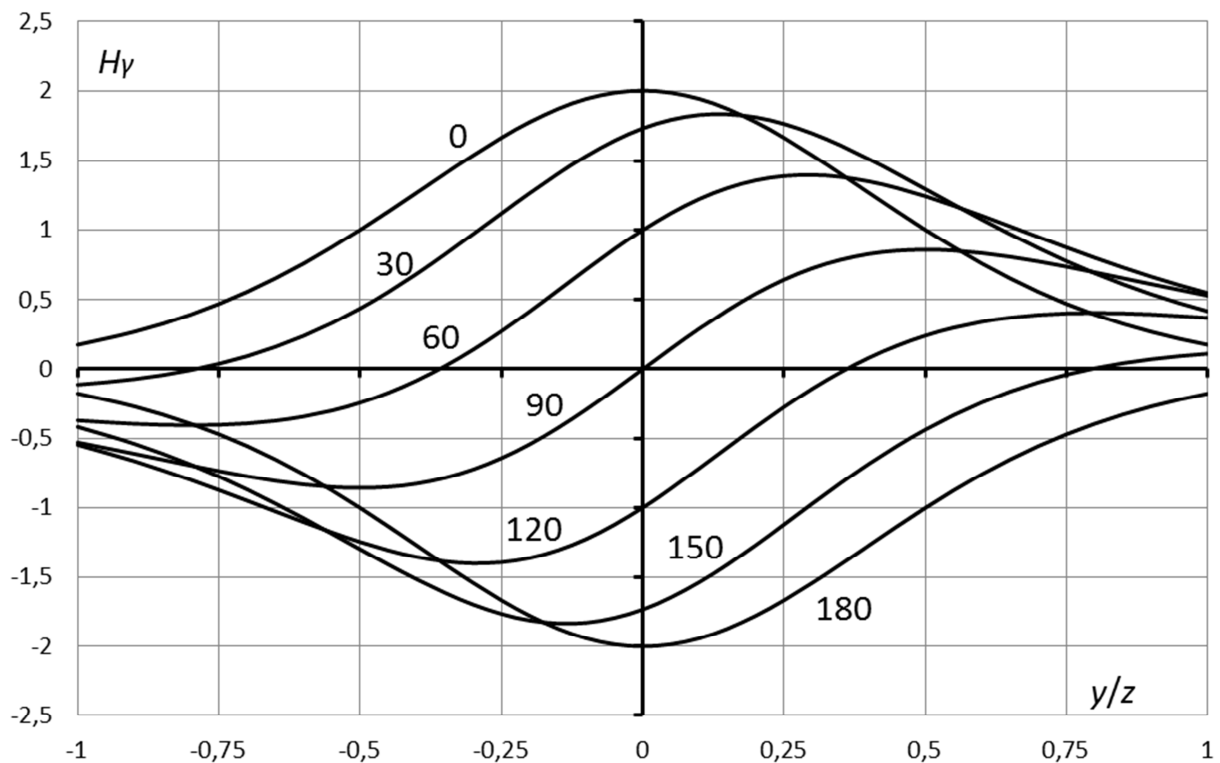


Рисунок 8.8. Зависимость проекции вектора напряженности от направления оси проекции γ и расстояния y до оси OZ рамки

Зависимость сигнала траекторного рассогласования $\delta = H_{\gamma_1} - H_{\gamma_2}$ от взаимного бокового смещения y при $2a = 2$ м, $z = 5$ м и углах проекций $\pm\gamma$ показана на рисунках 8.9 и 8.10.

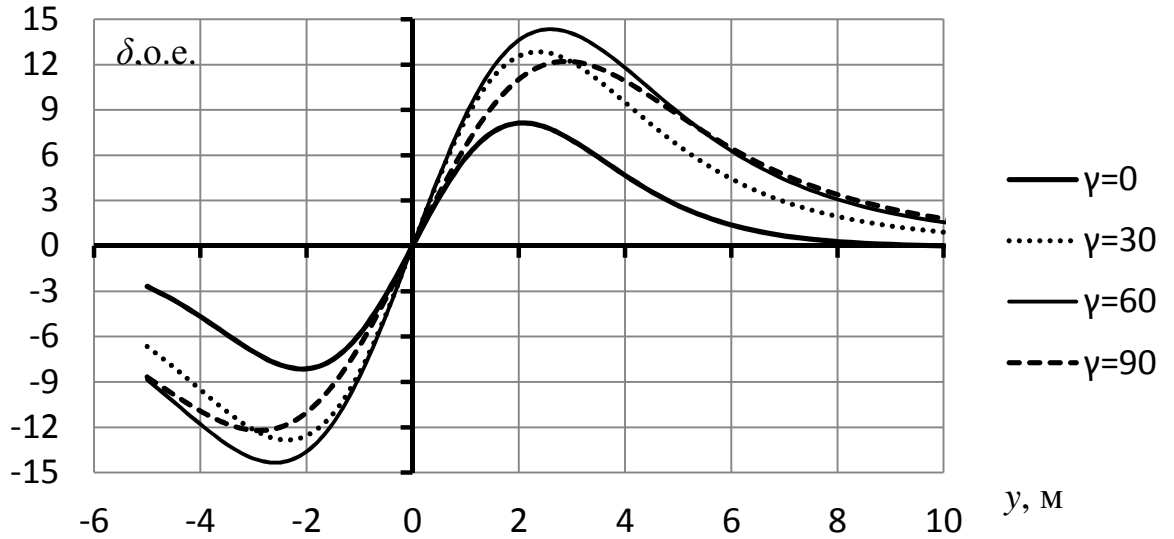


Рисунок 8.9. Зависимость сигнала δ от y и углов $\pm\gamma$ при $2a = 2$ м, $z = 5$ м

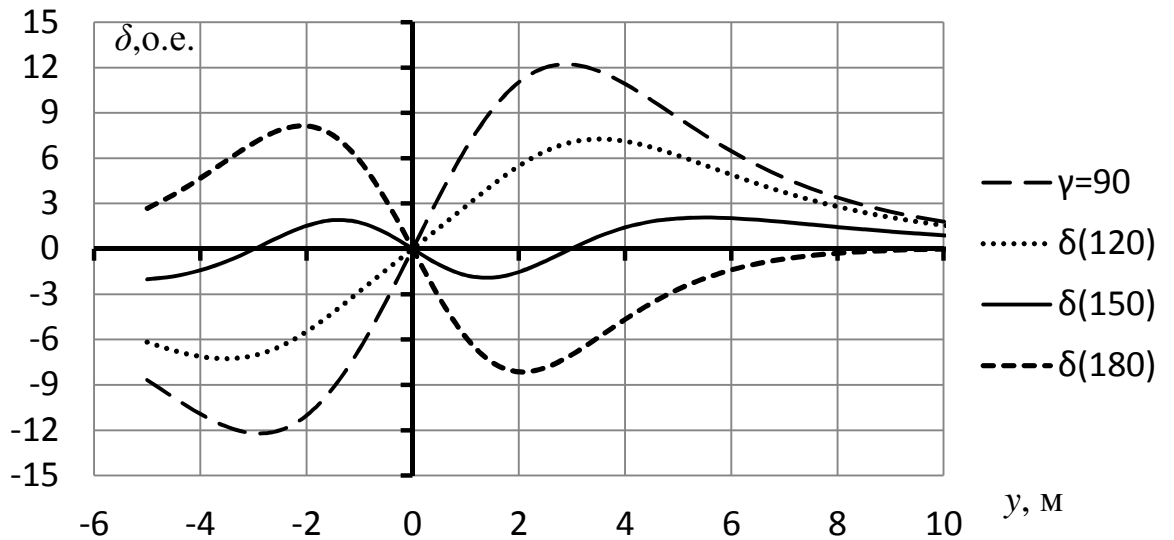


Рисунок 8.10. Зависимость сигнала δ от y и углов $\pm\gamma$ при $2a = 2$ м, $z = 5$ м

На рисунке 8.11 приведены те же зависимости при $2a = 0$, т.е. для одно-точечного варианта разностно-амплитудного метода местоопределения по величине и знаку проекций вектора напряженности.

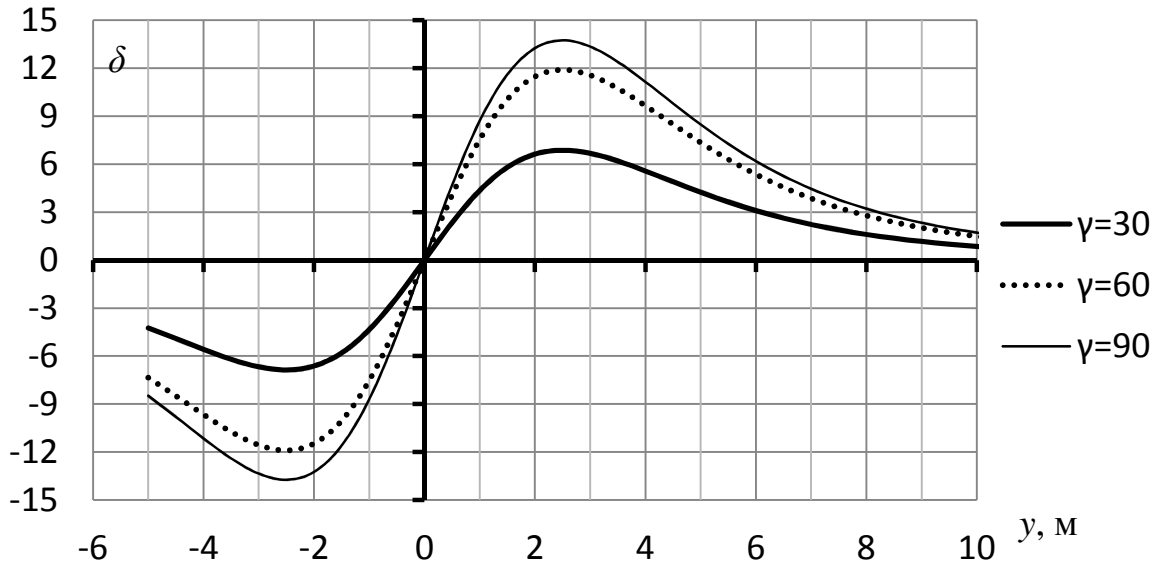


Рисунок 8.11. Зависимость сигнала траекторного рассогласования δ одноточечного разностно-амплитудного метода местоопределения по величине проекций вектора напряженности от углов проекции $\pm\gamma$

8.2.3 Местоопределение по модулю проекции вектора напряженности

Методы местоопределения в меридиональной плоскости можно реализовать по модулю проекций, без учета фазы выходного сигнала датчиков напряженности; на рисунке 8.12 приведены параметры УМО по модулю проекций при $\gamma = \pm 45^\circ$, $z = 5$ м, $2a = 2$ м.

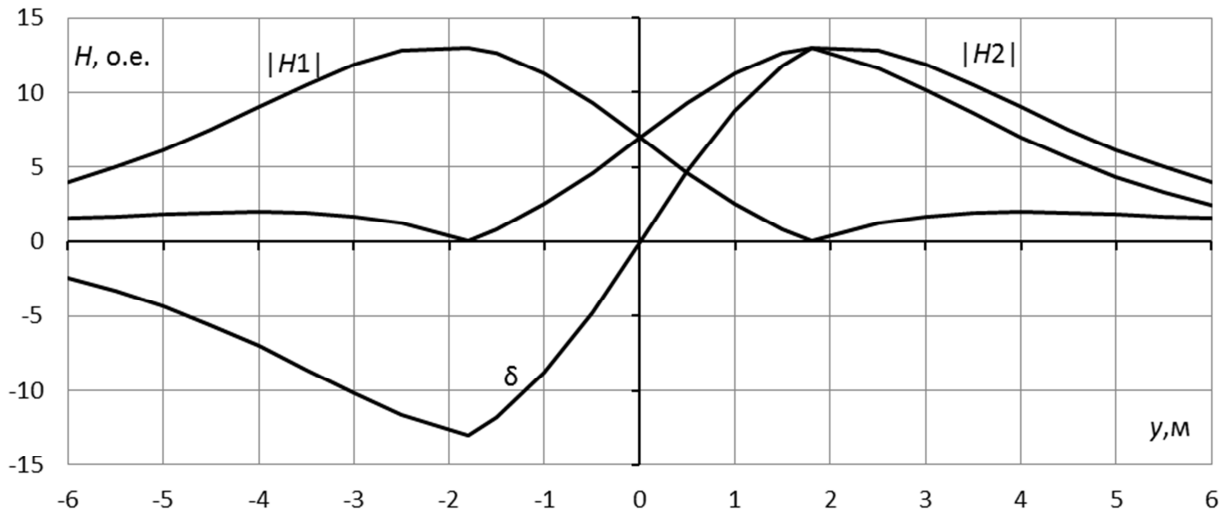


Рисунок. 8.12. Зависимость модуля проекции вектора напряженности от расстояния y до оси OZ рамки при $\gamma = \pm 45^\circ$, $z = 5$ м, $2a = 2$ м

8.2.4. Амплитудно-фазный метод местоопределения

Амплитудно-фазный метод формирует сигнал траекторного рассогласования непосредственно по величине и фазе проекции вектора напряженности на аксиальную ось индукционного преобразователя, рисунок 8.8, кривая $\gamma = 90^\circ$; как все односточечные методы, он ориентирует дублер относительно силовых линий поля рамки.

Пусть измерительная система координат $OXYZ$ совмещена с вертикальной рамкой на лидере, и ось OZ рамки направлена параллельно продольной оси трактора. Тогда при движении «след в след» проекции вектора напряженности на поперечную и продольную оси дублера:

$$H_y = \delta = \frac{\sqrt{y^2 + 4z^2}}{(y^2 + z^2)^2} \cdot \frac{3yz}{2z^2 - y^2} \cdot \frac{2z^2 - y^2}{\sqrt{4z^4 + 5y^2z^2 + y^4}},$$

$$H_z = \frac{\sqrt{y^2 + 4z^2}}{(y^2 + z^2)^2} \cdot \frac{2z^2 - y^2}{\sqrt{4z^4 + 5y^2z^2 + y^4}}.$$

Результаты численного решения этих уравнений приведены на рис. 8.13.

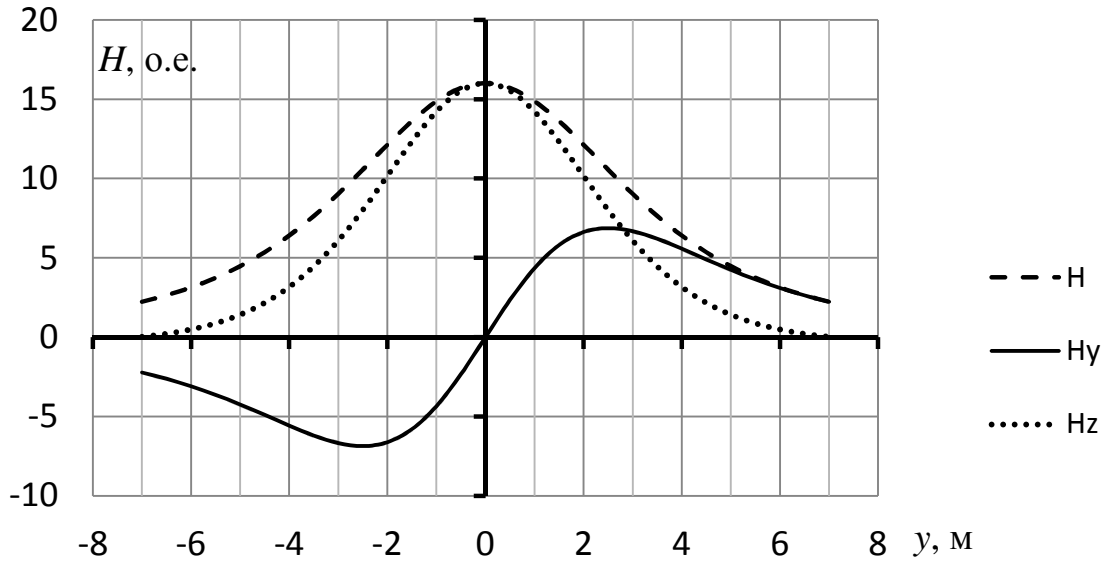


Рисунок 8.13. Зависимость модуля H и проекций $\delta = H_y$ и H_z от траекторного рассогласования y при $z = 5$ м

Зависимость статической и динамической чувствительности от интервала приведена на рисунке 8.14.

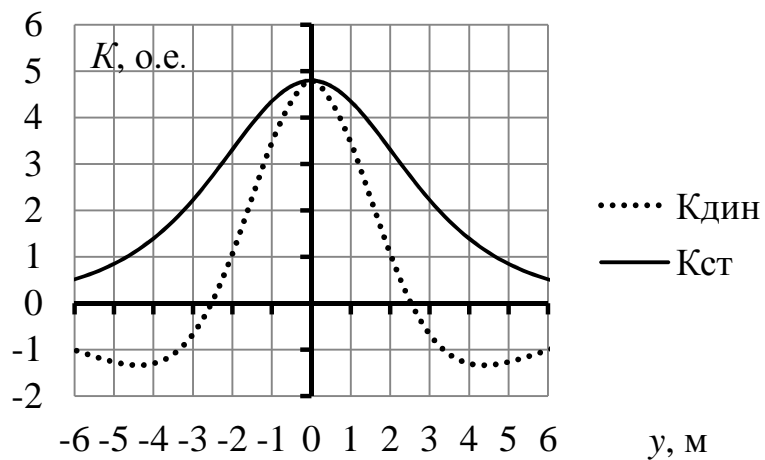


Рисунок 8.14. Зависимость чувствительности от интервала при $z = 5$ м

Начальная чувствительность УМО зависит от дистанции z обратно пропорционально четвертой степени, таблица 8.2.

Табл. 8.2. Зависимость начальной чувствительности УМО от дистанции z

$z, м$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$K, о.е.$	187	37	11,7	4,8	2,314	1,25	0,732	0,457	0,3	0,205

Ширина рабочей зоны амплитудно-фазных УМО может ограничиваться не только сигнальным, но и опорным напряжениями, снимаемыми с выходов сигнального и опорного индукционных преобразователей. Так, график на рисунке 8.13 показывает, что при боковом смещении более 3-х метров проекция H_z меньше H_y , что при прочих равных условиях может нарушить нормальную работу фазочувствительного выпрямителя.

Рамку можно повернуть вокруг вертикальной оси на 90° – датчик напряженности окажется в плоскости рамки, поэтому его также необходимо повернуть вокруг вертикальной оси на 90° . При этом величина модуля вектора напряженности уменьшится в 2 раза, однако зависимость угла ψ от θ возрастет в 2 раза, поэтому в итоге качество местоопределения сохранится неизменным.

8.3. Инверсные методы определения взаимного положения агрегатов

Все индукционные методы местоопределения дублера могут быть реализованы в инверсном варианте, при расположении источника магнитного поля на дублере, а магнитоприемника – на лидере. В этом случае сигнал траекторного рассогласования формируется на ведущем агрегате и передается на ведомый. Такое расположение навигационного оборудования может быть целесообразным, например, если оператор находится в кабине трактора ведущего

агрегата и возникает необходимость оперативного вмешательства в работу системы траекторного управления ведомым агрегатом.

8.4. Кинематика дублирного вождения ведомого агрегата

В первой главе сообщалось о явлении бокового скольжения тракторных агрегатов, что требует для повышения точности траекторного управления приводить сигнал траекторного рассогласования к точке прицепа технологической машины-орудия. Другим источником погрешности траекторного управления может стать непрямолинейность направляющих линий, что особенно заметно на примере дублирного вождения группы агрегатов на поворотной полосе [35].

Пусть агрегаты движутся колонной, ведомый агрегат располагается за ведущим, интервал измеряется двухточечным разностно-амплитудным методом по модулю вектора напряженности магнитного поля горизонтальной рамки. Тогда в любой момент времени продольная ось дублера проходит через рамку, поэтому при любых изменениях траектории рамки дублер будет перемещаться по «линии погони», «срезая» все неровности траектории лидера, рисунок 8.15.

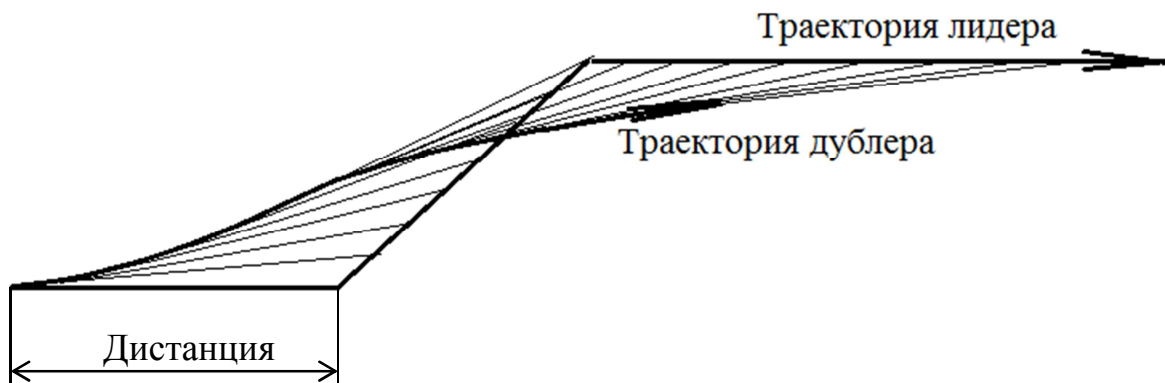


Рисунок 8.15. Кинематическая траектория дублера при самоопределении и изломе траектории лидера

Если продольная ось дублера проходит через рамку, то сигнал траекторного рассогласования зависит от расстояния между рамкой и продольной осью дублера, и не зависит от курсового угла ведущего агрегата, т.е от угла поворота рамки вокруг вертикальной оси, проведенной через центр рамки. Это позволяет интерпретировать привязку измерительной системы координат к трактору-дублеру, когда начало системы координат совмещено с магнитоприемником, и называть такое местоопределение «самоопределением». При самоопределении сигнал траекторного рассогласования зависит от курсового угла дублера и не зависит от курсового угла лидера.

При самоопределении положение дублера устойчивое только за лидером, так как переднее расположение дублера неустойчивое – знак сигнала рассогласования при повороте дублера, например, вправо, противоположный знаку рассогласования при линейном отклонении дублера вправо.

Рамку и магнитоприемник, которые при самоопределении располагаются соответственно на лидере и дублере, можно поменять местами – магнитоприемник расположить на лидере, а рамку на дублере. При этом сигнал траекторного рассогласования по-прежнему будет определяться отклонением рамки относительно оси симметрии магнитоприемника, то-есть относительно продольной оси лидера. Такое местоопределение можно назвать «иноопределением», так как измерительная система координат располагается на лидере, вне управляемого трактора-дублера.

При иноопределении изменение курсового угла дублера не оказывает влияния на величину сигнала траекторного рассогласования. Поэтому теоретически дублер может располагаться как за лидером, так и перед ним, что упрощает визуальное наблюдение, если оператор находится в кабине трактора ведущего агрегата. Но препятствием такому взаимному расположению агрегатов могут стать конструктивные затруднения, возникающие в связи с необходимостью размещения рамки перед дублером.

Кинематическая траектория дублера, движущегося за лидером при иноопределении, показана на рисунке 8.16. Как видно, при иноопределении заметно снижается вероятность столкновения дублера с препятствием, объезжаемым лидером, что позволяет применять его при переездах, например – на поворотной полосе.



Рисунок 8.16. Движение агрегатов по криволинейной траектории при иноопределении

При местоопределении односточными методами в магнитном поле вертикальной рамки и размещении рамки на лидере система автоматического траекторного управления ориентирует дублер относительно магнитных силовых линий, стабилизируя заданный угол между продольной осью дублера и касательной к магнитной силовой линии, которая проходит в данный момент через магнитоприемник. При этом сигнал траекторного рассогласования зависит от курсового угла обоих агрегатов – поворот рамки изменяет величину угла ψ , а поворот дублера изменяет значения углов γ . Такое формирование сигнала траекторного рассогласования занимает промежуточное положение между само- и иноопределением, что видно на примере местоопределения дублера в магнитном поле вертикальной рамки амплитудно-фазным методом, рисунок 8.17; рас-

считывается ориентация дублера относительно линий, ортогональных силовым.



Рисунок 8.17. Ориентация дублера вдоль линий, ортогональных силовым

Нормально дублер находится на оси OX вертикальной рамки, перемещаемой в направлении вектора скорости V . Если дублер по какой-либо причине переместится с плоскости рамки, например, в точку 1, то его продольная ось уйдет с рамки O и пересечется с плоскостью рамки в точке 2.

При движении агрегатов по криволинейной траектории продольная ось дублера пересекает плоскость рамки под углом, который примерно в 3 раза превышает значение угла $(90-\theta)$. В частности, если зенитный угол $\theta \approx 54^\circ$, то дублер займет положение, перпендикулярное к направлению движения лидера. Если дублер ориентируется вдоль силовых линий, то продольная ось дублера будет отклоняться от центра рамки на угол примерно в 2 раза меньше, поскольку вблизи оси OZ рамки зависимость угла ψ от зенитного θ в 2 раза меньше, чем вблизи плоскости рамки.

«Комбинированное» местоопределение можно рассматривать как самоопределение, при котором положение ориентира на лидере не сохраняется постоянным, а зависит от величины траекторного рассогласования – чем она больше, тем дальше от ведущего агрегата по его продольной оси перемещается рамка.

Достоинством комбинированного местоопределения является более точное копирование траектории лидера и более быстрый по сравнению с самоопределением переход дублера на новую траекторию.

8.5. Автономное управление траекторией ведомого агрегата

Повысить точность автоматического вождения ведомого агрегата по криволинейным траекториям можно, определяя местоположения лидера и дублера в глобальной или местной стационарной системе координат, и используя в качестве плановых значений вторичного навигационного параметра дублера фактические значения вторичного навигационного параметра лидера. По существу, при этом координаты точек фактической траектории лидера являются программой плановой траектории дублера, что обеспечивает высокую повторяемость траекторий лидера и дублера. Аналогом может служить метод местоопределения, используемый в системах «параллельного вождения» применительно к одному и тому же агрегату для программирования очередного прохода.

Выводы по главе 8

1. При движении агрегатов колонной и горизонтальном положении рамки взаимное боковое смещение агрегатов можно определять разностно-амплитудными методами по величине модуля, проекции либо модуля проекции вектора напряженности на вертикальную ось.
2. При расположении горизонтальной рамки на ведущем агрегате-лидере и движении по кривой траектория дублера сглаживает искривления траектории лидера.
3. Чувствительность устройств местоопределения в плоскости рамки обратно пропорциональная дистанции в четвертой-пятой степени. Поэтому изменение дистанции в 2 раза может изменить ширину зоны нечувствительности системы траекторного управления до 30 раз.
4. Взаимное положение лидера и дублера можно определять импульсно-фазовым методом при горизонтальном расположении рамок. При этом дублер сглаживает искривления траектории лидера, когда рамки расположены на дублере, и усиливает, если рамки на лидере.
5. При вертикальном расположении рамки на лидере сигнал рассогласования можно формировать двухточечными и однотоочечными методами. В последнем случае сигнал траекторного рассогласования зависит от курсовых углов лидера и дублера, криволинейные траектории которых наиболее близки.
6. Полное совпадение криволинейных траекторий лидера и дублера может обеспечить местоопределение обоих агрегатов в неподвижной системе координат, и использование запомненных координат лидера в качестве программы плановой траектории дублера, вне зависимости от величины дистанции между ними.

Краткое резюме

Предметом индукционной сельскохозяйственной навигации является программирование плановых и определение фактических траекторий МТА при помощи низкочастотных магнитных полей, создаваемых стационарными и мобильными источниками. Основные положения индукционной сельхознавигации следующие:

1. Навигационные переменные магнитные поля характеризуются параметрами вектора напряженности магнитного поля:
 - модулем;
 - пространственной ориентацией;
 - фазовым сдвигом относительно опорной фазы.
2. В целях местоопределения МТА значимыми являются три вида навигационных параметров: измеряемый, первичный и вторичный.
 - Измеряемым параметром навигационного магнитного поля является проекция вектора напряженности на аксиальную ось индукционного преобразователя.
 - В качестве первичного навигационного параметра устройств местоопределения могут использоваться:
 - модуль вектора напряженности;
 - проекция вектора напряженности;
 - модуль проекции вектора напряженности.
 - Плановое значение вторичного навигационного параметра программирует плановую траекторию МТА; фактическое значение вторичного навигационного параметра вычисляется согласно заданному алгоритму по результатам определения первичных параметров.

3. Плановые значения вторичных навигационных параметров могут вычисляться либо непосредственно в процессе движения МТА, либо заблаговременно и храниться в табличном виде.
4. Плановые значения вторичных навигационных параметров могут формироваться в табличном виде при предыдущем смежном проходе МТА; в этом случае каждый проход МТА программирует плановую траекторию следующего прохода.
5. Переменные магнитные поля позволяют программировать плановые траектории МТА с помощью физических и геометрических направляющих линий:
 - физические направляющие линии представляют геометрическое место точек, обладающих одинаковым значением вторичного навигационного параметра по всей длине гона.
 - геометрические направляющие линии представляют геометрическое место точек с меняющимся по длине гона плановым значением вторичного навигационного параметра.
6. Формирование сигнала рассогласования устройством местоопределения состоит в сравнении планового и фактического значений вторичных навигационных параметров.
7. Навигационные магнитные поля создаются стационарными и мобильными источниками. Стационарные источники – индукторы – могут быть выполнены в виде:
 - заземленного проводника конечной длины;
 - двух заземленных проводников конечной длины;
 - четырехсторонней петли;
 - двух разнесенных в пространстве петель;
 - двух соприкасающихся петель;
 - двух перекрывающихся петель с одной общей стороной.

8. Мобильные индукторы могут быть выполнены в виде:
 - одной горизонтальной многовитковой рамки;
 - двух и более горизонтальных рамок в одной плоскости;
 - вертикальной рамки;
 - двух вертикальных рамок.
9. Питание источников магнитного поля может осуществляться токами:
 - синфазными;
 - противофазными;
 - с взаимным сдвигом по фазе;
 - разных частот.
10. При питании двух проводников, петель или рамок токами одной частоты, но сдвинутыми взаимно по фазе на угол $0 < \varphi < 180^\circ$, фазовый фронт суммарного магнитного поля перемещается между проводниками, что позволяет называть его «квазиволновым».
11. Фазовая скорость квазиволнового навигационного магнитного поля составляет единицы – десятки км/с, что позволяет определять место нахождения МТА импульсно-фазовым методом, аналогичным фазовому радионавигационному.
12. Вне плоскости проводов квазиволновое магнитное поле эллиптически поляризованное, поэтому его фазу целесообразно определять по квадрату мгновенного значения модуля вектора напряженности.
13. При реализации импульсно-фазового метода местоопределения значение фазового сдвига можно определять, питая провода несинусоидальным током и измеряя фазовый сдвиг между полями основной и одной из высших гармоник магнитного поля.
14. Земля обладает конечным электрическим сопротивлением, поэтому в ней протекают токи индукции, создающие вторичное магнитное поле. Вторичное магнитное поле отстает от первичного по фазе на угол $90^\circ < \varphi < 180^\circ$. При этом активная составляющая вторичного магнитного поля

обусловлена индуктивным сопротивлением земли, а реактивная составляющая – активным сопротивлением.

15. Суммарное магнитное поле прямого тока и тока индукции в электрически однородной земле принято называть «нормальным»; нормальное поле эллиптически поляризованное, так как его составляющие не совпадают ни в пространстве, ни по фазе.
16. Для математического описания траектории МТА целесообразно использовать две системы координат – подвижную и неподвижную. Неподвижная представляет программу плановой траектории на местности, а подвижная связана с МТА и используется для описания зависимости сигнала траекторного рассогласования от боковой координаты точки копирования программы плановой траектории.
17. Для математического описания дублирного вождения агрегатов целесообразно использовать три системы координат:
 - одна характеризует навигационное магнитное поле и описывает зависимость интервала от дистанции при прямолинейном движении агрегатов;
 - вторая является измерительной и описывает зависимость сигнала траекторного рассогласования от интервала;
 - третья описывает траекторию дублера при движении лидера по заданной криволинейной траектории.
18. При расположении начала измерительной системы координат на дублере и жесткой привязке точки копирования программы плановой траектории к лидеру имеет место «самоопределение» дублера, траектория которого сглаживает искривления траектории лидера.
19. При расположении начала измерительной системы координат на лидере и жесткой привязке точки копирования программы плановой траектории к дублеру имеет место «иноопределение», при котором траектория дублера усиливает искривления траектории лидера.

20. Точка копирования программы плановой траектории дублера может не иметь жесткой привязки к агрегатам и быть «плавающей». В этом случае траектория дублера занимает промежуточное положение между траекториями при самоопределении и иноопределении.
21. Местоопределение МТА в магнитных полях стационарных источников можно рассматривать как частный случай определения взаимного положения лидера и дублера, соответствующий нулевой скорости лидера. Поэтому для местоопределения МТА в магнитных полях стационарных и мобильных источников пригодны одинаковые алгоритмы формирования сигналов траекторного рассогласования и схемотехнические решения. Существенное различие наблюдается только в зависимости чувствительности устройств местоопределения дублера от дистанции между агрегатами.
22. Габаритные размеры МТА могут достигать десяти метров и более, в то время как допустимая погрешность местоопределения измеряется сотыми долями метра. В процессе даже прямолинейного движения на гоне отдельные точки МТА осуществляют не только линейное, но и угловое перемещение, и их траектории не тождественны. Поэтому значимым является выбор на МТА места расположения магнитоприемника с индукционными преобразователями, траектория центра которого является плановой и программируется.
23. С целью упрощения автоматического регулятора и повышения устойчивости системы траекторного управления магнитоприемник следует располагать в передней части трактора.
24. Подавляющее большинство технологических машин-орудий (ТМО) «тянущего» типа и располагается сзади трактора. Их рабочие органы смещены в продольном направлении относительно магнитоприемника на расстояния до 10 и более метров, поэтому сколь угодно высокоточное управ-

ление траекторией магнитоприемника не гарантирует точного перемещения рабочих органов ТМО.

25. Для обеспечения высокой точности перемещения рабочих органов ТМО, определяющей качество выполнения полевых работ автоматизированными МТА, целесообразно дополнительно измерять местонахождение крайних рабочих органов МТА, используя результаты измерений для корректировки плановых значений вторичных навигационных параметров устройств местоопределения.
26. Теория индукционной сельскохозяйственной навигации далека от завершения; многие вопросы остались за рамками настоящего исследования.

Предложения по использованию результатов работы

В настоящее время основным недостатком индукционных устройств местоопределения МТА считается необходимость закладки в подпахотный слой почвы большого количества проводов. В действительности этот недостаток сильно преувеличен, так как для закладки можно использовать, например, провод АПВ-2,5 по цене 3,0 тыс. руб./км. Закладку провода можно осуществлять бестраншейным способом [36], используя ножевой проводоукладчик на базе однокорпусного чизельного плуга, либо серийный кабелеукладчик типа ЛКУ-61, рисунок Р-1. При шаге закладки проводов 10 м удельные капитальные затраты на подготовку поля не превысят 10,0 тыс. руб./га, которые окупятся за 1-2 сезона благодаря более высокому качеству полевых работ и увеличению урожайности. В то же время гарантийный срок службы проводов 15 лет; срок службы подземных проводов будет в несколько раз больше.

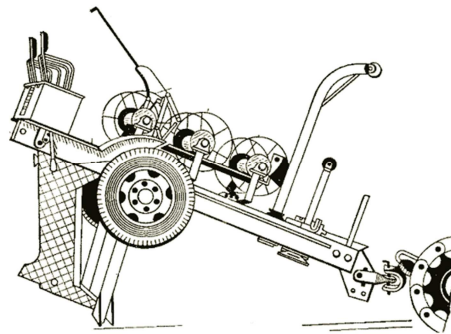


Рисунок Р-1. Легкий кабелеукладчик ЛКУ-61

Навигационные магнитные поля можно создавать током промышленной частоты от сети 50 Гц, либо напряжением повышенной частоты от транзисторного генератора переменного напряжения, рисунок Р-2.

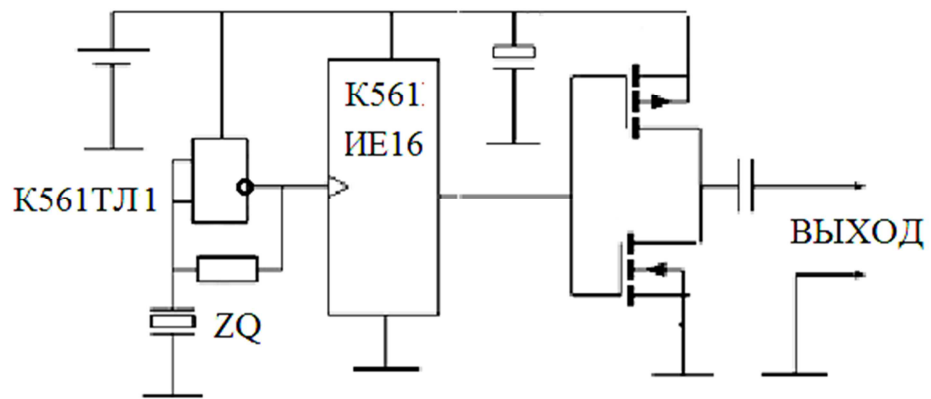


Рисунок Р-2. Схема генератора переменного напряжения

Электрическая схема разностно-амплитудного устройства местоопределения по модулю проекции вектора напряженности магнитного поля приведена на рисунке Р-3.

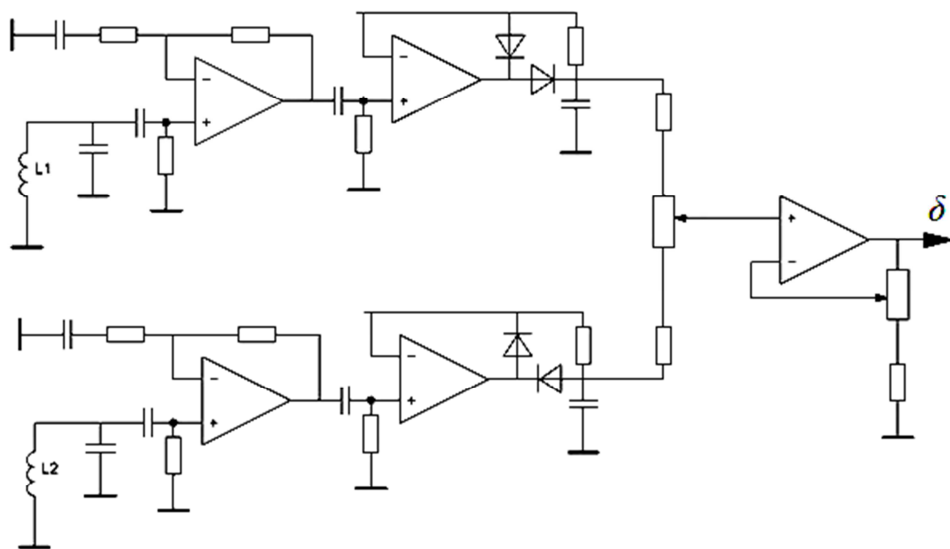


Рисунок Р-3. Схема формирователя сигнала траекторного рассогласования δ разностно-амплитудным методом по модулю проекции вектора напряженности

Заключение

1. Цель исследования достигнута – разработаны основные положения индукционной сельскохозяйственной навигации, как совокупность знаний:
 - 1.1. о низкочастотных навигационных магнитных полях, создаваемых токами стационарных и магнитных индукторов;
 - 1.2. о методике расчета навигационных магнитных полей, создаваемых токами стационарных и мобильных индукторов произвольной формы;
 - 1.3. о методах программирования плановых траекторий МТА;
 - 1.4. об алгоритмах формирования сигналов траекторного рассогласования МТА;
 - 1.5. о методике определения основных технических параметров индукционных устройств местоопределения МТА.
2. Успешная автоматизация мобильных процессов растениеводства, обеспечивающая выполнение полевых сельскохозяйственных работ машинно-тракторными агрегатами без человека, возможна только при наличии развитой сельскохозяйственной навигации, как науки об инструментальных методах и технических средствах управления движением роботизированных МТА.
3. Явление магнитной индукции обладает широкими потенциальными возможностями для программирования прямолинейных плановых траекторий МТА на рабочем гоне, и определения с высокой точностью фактических мест нахождения относительно плановых.
4. Для совершенствования теории и практики индукционной сельскохозяйственной навигации необходимо проведение дальнейших прикладных теоретических и экспериментальных исследований, в том числе – предусматривающих:

- 4.1. Разработку и исследование различных вариантов индукционных устройств местоопределения ПГА, пригодных для широкого практического применения в условиях рядовых фермерских хозяйств.
- 4.2. Теоретические и экспериментальные исследования дальномерных методов местоопределения МГА относительно физических и геометрических направляющих линий, формируемых токами стационарных и мобильных индукторов.
- 4.3. Исследование влияния макрорельефа на навигационные поля.
- 4.4. Исследование распределения тока по длине подземного провода.
- 4.5. Исследование влияния земли на затухание навигационных магнитных полей и низкочастотных магнитных помех.
- 4.6. Исследование методов программирования плановых траекторий МГА, удаленных от источника навигационного магнитного поля на расстояния до нескольких десятков метров.
- 4.7. Исследование влияния ферромагнитных и проводящих масс тракторов и сельхозмашин на навигационные магнитные поля.
- 4.8. Исследование электромагнитных помех, создаваемых электрооборудованием тракторов и самоходных машин.
- 4.9. Исследование долговременной стабильности электрических параметров земли.
- 4.10. Исследование потенциальных возможностей местоопределения МГА в импульсных магнитных полях, и др.

Список литературы

1. Ляльков, Э.П. Навигация: Учебник для средних уч. завед. мор. трансп./ Э.П. Ляльков, А.Г. Васин. – 2-е изд., перераб. и доп – М. : Транспорт, 1981. – 349 с.
2. Сакеллари, Н.А. Навигация: Учебник для военно-морского училища им. М.Ф. Фрунзе и спец. Курсов командного состава МС РККА им. ЦИК Татарской ССР / Н.А. Сакеллари. – 3-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Государственное военное издательство наркома обороны СССР, 1936. – 364 с.
3. Черный, М.А. Воздушная навигация: Учебник для летных училищ и школ гражданской авиации / М.А. Черный, В.И. Кораблин. – 3-у изд., перерабоб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 384 с.
4. Беляевский, Л.С. Основы радионавигации: Учебник для вузов гражд. Авиации / Беляевский Л.С., Новиков В.С., Олянюк П.В. – М.: транспорт, 1982. – 288 с.
5. Селезнев, В.П. Навигационная бионика / Селезнев В.П., Селезнева Н.В. – М.: Машиностроение, 1987. – 256 с.
6. Соловьев, Ю.А. Спутниковая навигация и её приложения / Ю.А. Соловьев. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 326 с.
7. Помыкаев, И.И. Навигационные приборы и системы: Учеб. пособие для вузов. под ред. И.И. Помыкаева / Помыкаев И.И., Селезнев В.П., Дмитrochenко Л.А. – М.: Машиностроение, 1983. – 456 с.
8. Калюжный, А.Т. Анализ устройств сельскохозяйственной навигации / А.Т. Калюжный // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 1988. – № 1. – с.91 – 99.
9. Инерциальная навигация. Анализ и проектирование. / Под ред. О'Доннела. Пер. с англ., под ред. Н.П. Буканова. – М.: Наука, 1969. – 592 с.

10. ГОСТ 19156-79. Аппаратура навигационная наземная одометрическая. Термины и определения.
11. Справочник по радиолокации. Т.4. / Под ред. М. Скольника. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. под ред. М.М. Вейсбейна. – М.: «Сов.радио», 1978. – 376 с.
12. Гельфенбейн, С.П. Терранавигация. / Гельфенбейн С.П. – М.: Колос, 1981. - 207 с.
13. Бородин, И.Ф. Основы автоматики и автоматизации производственных процессов. / И.Ф. Бородин, Н.И. Кирилин. – М.: Колос, 1977 – 328 с.
14. Шеповалов, В.Д. Автоматизация уборочных процессов / В.Д. Шеповалов – Изд. 2-е, перераб. и доп. : – М.: Колос, 1978. – 383 с.
15. А.с. 751343. Способ программирования траектории движения сельскохозяйственных агрегатов / Калюжный А.Т. : БИ №28, 30.07.1980.
16. А.с. СССР № 1233828. Система дублирного вождения машинно-тракторных агрегатов / Калюжный А.Т. Б.И. №20, 30.05.86.
17. Ветлинский, В.Н. Бортовые автономные системы управления автомобилем / Ветлинский В.Н., А.А. Юрчевский, К.Н. Комлев. – М.: Транспорт, 1984. – 190 с.
18. Клейн, Ю.К. Развитие автоматического вождения тракторных агрегатов за рубежом / Клейн Ю.К., Ефремов Ю.И. – ЦНИИТЭИ тракторно-сельхозмаш. – М.: 1972.– 48 с.
19. Калюжный, А.Т. Магнитное поле наземного проводника с током / А.Т. Калюжный // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 2010.– №11.– С. 15-18.
20. Якубовский, Ю.В. Электроразведка: учеб. для вузов/ Ю.В. Якубовский, И.В. Ренард. – М.: Недра, 1991. – 359 с.
21. Калюжный, А.Т. Использование магнитного поля прямоугольной петли для сельскохозяйственной навигации / Калюжный, А.Т. , Ляпин В.Г.

- // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011.– №11 – с. 2–4.
22. Вешев, В.А. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе / В.А. Вешев – Л.: Недра. Ленингр. отд-ние, 1980. – 391 с.
23. Котюк, А.Ф. Анализ схем аэроразведки методом индукции / А.Ф. Котюк. – Новосибирск: Из-во СО АН СССР, 1961. – 116 с.
24. Калюжный, А.Т. Магнитное поле кругового витка в зоне индукции/ Калюжный, А.Т. // Инженерная служба села и задачи высокопроизводительного использования современной техники: Тр. СО ВАСХНИЛ.– Новосибирск. – 1979. - с. 48-53.
25. А.с. СССР № 810112. Способ ориентации самоходных машин в переменном магнитном поле двух токонесущих проводов / Калюжный А.Т., Лазовский В.В.: БИ № 9, 07.03.1981.
26. Калюжный, А.Т. Определение местоположения тракторных агрегатов путем использования низкочастотного переменного магнитного поля / А.Т. Калюжный // Тракторы и сельхозмашины. – 2015.– №1 – с.40-43.
27. А.с. СССР № 312560. Чувствительный элемент для систем автоматического направления движения самоходных машин по эквидистантным линиям относительно токонесущего провода/ В.В. Заиченко, Л.Д. Стоянов, А.И. Драновский и И.И. Кринецкий.: Б.И. № 26. 31.VIII.1971.
28. Гельфенбейн, С.П. Основы автоматизации сельскохозяйственных агрегатов / С.П. Гельфенбейн – М.: Колос, 1975. – 384 с.
29. А.С. СССР № 1358808. Способ местоопределения машинно-тракторного агрегата в переменном магнитном поле токонесущего контура / Калюжный А.Т., Лукашук В.Г.: БИ № 46, 15.12.1987.
30. Калюжный А.Т. Местоопределение тракторных агрегатов при дублирном вождении / Калюжный А.Т // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – М. 1981. - №10- с. 47-51.

31. А.с. СССР № 829001. Индукционное устройство для группового вождения широкозахватных тракторных агрегатов / Калюжный А.Т., Емельянов М.В.: БИ № 18, 15.05.1981.
32. А.с. СССР № 1246911. Индукционная система дублирного вождения машинно-тракторных агрегатов / Калюжный А.Т.: БИ № 28, 30.07.1986.
33. А.с. СССР № 1382417. Способ дублирного вождения машинно-тракторных агрегатов / А.Т. Калюжный, В.С. Абушенко, М.В. Емельянов, И.И. Королев.: БИ № 11, 23.03.1988.
34. Калюжный, А.Т. Точность автоматического вождения самоходных машин / А.Т. Калюжный // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1981. – № 11 – с.35-36.
35. Калюжный, А.Т. Определение взаимного положения машинно-тракторных агрегатов при автоматическом групповом вождении (начала сельскохозяйственной навигации): автореф. дис. канд. техн. наук. 05.20.01; 05.13.05 / Калюжный Анатолий Тимофеевич. – Новосибирск, 1985. – 20 с.
36. Боязный, Я.М. Бестраншейная прокладка силовых кабелей. Б-ка электромонтера; вып. 577. / Я.М. Боязный, В.В. Кузьменко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 120 с.

Условные обозначения и сокращения

МТА – машинно-тракторный агрегат; самоходная сельхозмашина.

НУ – навигационное устройство.

ОУ – объект управления; управляемый движущийся объект.

РСЛ – равносигнальная линия.

ТМО – технологическая машина-орудие МТА.

УМО – устройство местоопределения МТА.

\mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля.

H – модуль вектора напряженности магнитного поля.

H_i – проекция вектора напряженности на i -ю ось системы координат.

OXYZ – прямоугольная система координат, ось OX которой совмещена с требуемым направлением движения МТА.

y – боковая координата точки наблюдения магнитного поля.

z – высота точки наблюдения поля над плоскостью проводов; расстояние до плоскости рамки

r – расстояние от точки наблюдения поля до его источника.

$C = \text{const}$ – постоянная величина.

$2l$ – длина проводника с током.

$2a$ – измерительная база; длина магнитоприемника; расстояние между двумя датчиками напряженности магнитного поля.

$2b$ – расстояние между двумя источниками магнитного поля.

a, b – активная и реактивная компоненты нормального магнитного поля.

a – фазовая постоянная волнового числа k .

b – коэффициент затухания волнового числа k .

$k = a + ib$ – «волновое число» земли.

β – угол между током и заданным направлением.

ψ – угол наклона вектора напряженности к вертикали.

γ – направление проекции вектора напряженности.

φ – фазовый сдвиг.

j – плотность тока в земле.

m – боковое смещение заземлителя относительно оси провода.

$\Phi = \mu HS$ – магнитный поток через контур площадью S .

$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость грунта.

λ – длина электромагнитной волны.

f – циклическая частота переменного магнитного поля.

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота магнитного поля.

ρ – удельное сопротивление земли.

$r = 2,81r (f/\rho)^{1/2} 10^3$ – параметр поля; приведенное расстояние.

r – навигационный параметр устройства местоопределения.

r – измеряемый параметр навигационного магнитного поля.

УСЛОВИЯ ТРУДА СЕЛЬСКИХ МЕХАНИЗАТОРОВ

СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО, гигиена труда

(Популярная медицинская энциклопедия)

<http://www.bibliotekar.ru/624-6/25.htm>

Работы, выполняемые в сельском хозяйстве, имеют свои особенности, отличающие их от работ в промышленном производстве и влияющие на сан.-гиг. условия труда. К ним относятся: сезонность основных работ в полеводстве; преимущественность работ в поле на открытом воздухе, часто при неблагоприятных метеорологических условиях; частая смена рабочих операций, выполняемых одним и тем же лицом; отдаленность мест производства работ от места постоянного жительства людей; применение химических веществ для защиты растений от вредителей и болезней (см. Ядохимикаты сельскохозяйственные).

Современное с.-х. производство характеризуется высокой степенью механизации. К главным группам с.-х. рабочих относятся механизаторы (трактористы, прицепщики, комбайнеры и т. д.), животноводы (доярки, скотники, телятницы, птичницы, свиноводы, пастухи), рабочие ремонтных мастерских и вспомогательные рабочие. Такие виды труда, как труд пахаря, косаря, жнеца, давно потеряли свое значение.

Особое внимание уделяется гигиене труда в растениеводстве (полеводстве, садоводстве, виноградарстве и т. д.), где сосредоточена основная масса колхозников и рабочих совхозов и наибольшее количество техники. В числе неблагоприятных факторов, отрицательно влияющих на состояние здоровья, — повышенная или пониженная температура при работе на открытом воздухе и

в кабинах с.-х. машин. В летнее время влияние этого фактора проявляется в виде перегревания, которое наступает при температуре выше 30° и особенно тяжело сказывается в сочетании с высокой влажностью и малой подвижностью воздуха. Перегревание характеризуется учащением сердцебиения, появлением головной боли, общим недомоганием, усталостью. В этих случаях необходимо выкупаться или смочить водой голову, грудь и прилечь в тени (см. Тепловой удар). Чтобы избежать перегревания, следует правильно организовать питьевой режим, носить легкую и свободную одежду, изготовленную из хлопчатобумажных или льняных тканей.

С внедрением скоростных с.-х. машин на труд механизатора большое воздействие стали оказывать факторы производственной среды, такие как микроклимат на рабочем месте, который зависит от конструкции машины, состояния и оборудования кабины, атмосферных условий, загрязнение воздуха пылью и выхлопными газами, шум, вибрация, статическое напряжение отдельных групп мышц и т. д.

Труд на с.-х. работах сопровождается загрязнением воздуха пылью, состав которой различен. При совпадении направления движения с.-х. машины с направлением ветра механизаторы могут периодически попадать в зону значительного загрязнения воздуха пылью. Этим запыленность воздуха на с.-х. работах отличается от запыленности воздуха в помещениях промышленных предприятий, где она сохраняется примерно на одном уровне в течение всего периода работы. Мероприятия по снижению запыленности воздуха рабочих мест механизаторов включают влажную уборку кабин с.-х. машин и рабочих помещений до начала, в процессе и по окончании работы, устранение неплотностей в кабине, оборудование кабин вентиляторами с пылезадерживающими фильтрами, а также применение защитных очков и респираторов при работе прицепщиков на боронах, катках, сеялках и других механизмах.

Уровень шума при выполнении различных с.-х. работ на тракторах и других машинах, при работе на животноводческих и птицеводческих фермах достигает значительной интенсивности. Шум, действуя длительно и постоянно, вызывает иногда головную боль, чувство разбитости, снижает работоспособность. По окончании рабочей смены у работающих наблюдается некое снижение слуха, но через 40—60 мин. отдыха обычно слух полностью восстанавливается.

Оздоровление условий труда трактористов и других механизаторов осуществляется путем улучшения конструкции кабины: подвеска ее на амортизаторах, оборудование в ней отопления и вентиляции с подачей очищенного воздуха в рабочую зону водителя, установка на выхлопной трубе глушителя, звукоизоляция кабины и другие мероприятия, благодаря которым уровень шума и другие вредные воздействия на ряде машин значительно снижаются. Для выполнения правил личной гигиены на с.-х. машинах должны быть термосы емкостью в 6—8 л для питьевой воды, бачок с краном для умывания и мытья рук, мыло, мочалка и полотенца.



**ФБУЗ «ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ В
САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ»**

Условия труда механизатора

<http://www.gigiena-saratov.ru/ohranatruda/128250/print/>

Профессия механизатора (тракториста) сельскохозяйственного производства в настоящее время, несмотря на численное сокращение работающих и парка машин, является одной из основных и наиболее часто

встречаемых в сельскохозяйственном производстве. Сложность обслуживания машин и управления ими, интенсификация рабочих процессов не только изменяют условия труда, но и предъявляют повышенные требования к человеку, управляющему машиной.

При эксплуатации сельскохозяйственной техники механизаторы подвергаются воздействию комплекса неблагоприятных производственных факторов, среди которых определяющими являются общая и локальная вибрация, шум, вынужденная рабочая поза со значительным физическим и статическим мышечным напряжением, запыленность, неблагоприятный микроклимат. Рабочая поза механизаторов на тракторах в основном рациональная. Однако в некоторых случаях, например, при выполнении работ, требующих высокой точности вождения, при неправильной регулировке положения сиденья в зависимости от роста или при неправильном выборе ориентира движения механизатор занимает вынужденную, без возможности смены положения рабочую позу, характеризующуюся статическим напряжением.

Современная сельскохозяйственная техника используется круглый год практически во всех почвенно-климатических зонах страны при температурах от +40 до -30°C и более низких. Без надлежащей защиты металлическая кабина может стать мощным источником тепла или холода. В период летних полевых работ температура воздуха в кабинах, оборудованных для нормализации микроклимата только вентиляцией без применения средств тепловой защиты, может превышать наружную на 8-19°C, а температура поверхностей достигать 40-53°C. Время работы в условиях теплового дискомфорта в наиболее жаркий период равно 6-7 ч за рабочий день. Большую часть рабочего времени механизаторы для снижения температуры воздуха в кабинах вынуждены открывать окна и двери, а это увеличивает запыленность воздуха. Для тепловой защиты рабочего места механизатора поверхности кабин окрашиваются в свет-

лые тона, экранируются и теплоизолируются микропористыми веществами, мастиками, картоном, что уменьшает теплоступление от солнечной радиации. Для защиты от тепла, выделяемого двигателем и трансмиссией, кабины покрывают рифленым резиновым ковриком с подложкой из малотеплопроводного материала. Кабины оборудуются испарительными кондиционерами, а вместо обычных стекол применяются тонированные, которые задерживают часть теплового спектра солнечной радиации. Используемые на тракторах отопители позволяют поддерживать температуру воздуха в кабинах 14-20°С при температуре наружного воздуха до -20°С.

Шум. При работе тракторы создают шум, намного превышающий допустимый уровень. Уровень шума на рабочем месте механизатора колеблется в зависимости от нагрузки на двигатель. Но эти колебания незначительны, так как общий уровень определяется относительной величиной составляющих шума, которые при падении нагрузки изменяются неравнозначно. Уровень шума на рабочем месте во многом зависит от расположения рабочего места относительно источников шума. Поэтому на маломощных тракторах механизатор часто оказывается ближе к двигателю, что обуславливает относительно более высокий уровень шума на рабочем месте. Источником внешнего шума тракторов является в основном шум выхлопа двигателя, для снижения которого устанавливаются глушители. Как правило, вследствие недостаточной звукоизоляции кабины и близкого расположения ее от двигателя, шум на рабочих местах большинства тракторов превышает допустимый уровень в значительных пределах (на 8-14 дБА). Уровень внешнего шума на колесных тракторах колеблется в пределах 84-87 дБА при ПДУ 80 дБА, согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки».

Вибрация. Мощные двигатели современных машин могут создавать значительную высокочастотную вибрацию. Однако, как правило, на рабочем месте механизатора она не превышает допустимых величин. Уровень высокочастотной вибрации на механизмах управления и рабочей площадке машин также не превышает допустимых величин. При измерении вибрации на частотах, близких к резонансной частоте тела человека, величина вибрации превышает допустимый уровень. Наибольшее превышение наблюдается на гусеничных тракторах, так как гусеница хуже, чем пневматическое колесо, гасит колебания. Согласно СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация, вибрация в помещении жилых и общественных зданий» ПДУ (корректированный уровень виброускорения) общей (транспортной) вибрации составляет 112 дБ, локальной - 126 дБ.

Химические соединения. Механизатор в работе соприкасается с различными химическими соединениями разной степени токсичности. Основными из них являются выхлопные газы и пыль. Выхлопные газы содержат различные химические соединения, основным токсичным компонентом в них является окись углерода. При некоторых условиях, например, сильном встречном ветре, выхлопные газы могут поступать в кабину через вентиляционные устройства и кондиционеры, а также зимой при зачехлении двигателя. Наибольшее количество выхлопных газов проникает в кабину при изменении режима двигателя, т.е. когда создаются условия для неполного сгорания топлива. В кабинах машин с двигателями, удаленными от рабочего места, оксид углерода обнаруживается в редких случаях. Наиболее существенными факторами, определяющими содержание пыли в рабочей зоне механизаторов, являются влажность и структура почвы, расположение рабочего места относительно пылеобразующих факторов, направление и скорость ветра относительно движения агрегата, скорость движения агрегата. В кабину пыль проника-

ет через неплотности пола и нижних частей стенок кабины, а также может нагнетаться приточными вентиляторами при отсутствии или неудовлетворительной работе системы очистки. Проникая в кабину, пыль скапливается и оседает на различных элементах кабины, при работе вследствие вибрации она поднимается в воздух и может создавать в зоне дыхания значительные концентрации. Воздух рабочей зоны на рабочем месте механизатора (в кабине трактора) должен соответствовать ГН 2.2.51313-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны».

Наиболее объективными критериями оценки условий труда механизаторов являются показатели профессиональной заболеваемости, формирующейся под непосредственным влиянием на них неблагоприятных производственных факторов; 53,4% всех регистрируемых в отрасли профессиональных заболеваний и отравлений приходится на механизаторов, что в 3,8 раза превышает среднеотраслевой уровень.

Профессиональная заболеваемость механизаторов формируется в основном за счет вибрационной болезни (56,2%), заболеваний опорно-двигательного аппарата (22,4%), органов дыхания (9,8%) и слуха (7,5%).

Вибрационная патология у механизаторов начинает формироваться уже в первые пять лет работы на сельскохозяйственной технике (0,1% выявляемых случаев вибрационной болезни) и достигает максимума при стаже более 25 лет (67,3%).

Поражения опорно-двигательного аппарата проявляются преимущественно в виде пояснично-крестцовых радикулитов. Распространенность их возрастает при увеличении стажа и достигает пика к 20 годам работы.

Заболеваемость хроническими бронхитами проявляется обычно после 5 лет работы. Причем среди механизаторов, постоянно работающих на уборке зерна, хронические бронхиты выявляются в 2 раза чаще.

Это обстоятельство можно объяснить воздействием на них высоких концентраций пыли, особенно зерновой, обладающей фиброгенным и аллергенным действием.

Развитие профессиональной тугоухости зависит, прежде всего, от уровня воздействующего шума и длительности контакта с ним. При уровне шума 90-95 дБА профессиональная тугоухость, как правило, регистрируется у механизаторов со стажем работы 6-10 лет, 96-100 дБА - со стажем 1-5 лет.

Таким образом, механизаторы к 45-50 годам в 70-80% случаев страдают хроническими общими или профессиональными заболеваниями.

Поэтому условия труда механизаторов (трактористов) сельскохозяйственного производства в соответствии с Руководством по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса (Р 2.2.2006-05) можно отнести к третьему классу вредности.

Условия труда в сельском хозяйстве и распространенность отдельных заболеваний

http://ohrana-bgd.narod.ru/ohselh/selhoz_003.html

Условия труда в полеводстве в значительной мере определяются уровнем механизации процессов возделывания, выращиваемой культурой, технологией возделывания.

Основу механизации этой отрасли составляют тракторы, энергонасыщенные самоходные машины, комплексы навесных и прицепных машин и механизмов, обеспечивающих выполнение рабочих операций по механизированному возделыванию сельскохозяйственных культур.

Основными неблагоприятными факторами при работе на тракторах являются вибрация и шум, высокие и низкие температуры воздуха, вынужденная рабочая поза, значительные физические усилия. Органы управления на некоторых тракторах расположены так, что часто снижают эффективность рабочих движений, вынуждают делать лишние движения, наклоняться, включать педали согнутой в коленном суставе ногой, что повышает энергозатраты и трудоемкость обслуживания машин. При управлении агрегатом механизатор прикладывает к рычагам и педалям мышечные усилия, различные по силе, точкам приложения, траектории и частоте.

Сидения на тракторах не всегда соответствуют требованиям стандарта, что может быть причиной преждевременного утомления. При выполнении работ, требующих высокой точности вождения, при плохой регулировке положения сидения или при неправильном выборе ориентира движения механизатор принимает вынужденную рабочую позу, с определенным статическим напряжением отдельных мышечных групп.

Кабина трактора позволяет защитить механизатора от непосредственного воздействия инсоляции, высоких и низких температур. Микроклиматические условия на рабочем месте зависят от ее герметичности, теплоизоляции, наличия системы отопления и кондиционирования воздуха. В теплый период года в кабинах, не имеющих тепловой защиты, температура воздуха может достигать 50 °С и более. При этом температура воздуха в кабинах, оборудованных только вентиляцией без применения средств тепловой защиты, может превышать наружную на 8—19 °С, а температура поверхностей составлять 40—53 °С. Время работы в условиях теплового дискомфорта в наиболее жаркий период может достигать 6—7 ч в течение рабочего дня. Дискомфортные микроклиматические условия на рабочих местах механизаторов в общей сложности составляют на весенних полевых работах 5—12 % рабочего времени, на летних — 53—70 %, на осенних — 12—22 %. Большую часть рабочего времени механизаторы для снижения температуры воздуха в

кабинах вынуждены открывать окна и двери, а это увеличивает запыленность воздуха зоны дыхания. Наиболее совершенным по теплозащите рабочего места является комплекс технических средств, использованных на тракторе Т-150. Используемые на тракторах отопители позволяют поддерживать температуру воздуха в кабинах на уровне 14-20 °С. При температуре наружного воздуха до — 20 °С не всегда имеется возможность плавной регулировки температуры воздуха в кабине, а также не исключаются значительные перепады температуры по высоте (до 10 °С), так как теплый воздух подается в верхнюю часть кабины.

В воздухе зоны дыхания тракториста могут создаваться значительные концентрации пыли: содержание пыли в кабинах тракторов современных конструкций колеблется от 2 до 100 мг/м³, а иногда и выше. Наибольшим пылеобразованием сопровождаются комбайновая уборка сахарной свеклы и картофеля, гороха, а также работы на зерновых комбайнах с измельчителями, предпосевная культивация и сев озимых. При движении агрегата в направлении против ветра запыленность воздуха зоны дыхания тракториста бывает минимальной, а прицепщика — максимальной, при движении агрегата за ветром - наоборот.

Уровень шума в кабинах большинства сельскохозяйственных машин, в том числе и тракторов, часто превышает допустимый. Он зависит от мощности двигателя, нагрузки, с которой работает машина, скорости движения, по мере возрастания которых происходит увеличение его и смещение в высокочастотную часть спектра. Однако прямой зависимости уровня шума от мощности и размеров трактора нет. Уровень шума в кабинах новых тракторов Т-150К, К-701, Т-70С, ЮМЗ-6Л и ДТ-75С находится на уровне допустимых величин, колебания, как правило, не превышают погрешностей измерений (Б. И. Рябцев, 1981).

Трактористы, водители самоходных сельскохозяйственных машин, прицепщики подвергаются воздействию вибрации. Источниками ее в основ-

ном являются ходовая часть и двигатель. Вибрация через раму, коробку передач, систему креплений передается на рабочее место — пол кабины, сиденье, органы управления.

Ходовая часть создает на рабочем месте в основном общую низкочастотную вибрацию, которая является результатом взаимодействия колес или гусениц с неровностями рельефа полей и дорог. Уровень низкочастотной вибрации возрастает с увеличением скорости движения машин. Двигатель генерирует общую высокочастотную вибрацию. Этот же вид вибрации возникает на рабочей площадке комбайна при работе измельчителя стеблей.

Следовательно, трактористы, комбайнеры, водители других самоходных сельскохозяйственных машин подвергаются одновременно воздействию общей низкочастотной, локальной и общей высокочастотной вибрации.

Механизаторы, обслуживающие стационарные машины, могут подвергаться воздействию лишь высокочастотной вибрации (А. А. Меньшов, 1981).

В процессе эксплуатации машин, когда детали двигателя, трансмиссии, рабочих органов изнашиваются, уровни вибрации увеличиваются. Это особенно часто отмечается при плохой регулировке, некачественном ремонте сельскохозяйственной техники.

В процессе выполнения различных работ механизаторы могут контактировать со многими химическими веществами, к их числу прежде всего относятся горюче-смазочные материалы, выхлопные газы, пестициды, минеральные удобрения. Основным токсическим компонентом выхлопных газов является окись углерода. На новых марках тракторов концентрация окиси углерода в зоне дыхания тракториста не превышает допустимого уровня.

Непосредственный контакт может быть при приготовлениях растворов заправке машин, техническом или технологическом обслуживании их. Возможно попадание смазочных масел и горючего на открытые участки тела тракториста.

При возделывании зерновых культур наиболее трудоемкой операцией является уборка соломы и половы, на которую затрачивается в 2-3 раза больше труда, чем на уборку зерна. Зерновые культуры менее требовательны к теплу и влаге по сравнению со многими техническими культурами посевные площади их намного шире, более разнообразны метеорологические условия, при которых проводятся основные операции по возделыванию. Иногда работы выполняются под дождем и снегом при заморозках в ночные и ранние утренние часы. Микроклиматические условия в кабинах тракторов не всегда соответствуют гигиеническим нормативам в районах с умеренным и жарким климатом. Температура воздуха в кабинах тракторов может превышать наружную на 8-12 °С, в комбайнах - на 4- 9° С. В южных районах при вспашке пересохшей почвы обработка ее и сев проходят с увеличением уровня шума и вибрации на рабочих

Запыленность воздушной среды превышает допустимую величину при предпосевной подготовке почвы, севе, уборке, скирдовании соломы и очистке зерна.

При возделывании зерновых культур контакт работающих с пестицидами ограничен в основном севом протравленного зерна.

Физические нагрузки механизаторов, связанные с управлением агрегатами, при возделывании зерновых культур ниже, чем при возделывании пропашных.

Труд рисоводов на механизированных работах в основном соответствует труду механизаторов в других отраслях сельского хозяйства, но имеет и ряд особенностей. Рисоводам приходится работать на полях, залитых водой, выполняя большой объем ручных операций в вынужденном положении тела, нередко в воде на илистом скользком грунте. В южных районах работы нередко проводятся при температуре выше 30 °С и интенсивной солнечной радиации. При уборке, перевозке риса, соломы возможно загрязнение воздушной среды пылью риса пылью рисовой соломы, спорами низших гри-

бов, которым присущи аллергенные свойства. В период вегетации риса возможен контакт с пестицидами и минеральными удобрениями.

Возделывание таких технических культур, как сахарная свекла, картофель, хлопок, постепенно переводится на промышленную технологию, при которой основу составляет труд механизаторов.

Сахарная свекла — одна из наиболее трудоемких культур. Выращивают ее в строго определенных районах с умеренными метеорологическими условиями. Сев начинается в конце апреля, когда возможны выпадение дождя и снега, большие перепады между утренней, дневной и вечерней температурами. Высокая температура наружного воздуха и инсоляция в летнее время определяют неблагоприятные условия труда в кабинах тракторов. Температура воздуха в кабинах тракторов МТЗ-50/52 может превышать наружную на 12—18 °С, достигая 40—46 °С и более, что исключает возможность работы в закрытой кабине. Температура металлических поверхностей кабины повышается до 55-62 °С.

При уборке сахарной свеклы работающие подвергаются воздействию низкой температуры воздуха, при больших скоростях движения воздуха и высокой относительной влажности.

На тракторах, используемых в свекловодстве, шум нередко превышает допустимый уровень.

Повышение уровня вибрации отмечается на уборочных работах, при наибольшей плотности почвы и относительно высоких скоростях движения агрегатов.

Пыль на работах по возделыванию сахарной свеклы состоит из различных неорганических составных частей почвы (до 90 %) и органических примесей. В ней определяется до 50 % свободной двуокиси кремния. Частицы пыли размерами до 5 мкм составляют в среднем около 45% (В. П. Маленький, 1977; Б. И. Рябцев, 1977).

Необходимость поддерживать прямолинейное направление агрегата является причиной высокой частоты рабочих движений при управлении им. Постоянный контроль за точностью движения агрегата и корректировка пути его требуют также внимания, повышенного нервно-эмоционального напряжения.

Современная технология выращивания картофеля довольно трудоемкая. Условия труда зависят от почвенно-климатической зоны, скороспелости сорта, конструктивных особенностей используемых машин.

Загрязнение воздуха пылью и газами имеет место на всех механизированных работах, связанных с обработкой почвы. Пыль является основной профессиональной вредностью в картофелеводстве. Наибольшие концентрации пыли в воздухе отмечены при уборке картофеля. Это объясняется тем, что принцип работы картофелеуборочного комбайна основан на подкопе и подъеме пласта земли с клубнями картофеля и подачей его на элеваторы комбайна для просеивания, что приводит к значительному пылеобразованию. Так, за 1 с через комбайн проходит около 200 кг почвы. Концентрации пыли в зоне дыхания комбайнера и переборщиков могут значительно превышать предельно допустимые.

Воздух рабочей зоны при машинной уборке урожая загрязняется пылью. Концентрация ее при работе на новых марках хлопкоуборочных машин колеблется от 20 до 300 мг/м³, в почвенной пыли содержатся примеси пестицидов. Шум при работе хлопкоуборочных машин может превышать допустимый уровень.

Условия труда во всех отраслях растениеводства постоянно улучшаются. Однако воздействие вредных факторов, превышающих допустимые уровни, особенно когда оно происходит в течение длительного времени, может приводить к развитию как профессиональных, так и к обострению и усугублению течения общих заболеваний, этиологически не связанных с условиями труда, способствовать росту заболеваемости с потерей трудоспособности.

У механизаторов сельского хозяйства: трактористов, комбайнеров, водителей самоходных машин особенно часто встречаются заболевания периферической нервной системы. Распространенность их, по данным литературы, колеблется в широких пределах. Н. Н. Гущина (1969) приводит наиболее высокие показатели — $(55,7 \pm 2)$ %. У механизаторов зерноуборочных комбайнов и трактористов частота этих заболеваний, согласно наблюдениям П. Т. Тимофеевой (1973), составляет $(28,5 \pm 1,1)$ %, у механизаторов-рисоводов — 19,6 % (С. Х. Николов и соавт., 1977).

Средние показатели по болезням пояснично-крестцовой области составляют, по данным П. Н. Гущиной (1969), у механизаторов 8,1 случая и 93,5 дня нетрудоспособности, у рабочих других профессий — соответственно 3,5 случая и 45,6 дня нетрудоспособности.

Основное место среди заболеваний периферической нервной системы у механизаторов сельского хозяйства занимают хронический пояснично-крестцовый радикулит и люмбалгии, частота которых примерно одинакова и составляет в различных группах, по данным П. П. Гущиной (1969), Г. Л. Хачатуряна (1975) и П. Т. Тимофеевой (1973), от 8 до 30 % общего числа обследованных.

В небольшом проценте случаев $(1,3 \pm 0,8)$ % У механизаторов сельского хозяйства диагностируется своеобразная патология, которая развивается при большом производственном стаже (10—15 лет и более) и длительно протекает без каких-либо четких жалоб, проявляясь церебральными и периферическими ангиодистоническими нарушениями, развивающимися, очевидно, в результате действия как общей толчкообразной вибрации, так и локальной, передающейся через рычаги управления. При этом, как правило, больше страдает нервно-сосудистый аппарат верхних конечностей. Клиническая симптоматика выраженных форм заболевания укладывается в картину полирадикулоневропатии с выраженными вегетативно-трофическими нарушениями и умеренным болевым синдромом. Эта форма патологии условно рас-

смачивается как вибрационная болезнь, хотя совершенно очевидно, что в ее развитии существенное значение наряду с вибрацией имеют и другие производственные факторы (охлаждение, вынужденное положение, физическое напряжение и т. д.).

Необходимо отметить сочетание этой патологии с изменениями опорно-двигательного аппарата (остеохондроз, деформирующий спондилез).

В патогенезе этих заболеваний позвоночного столба В. М. Горпик (1976), W. F. Diller (1979), Л. Минчева, К. Грынчаров, Л. Ковачев (1979) и другие значительную роль отводят травматизации, нарушениям статики его, связанным с пребыванием туловища в вынужденном положении, с физическим перенапряжением.

Такие профессиональные факторы, как шум и вибрация, могут способствовать развитию функциональных нарушений центральной нервной системы. Функциональные заболевания центральной нервной системы, по данным клиники Киевского НИИ гигиены труда и профзаболеваний, отмечалось у $(9,06 \pm 1,1)$ % обследованных, случаи регионарной церебральной гипертензии или гипотензии без каких-либо жалоб составили соответственно $(20,2 \pm 1,3)$ % и $(4,6 \pm 0,7)$ %.

Г. А. Хачатурян (1975) наблюдал неврозы и неврозоподобные состояния у 8,5 % механизаторов, а генерализованные вегетативно-сосудистые нарушения - у 25,8%, чаще это вегетативно-сосудистая дистония по гипертоническому типу $(20,2 \% \pm 3,2\%)$. В структуре заболеваемости по обращаемости неврозы занимают 3-е место (Ю. И. Байбаков, Б. С. Монахов, 1973). Еще чаще вегетативно-сосудистая дистония (38,3%) и неврастения (20%) имели место у женщин-механизаторов, несмотря на небольшой стаж работы.

По мере нарастания производственного стажа у механизаторов сельского хозяйства, как правило, изменяется характер патологии нервной системы. Так, по наблюдениям сотрудников Киевского НИИ гигиены труда и профзаболеваний, у механизаторов со стажем работы до 3 лет встречаются

главным образом функциональные нарушения нервной системы (вегетативно-сосудистая дистония и хроническая люмбалгия). У механизаторов со стажем работы более 5 лет возрастает удельный вес заболеваний пояснично-крестцовым радикулитом. Так, при стаже до 5 лет хроническая люмбалгия диагностирована у $(10,5 \pm 3,4)$ % обследованных, а хронический пояснично-крестцовый радикулит - у $(2,6 \pm 3)$ %. В группе механизаторов со стажем свыше 15 лет частота этих заболеваний в одних и тех же возрастных группах составляет соответственно $(24,2 \pm 2,5)$ % и $(19,6 \pm 2,1)$ %.

Несомненную связь с высокими уровнями шума и вибрации на сельскохозяйственных машинах имеет нередко диагностируемый у механизаторов кохлеарный неврит. Заболевание в основном развивается как двусторонний процесс, сопровождается легкой, реже средней степени нарушением слуховой функции и не достигает выраженных форм патологии слухового анализатора, которые встречаются у рабочих «шумовых» профессий промышленного производства. Иногда заболевание сопровождается выраженной вестибулопатией. По данным В. Г. Бойко (1977), нарушения слуховой функции у механизаторов сельского хозяйства встречались в $(9,5 \pm 1)$ % случаев, в том числе в $(4,8 + 0,8)$ % случаев кохлеарный неврит с легкой степенью снижения слуха и в $(2,1 \pm 0,5)$ % - с умеренной степенью тугоухости. Важно отметить значительное нарастание тугоухости с увеличением производственного стажа: в группе со стажем до 10 лет частота ее составляет $(3,3 \pm 1,2)$ %, при стаже 11-20 лет - $(4,8 + 1,1)$ %, при стаже свыше 20 лет - $(36,8 \pm 4)$ %.

При длительной работе на песчаных почвах, где в процессе работы механизаторов сельского хозяйства создаются высокие концентрации пыли в зоне дыхания, возможно развитие пылевых форм патологии бронхолегочного аппарата и в первую очередь диффузного хронического бронхита.

Хронический бронхит у механизаторов сельского хозяйства протекает, как правило торпидно, без выраженных катаральных явлений. Рентгенологически определяется значительное усиление корней легких, умеренно выра-

женная деформация бронхиального рисунка (деформирующий бронхит). Частота этого заболевания у механизаторов колеблется в пределах $(3,1 + 0,8) \%$ - $(5,8 + 1,1) \%$.

Частота заболеваний верхних дыхательных путей, в развитии которых существенную роль играет наличие в воздухе рабочей зоны пыли и вредных химических веществ (выхлопные газы, минеральные удобрения, пестициды), составляет $(24,2 \pm 1,5) \%$. Наиболее частыми из них являются хронический гипертрофический и субатрофический ринофарингит, передний сухой ринит. С увеличением стажа работы не только нарастает уровень патологии верхних дыхательных путей но и изменяется ее характер - преобладает субатрофический катар носа и глотки, увеличивается частота хронических воспалительных заболеваний гортани (В. Г. Бойко, 1977).

С воздействием пыли связаны и заболевания передней камеры глаз (подострый и хронический блефароконъюнктивит и птеригий), а также гиперемия конъюнктивы и пингвекулы, которые часто выявляются у механизаторов с большим стажем работы (Т. И. Макаренко, 1981).

Заболевания пищеварительной системы у механизаторов сельского хозяйства также более часты, чем у сельского населения в целом. Это относится в основном к язвенной болезни желудка и двенадцатиперстной кишки, которая определяется в среднем у $(5,8 \pm 0,6) \%$.

Особенно отчетлива связь с условиями труда заболеваний печени и желчевыводящих путей у механизаторов, занятых агрохимической защитой растений. Частота хронического гепатита и гепатохолецистита в этой группе более чем на 10 % выше, чем среди механизаторов, не подвергающихся воздействию пестицидов (соответственно $17,8 \% \pm 2,4 \%$ и $6,7 \% \pm 0,9 \%$). Заметно нарастает частота заболеваний печени и желчевыводящих путей с увеличением стажа работы с пестицидами (от $8,1 \% \pm 1,8 \%$ в группе со стажем до 5 лет до $24,9 \% \pm 3,1 \%$ при стаже свыше 10 лет).

Большинство травм органа зрения в современном сельском хозяйстве связано с эксплуатацией и ремонтом сельскохозяйственных машин в поле или ремонтных мастерских. Сельскохозяйственный травматизм глаз имеет определенную сезонность, возрастая в весенне-летние месяцы, то есть в разгар посевных и уборочных работ (Н. В. Голубицкая, 1965; Г. А. Дугельный, 1971; М. М. Далинчук, 1972, 1974; Ф. Ф. Непша, 1974; А. Л. Афаунов, 1974; Н. М. Блинова, 1975; С. А. Иозефи и соавт., 1976, и др.). В сельском хозяйстве травматизм глаз в различных областях страны составляет от 1,8 до 29,2 % общего числа повреждений органа зрения и существенно зависит от преобладания в том или ином районе сельского или городского населения (Г. А. Дугельный, 1971; М. М. Далинчук, 1972; Е. И. Анина и соавт., 1974; Н. М. Блинова, 1975, и др.).

Гигиена труда в полеводстве

<http://all-gigiena.ru/lit/gigiena-truda-alekseev/gigiena-truda-v-polevodstve>

В сельском хозяйстве нашей страны наиболее широко представлено полеводство - выращивание злаковых, технических и овощных культур. Производственные процессы в полеводстве слагаются из последовательных этапов: предпосевной обработки почвы, сева или посадки растений, ухода за посевами и уборки урожая. Полеводство в нашей стране - высокомеханизованная отрасль сельского хозяйства.

Основу механизации составляют тракторы - в агрегате с прицепными, навесными или стационарными машинами (орудиями) - и самоходные сельскохозяйственные машины (ССХМ).

В соответствии с принятой классификацией по назначению сельскохозяйственные тракторы делятся на тракторы общего назначения, универсально-пропашные, пропашные и специализированные (свекловодческий, рисо-

водческий, хлопководческий и др.). Выпускаются колесные и гусеничные тракторы.

Условия труда в полеводстве определяются уровнем механизации процессов возделывания тех или иных культур, технологией возделывания и организацией труда. Так, производство зерновых культур - комплексно-механизированный процесс. Все технологические операции, начиная от обработки почвы, посева и до уборки урожая, выполняются машинами без применения ручного труда.

Специфические условия возделывания технических и овощных культур все еще требуют значительных затрат ручного труда, что имеет место при уходе за посевами (сахарной свеклы, многих овощей), при уборке урожая (частично сахарной свеклы, хлопка-сырца, картофеля, некоторых овощей).

Механизация растениеводства во всех его отраслях идет быстрыми темпами. Из года в год удельный вес неквалифицированного ручного труда уменьшается за счет использования машин и механизмов. Сейчас каждый пятый труженик сельского хозяйства — механизатор.

Условия труда механизаторов. В последние годы развитие тракторного и сельскохозяйственного машиностроения идет по пути создания высокоэнергонасыщенных, скоростных, многооперационных машин, усовершенствованных и качественно новых конструкций, позволяющих увеличить в 2,5—3 раза производительность труда.

Рабочая скорость движения современных тракторов 4,5—15 км/ч. На вождение машины тракторист затрачивает 85—90 % рабочего времени. Продолжительность рабочего дня на возделывании пропашных культур зависит от вида работ и конкретных условий. В среднем она составляет: в период сева — 10 ч, при междурядной обработке—8 ч и в период уборки—11 ч и более.

Основными неблагоприятными факторами при работе на тракторах и ССХМ являются: своеобразные микроклиматические условия, загрязнение

воздуха рабочей зоны пылью и выхлопным газом, наличие шума и вибрации, контакт с горюче-смазочными материалами.

Микроклимат. Кабина трактора и ССХМ позволяет защищать механизатора от непосредственного воздействия погодных условий. В то же время на рабочем месте микроклиматические условия определяются степенью герметичности кабины, ее теплоизоляцией, площадью остекления, системой отопления, вентиляции, наличием кондиционирования воздуха.

В реальных условиях тракторы используют круглый год для выполнения тех или иных сельскохозяйственных работ практически во всех почвенно-климатических зонах страны, при температурах 40 °С и более высоких, до —30 °С и более низких. Что касается ССХМ, то они являются в основном уборочными агрегатами. Зерноуборочные и кормоуборочные машины в южных и центральных районах работают в условиях жаркой погоды. Свеклоуборочные, картофелеуборочные и другие машины работают в переходный и холодный периоды года при выпадении осадков в условиях низких температур и высокой влажности воздуха.

Основным источником тепла в кабинах является солнечная радиация (70—80 %); другими источниками тепловыделений служат двигатель, трансмиссия и сам механизатор.

Специальные исследования микроклимата кабин тракторов и ССХМ, проведенные в теплый период года во 2-й и 3-й климатических зонах, свидетельствуют о недостаточной эффективности применяемых средств защиты от солнечной радиации и избыточных тепловыделений. Так, температура воздуха в кабинах серийных тракторов выше наружной на 8—15°, в кабинах ССХМ — на 5—9°С. Максимальные величины перепадов отмечены в 3-й климатической зоне.

На перспективных машинах (тракторы Т-150К, МТЗ-102, 142, ЛТЗ-145; комбайн «Дон-1500», «Ротор-12») благодаря увеличению объема кабин и кратности воздухообмена, улучшению теплоизоляции ограждений, примене-

нию теплозащитных стекол и воздухоохладителей водоиспарительного типа удалось нормализовать температуру воздуха на рабочем месте механизатора или приблизить ее к нормируемым величинам. Наиболее совершенным способом теплозащиты является теплоизоляция в сочетании с кондиционированием при герметичности кабины. Так, на тракторе Т-150 мощный испарительный кондиционер способен подавать в кабину до 600 м³ в час очищенного и охлажденного воздуха. Создаваемое при этом избыточное давление, на 2—3 мм рт. ст. превышающее наружное, исключает попадание пыли и газов в кабину.

По мнению гигиенистов, следует широко использовать более простые, но достаточно эффективные средства защиты от теплового излучения: козырьки, жалюзи, отражающие экраны.

В кабинах тракторов и ССХМ, как помещениях малого объема, возникают условия, затрудняющие нормальный теплообмен организма с внешней средой. В жаркую, солнечную погоду практически исключается отдача тепла излучением. Наоборот, нагретые ограждающие поверхности кабины (до 50 °С и выше) сами являются источником вторичного радиационного тепла, действующего на оператора; не участвует в теплообмене задняя поверхность тела, соприкасающаяся с сидением; при малых скоростях движения воздуха затрудняется теплоотдача конвекцией и испарением. Подобные условия приводят к напряжению терморегуляции у операторов, что проявляется в повышении температуры тела, учащении пульса, снижении артериального давления, профузном выделении пота, значительных влагопотерях. Развивается преждевременное утомление.

Производство работ ранней весной и поздней осенью осуществляется в условиях субнормальных температур, нередко в сочетании с сильным ветром и осадками, а в зимний период — при низких температурах. Однако защита операторов сельскохозяйственных машин от переохлаждений менее сложная проблема, чем защита от перегреваний. Все тракторы для обогрева кабин

оборудуются специальными отопителями различной конструкции. С гигиенической точки зрения, предпочтение следует отдать теплообменникам, использующим в качестве теплоносителя воду из системы охлаждения двигателя. При такой системе исключается попадание отработавших газов в зону дыхания, не нарушается качество подаваемого в кабину воздуха.

Пыль. На образование пыли и ее содержание в воздухе рабочей зоны наиболее существенное влияние оказывают: влажность и характер почвы, вид работ, направление и скорость ветра и другие погодные условия, наличие кабины и степень ее герметичности.

Наиболее значительное пылеобразование наблюдается при комбайновой уборке сахарной свеклы, картофеля, некоторых зерновых культур с одномоментным измельчением соломы. Запыленность на рабочем месте механизатора при опущенных стеклах кабины и плохой ее герметизации может достигать сотен миллиграммов на 1 м³. Высокая запыленность - до нескольких десятков миллиграммов на 1 м³ - наблюдается при севе технических культур, междурядной обработке посевов.

Наименьшая запыленность наблюдается при ранней весенней пахоте и севе, а также поздней, предзимней обработке почвы.

Наиболее подвержены пылевому воздействию прицепщики, работающие на открытых площадках в непосредственной близости от источника пылеобразования.

Запыленность рабочей зоны механизатора в течение рабочего дня колеблется в значительных пределах, что связано с определенной цикличностью производственного процесса и частой сменой направления движения агрегата относительно направления ветра.

При выполнении большинства работ в полеводстве образуется преимущественно минеральная (почвенная) пыль, лишь при уборке зерновых и некоторых технических культур (хлопка) пыль преимущественно органическая (растительная).

В состав почвенной пыли всегда входят органические вещества, могут входить минеральные удобрения, пестициды. Кроме того, в почве всегда содержатся различные виды бактерий, плесневых грибов, могут содержаться патогенная микрофлора и яйца гельминтов.

Минеральная пыль преимущественно состоит из частиц до 5 мкм, органическая пыль примерно на 70—80% — из частиц менее 1 мкм.

Растительные пыли образуются в результате жизнедеятельности растений (растительная пыльца), при их уборке и переработке. В своем составе они содержат пестициды, другие органические соединения, а некоторые из них — биогенные амины (гистамин, ацетилхолин, серотонин).

При переработке хлопка, льна, конопли образуется волокнистая пыль.

Следует иметь в виду, что как механизаторы сельского хозяйства, так и разнорабочие в течение сезона подвергаются действию самых разнообразных по составу пылей со значительным колебанием их концентраций.

К заболеваниям, обусловленным действием сельскохозяйственной пыли, относят хронический пылевой бронхит. У работников сельского хозяйства он развивается, как правило, после длительного — до 15 лет и более — стажа работы в пылевой профессии. Длительное действие волокнистых растительных пылей может вызывать биссиноз. Нативная почвенная пыль при наличии в ней свободного диоксида кремния и силикатов при длительном воздействии может приводить к развитию умеренно выраженных диффузно-склеротических и узелковых изменений в легких. Пыльца некоторых ветроопыляемых растений может быть причиной аллергических заболеваний — поллинозов.

Периодическое выполнение некоторых сельскохозяйственных работ в чрезвычайно запыленной зоне может вызывать у работающих заболевания дыхательных путей (риниты, фарингиты, трахеиты, острые бронхиты), глаз (конъюнктивиты, блефариты, язвы роговой оболочки) и кожи (дерматиты,

пиодермиты). Эти заболевания в большинстве своем носят сезонный характер и прекращаются с завершением тех или иных работ.

Шум. Работа тракторов, сельхозмашин сопровождается интенсивным шумом. Источниками шума являются работа двигателя, трансмиссии, вибрация ограждений и др.

У операторов сельскохозяйственных машин как следствие действия интенсивного шума в сочетании с вибрацией может развиваться понижение слуха. Первые признаки тугоухости у механизаторов сельского хозяйства появляются при профессиональном стаже 15 лет и более. Причем эти наблюдения относятся к лицам, длительное время работавшим на старой технике, нередко не оборудованной кабинами или с кабинами без надлежащего шумопоглощения.

Вибрация. В процессе выполнения полевых работ трактористы, прицепщики, водители самоходных сельскохозяйственных машин подвергаются комбинированному воздействию общей и локальной вибрации сложного характера.

Источниками вибрации являются работа двигателя, ходовая часть и непосредственно движение по неровной поверхности (агрофону). Работа двигателя создает высокочастотную вибрацию, наибольшие уровни которой находятся в пределах октавных полос со среднегеометрическими частотами 31,5—125 Гц. Эта вибрация, как правило, не превышает допустимых уровней. Она должна рассматриваться как общая, поскольку передается через сидение и пол на весь организм, и одновременно как локальная, поскольку через рулевое колесо и рычаги управления она передается на руки оператору. Ходовая часть и движение по неровному агрофону создают преимущественно общую вертикальную и частично горизонтальную вибрацию. Наибольшие уровни ее на тракторах и сельскохозяйственных машинах при выполнении полевых работ находятся в пределах 2—5 Гц. Эти частоты соответствуют резонансным и уровни вибрации могут превышать предельно допустимые.

Наибольшее превышение отмечается на гусеничных тракторах, так как гусеница плохо гасит колебания и подвеска на этих машинах менее совершенна, чем на колесных тракторах.

В процессе эксплуатации машин в силу износа отдельных деталей и механизмов параметры вибрации возрастают.

Движение сельскохозяйственных машин по неровному рельефу, преодолению препятствий в виде камней, глубоких рытвин и т. п. сопровождается появлением аperiodических толчков различной амплитуды и жесткости. Параметры толчкообразных колебаний могут достигать значительных величин, в 5—10 раз выше нормируемых. Им принадлежит определяющая роль в развитии неблагоприятных последствий длительного действия механических колебаний на механизаторов сельского хозяйства. С воздействием вертикальных низкочастотных колебаний толчкообразного характера связывают, в частности, развитие дегенеративно-дистрофических изменений в позвоночнике, которые проявляются в виде деформирующего остеоартроза и дискозов. У трактористов с большим стажем работы обнаруживаются остеохондрозы в пояснично-крестцовой части позвоночника. Патология, как правило, сопровождается возникновением вторичных корешковых расстройств, приводящих к нарушению трудоспособности. Действием низкочастотных колебаний и толчков можно объяснить гастроптозы, которые у трактористов с большим стажем обнаруживаются значительно чаще, чем у работников других профессий. Развитие гастроптозов связано с ослаблением связочного аппарата желудка в результате непрерывных его колебаний. Опущение желудка сопровождается нарушением его моторной и секреторной функций.

Общая и толчкообразная вибрация оказывает отрицательное влияние на женскую половую сферу. У женщин-механизаторов длительно работающих на тракторах и других сельскохозяйственных машинах с плохо амортизированными сидениями, наблюдаются расстройства менструально-

овариального цикла, обострения воспалительных процессов в женских половых органах.

Вредные химические вещества. В процессе выполнения полевых работ механизатор имеет контакт со многими вредными химическими соединениями. Основными из них являются выхлопные газы, горюче-смазочные материалы, пестициды, минеральные удобрения и др.

В состав выхлопных газов входят такие токсические вещества, как оксид углерода, при использовании дизельного топлива - формальдегид и акролеин, оксиды азота. При нарушении герметичности кабин, работе с открытыми окнами при сильном встречном ветре или при полном штиле и инверсиях, особенно если имеет место неполное сгорание топлива при неисправности двигателя или нарушении режима его работы, может создаваться опасность острых и хронических интоксикаций, в первую очередь оксидом углерода.

Контакт механизаторов с пестицидами имеет место при приготовлении их к работе и технологическом использовании препаратов.

Меры безопасности при работе с ядохимикатами изложены в соответствующем разделе учебника. Следует лишь отметить, что кабины современных тракторов при исправно работающей вентиляционной системе надежно защищают механизатора от воздействия пестицидов. Однако надо иметь в виду, что в реальных условиях в жаркую погоду, особенно в южных районах страны, где механизаторы работают на тракторах без кабин или открывают окна кабин для проветривания, концентрация ядохимикатов (при интенсивном их испарении) может превышать предельно допустимые величины.

Организация рабочего места оператора сельскохозяйственных машин. Рациональная организация рабочего места, как известно, способствует достижению высокой производительности труда, поддержанию нормальной работоспособности и сохранению здоровья рабочих, поэтому выполнение эргономических требований должно предусматриваться уже на этапе проекти-

рования сельскохозяйственных машин. Управление машиной осуществляется в положении сидя, обычно в напряженной рабочей позе: манипулирование рычагами управления и рулевым колесом выполняется при непрерывном наблюдении за объектами, находящимися вне кабины. При этом в напряженные периоды полевых работ продолжительность рабочей смены удлиняется, работа выполняется не всегда в оптимальных микроклиматических условиях и сопровождается толчкообразными колебаниями; последнее обстоятельство требует дополнительных статических мышечных усилий для поддержания определенной позы.

Интенсивность нагрузки на нервно-мышечный аппарат зависит от типа рабочих движений и тех усилий, которые прилагает механизатор, оперируя рычагами управления. Специальными исследованиями установлено, что число включений оператором рычагов и педалей в 1 мин составляет от 15 до 60, при величине усилий на рычагах ручного управления 29,4—117,6 Н и ножных педалей 117,6—263 Н. Темп рабочих движений увеличивается пропорционально повышению рабочих скоростей машинно-тракторного агрегата.

Заболеваемость. У механизаторов сельского хозяйства широко распространены заболевания периферической нервной системы и опорно-двигательного аппарата. Наиболее частыми в числе этих заболеваний являются люмбалгии и пояснично-крестцовый радикулит.

Первые признаки люмбалгии отмечаются при стаже работы в профессии механизатора не менее 5 лет. Заболевание чаще обостряется в весенне-осенний период. Пояснично-крестцовые радикулиты чаще возникают при стаже работы свыше 10 лет, характеризуются длительным течением, выраженными вегетативно-сосудистыми нарушениями.

Заболевания периферической нервной системы у механизаторов отличаются медленным прогрессирующим течением, приводящим к ограничению трудоспособности в данной профессии при стаже 15—20 лет. Эта патология

часто сочетается с изменениями в позвоночнике в виде остеохондроза и деформирующего спондилеза.

В отдельных случаях у механизаторов сельского хозяйства наблюдается своеобразная патология с церебральными и периферическими ангиодистоническими нарушениями, которые условно можно рассматривать как вибрационную болезнь. Клиническая симптоматика выраженных форм этой патологии укладывается в картину полирадикулоневропатии с выраженными вегетотрофическими нарушениями и умеренным болевым синдромом. Это заболевание развивается при производственном стаже 10—15 и более лет. Безусловно, наряду с вибрацией существенное значение в развитии данной патологии играют такие производственные факторы, как охлаждение, вынужденное положение, физическое напряжение и др.

У высокостажированных механизаторов (при стаже работы в профессии 15 лет и более) может развиваться кохлеарный неврит. Заболевание, как правило, развивается как двусторонний процесс и сопровождается легкой, реже средней степенью нарушения слуховой функции.

При длительной работе механизаторов в условиях высокой запыленности воздушной среды возможно развитие пылевых форм патологии бронхолегочного аппарата, и в первую очередь диффузного хронического бронхита.

У механизаторов наблюдается повышенный уровень неспецифических заболеваний органов пищеварения, что следует объяснить не только влиянием неблагоприятных производственных факторов, таких, как толчки и общая вибрация, но и нарушением режима питания и не всегда качественным питьевым водоснабжением. Совершенствование сельскохозяйственных машин, усиление санитарного контроля за их эксплуатацией, улучшение бытового обслуживания механизаторов привели к снижению частоты заболеваний кохлеарным невритом, пылевым бронхитом, желудочно-кишечной патологией.

Вместе с тем в последние годы наметилась тенденция к повышению неспецифических заболеваний центральной нервной и сердечно-сосудистой системы. По-видимому, причиной роста указанных заболеваний является постоянное увеличение нервно-эмоционального напряжения в трудовой деятельности операторов сельскохозяйственных машин.

В наиболее напряженные периоды полевых работ у механизаторов отмечается увеличение числа случаев гнойничковых заболеваний кожи, в первую очередь таких как фурункулы, карбункулы, гидрадениты. Это обусловлено постоянным загрязнением кожи нефтепродуктами и пылью, микро-травматизацией, ослаблением иммунно-защитной реактивности организма, связанной с переутомлением, а также недостатками медико-санитарного обслуживания.

МАШИННАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ПОЧВ

<http://www.ecolodesire.ru/deseecs-442-1.html>

«Машинная деградация почвы» (МДП) – комплекс вредных последствий массивованного воздействия на почву ходовых систем машин и рабочих органов почвообрабатывающих орудий. Сюда входят переуплотнение почвы и истребление почвенных микроорганизмов, нарушение структуры, снос перемолотой земли водой и ветром. Только из-за переуплотнения урожай зерновых снижается на 20%, бесполезно расходуется до 40% минеральных удобрений и 18% горючего.

Сейчас в России из 132 млн. га пашни на 87 млн. полностью разрушена структура пахотного горизонта. На каждом гектаре пашни ежегодно вырабатывается 23 эталонных гектара пахоты — в течение сезона землю пашут, боронят, лущат, культивируют и т.д. Враг поля — резиновое колесо. За сезон трактор «Беларусь» образует на гектаре 12–14 т пыли. Плодородный слой перетирается колесами, уносится ветрами. Оставшаяся часть под давлением техники настолько уплотняется, что порой не поддается обработке плугом. Тяжелые колесные тракторы создают в 3-4 раза больше пыли, чем гусеничные.

Интенсивное применение тяжелой техники приводит не только к разрушению структуры пахотного слоя, но и к уплотнению глубоких горизонтов почвы, а возникшая на глубине 50–70 см повышенная плотность не восстанавливается до оптимальных величин. Таким образом, наиболее опасным эффектом МДП является повышенное уплотнение корнеобитаемого слоя. Это явление тем более пагубно, что оно проявляется незаметно для земледельца и имеет тенденцию прогрессирующего нарастания.

Роль плотности в становлении свойств почвы к жизни растений многогранна. Она оказывает значительное влияние на накопление воды и пищи, а также соотношение воды и воздуха в почве. На плотных почвах резко ухудшаются водный режим и газообмен, снижается биологическая активность.

Различные растения неодинаково реагируют на степень уплотнения почвенного профиля. До некоторой степени переносят уплотнение корнеобитаемого слоя подсолнечник, люцерна, хлопчатник, рис, слива, вишня. Наоборот, очень рыхлых почв требуют овощные культуры, кукуруза, черешня, виноград. Особенно неблагоприятна высокая плотность для клубнеплодов. У картофеля, например, увядает ботва, клубни деформируются, удлиняются, падает урожайность.

Плотность почвы оказывает влияние на численность микроорганизмов, на биологическую активность почвы. Нормальный газообмен нарушается при плотности более 1,45 г/см³. Начинает проявляться анаэробизис. Это вызывается сокращением количества макропор и крупных капилляров, подавляется диффузия воздуха и газообмен между почвой и атмосферой. В почвах резко снижается содержание кислорода. Меняется направление биологического превращения веществ, подавляется разложение органического вещества.

Проблема уплотнения грунтов ходовыми системами сельскохозяйственных машин

http://uchebnikionline.com/geografia/zemlerobstvo_-_gudz_vp/problema_uschilnennya_gruntiv_hodovimi_sistemami_silskogospodarskih_mashin.htm

Интенсификация сельскохозяйственного производства привела к увеличению количества мероприятий, связанных с работой МТА на поле. Так,

при выращивании зерновых культур необходимо выполнить около 8-15 отдельных мероприятий, а пропашных - 20-25.

Неблагоприятные факторы уплотнения негативно влияют на водно-физические свойства почвы: растет плотность и твердость (по разным данным - до глубины 30 -120 см), снижается скорость поступления в грунт атмосферной влаги, уменьшается ее доступность и резко ухудшаются условия для развития корневых систем растений. Исследованиями установлено, что увеличение или уменьшение объемной массы почвы от оптимальной на 0,1-0,3 г/см³ приводит к снижению урожая на 20-40%

Многочисленные циклические перемещения МТА по полю приводят к тому, что площадь, которая покрывается ходовыми системами тракторов, превышает площадь поля. Так, без учета уборочно-транспортных работ при выращивании озимой пшеницы площадь, которая покрывается колесами и гусеницами тракторов на 1 га, достигает в среднем 2226 тыс. м², при выращивании кукурузы - 18-30, сахарной свеклы - 30-32 тыс. м².

Однако количество проходов по одному и тому же месту поля неодинаково. При выращивании озимой пшеницы более 30% площади поля испытывает двукратное действие ходовыми системами тракторов, 20 - шестикратный и 2% - восьмикратный. Не уплотняется лишь 10% площади поля. Поворотные полосы утаптываются колесами и гусеницами машин до 20 раз в течение года (А С Кушнарев, В И Кочевий, 1989, 1989).

Действие ходовых систем тракторов на почву зависит от типа движителя (гусеничный, колесный) и массы трактора. При работе тракторов МТЗ-80, ДТ-75М, Т-70С уплотнительное действие распространяется на глубину до 45 см, Т-150К и К-700 - на 50-70 см. Иногда уплотнения от воздействия ходовых систем тракторов Т-150К и К-700 распространяется на глубину 1-1,2 м. При этом существенно увеличивается объемная масса пахотного и подпахотного слоев, достигая 1,35-1,45 г / с/см³, уменьшается общая пористость на 23-25%.

Во многих почвенно-климатических зонах плотность строения почвы не самовосстанавливается и в последующие годы

Уплотнение грунта связано прежде всего с изменением порового пространства, причем этот процесс начинается с деформации крупных некапиллярной пор. Наиболее ценными для физических свойств почвы является размер пор 100-300 микрон и более, по которым транспортируется и перераспределяется большое количество воды, быстро и глубоко проникает в почву воздух. Влага, содержащаяся в порах размером менее 10 мкм, малодоступна растениям. Уплотнение грунтов приводит к уменьшению пор размером более 10 мк. Так, при уплотненности почвы от 1,25 до 1,62 г / ст/см³ общая пористость уменьшается от 52 до 39%. По объемной массе 1,32 г / см³ поры размером более 300 мк составляют 2-3% от объема почвы. При уплотнении до 1,50 г/см³ количество пор более 10 мк уменьшается до 6%, но в 1,5 раза увеличивается объем пор размером менее 3 мкм (А С Кушнарев, В И Кочевий, 1989) Это приводит к тому, что при одинаковой весовой влажности уменьшается количество доступной растениям влаги, и увеличивается содержание недоступной воды. Даже после полива запас доступной влаги в активном слое почвы на уплотненных участках на 250-300-300 м³/га ниже, чем на неуплотненных. Кроме того, водопроницаемость уплотненной ходовыми системами тракторов почвы уменьшается в 2-4 раза и более.

Уплотненность почвы ухудшает воздухообмен, питательный и температурный режимы, снижает биологическую активность почвы. Интенсивность выделения из уплотненного грунта CO₂ уменьшается в 1,2-1,6 раза. Основной формой азота в уплотненном грунте (до 95%) в течение вегетационного периода растений является аммонийный, что связано с ухудшением воздушного режима.

Температура почвы по следу трактора отличается от температуры почвы вне следа в течение суток. Уплотненный грунт в утренние часы имеет более низкую температуру, чем неуплотненный, днем прогревается сильнее, а

вечером быстрее охлаждается Амплитуда колебаний температуры выше в уплотненной почве, чем в неуплотненных.

Увеличение твердости почвы вследствие уплотнения препятствует прохождению зародышевого корешка и ухудшает аэрацию в период повышения влажности, что снижает всхожесть семян. Корни на уплотненных участках деформируются и концентрируются в слоях с пониженной плотностью грунта, вследствие чего уменьшается урожайность культур. В уплотненный грунт корни растений проникает слабо, до 80% его находится в слое 7-10 см.

Уплотнение грунта ходовыми системами вызывает глыбообразование. На уплотненных участках суглинистых и глинистых грунтов во время пахоты образуются глыбы диаметром 60-70 см и массой 35-40 кг; существенно нарушается крошение при подготовке такого вспаханного почвы под посев культур. Если на неуплотненных участках комков размерами более 10 мм насчитывает 12-15%, то на уплотненных колесами трактора К-700 их в верхнем слое 38-45%.

Вспашка и следующая механическая обработка предварительно уплотненного грунта хотя и снижают его объемную массу до $0,9-1 \text{ г / см}^3$, но сопровождаются образованием глыб. Одновременно с этим растут затраты энергии на обработку. Так, на следах гусеничных тракторов сопротивление вспашке растет на 16-25%, тяжелых колесных тракторов и автомобилей - на 46-65, транспортных агрегатов - на 72-90%. Чтобы получить примерно одинаковые показатели крошения почвы в колее, образованной колесом Т-150К, и за ее пределами, необходимо приложить усилия, которые отличаются в 10 раз. Вследствие уплотнения грунта, как показывают результаты исследований, снижается урожай кукурузы на зерно и зеленую массу до 30%, озимой пшеницы - до 27, сахарной свеклы - до 15, ячменя - до 24, картофеля - до 25% (А С Кушнарев, В И Кочевий, 1989в, 1989).

Воздействие автотранспортных средств на окружающую среду

<http://privetstudent.com/referaty/referaty-po-ekologii/page,3,1316-vozdeystvie-avtotransportnyh-sredstv-na-okruzhayuschuyu-sredu.html>

Воздействие машин на почву

От состояния почв, качества и площади зеленого покрова Земли зависит продуктивность биосферы, поскольку процесс фотосинтеза как важного звена в цепочке ее жизнеобеспечения осуществляет постоянный круговорот и обновление углекислого газа, кислорода и воды, являющихся ключевыми компонентами атмосферы.

В настоящее время под сельскохозяйственные культуры используется 10... 11 % всей суши (около 1, 5 млрд га), под пастбища и луга отведено 23... 30 %, а под продуктивные лесные массивы — около 27 %.

Применение в сельском хозяйстве тракторов и самоходных машин увеличенной мощности и массы привело к увеличению их давления на почву. Так, давление ходовых систем тракторов на почву возросло до 100... 180 кПа, прицепов и машин для внесения удобрений — до 160... 420 кПа, большегрузных автомобилей до 450... 700 кПа.

Современные технологии возделывания сельскохозяйственных культур предусматривают многократные проходы машин по полю. Вследствие этого площади полей подвергаются за сезон двух-четырёхкратному воздействию ходовых систем машин, а отдельные участки поля — восьми-шестнадцатикратному.

Увеличение давления на почву и числа проходов движителей ходовых систем машин по полю поставили перед земледелием серьезную проблему переуплотнения почв, которая с каждым годом становится все острее. При-

чем переуплотнение почв происходит не только в пахотном, но и в подпахотном горизонтах (на глубину 0,6... 1 м) и сохраняется в течение ряда лет.

В результате корневая система растений формируется в пределах почвообрабатываемого слоя (25... 30 см), содержание влаги в котором неустойчиво, что в значительной мере отражается на стабильности урожая выращиваемых культур. Поскольку максимальная глубина обработки почвы в растениеводстве в основном не превышает 30 см, процесс снижения эффективности плодородия почвы под воздействием многократного уплотнения ходовой частью машин носит кумулятивный (накопительный) характер. Урожайность сельскохозяйственных культур снижается от 5,1 % при одно- и двукратном уплотнении в первый год и до 18 % на четвертый год после четырех- и восьмикратного суммарного уплотняющего воздействия.

Последствия уплотнения почвы движителями тракторов определяются характеристиками почвы во время воздействия на нее и, главным образом, максимальным контактным давлением. Так, при воздействии движителя с максимальным контактным давлением 125,5 кПа физические свойства практически восстанавливаются через год в результате саморазуплотнения почвы и проводимых обработок. При максимальном контактном давлении 183... 205 кПа существенное остаточное уплотнение в пахотном слое сохраняется в течение двух лет. Связано это с тем, что высокое контактное давление деформирует структуру почвы, отдельные ее агрегаты, пористость которых обработкой почвы и ее рыхлением не восстанавливаются.

Ходовые системы тяжелых сельскохозяйственных машин вызывают снижение урожайности многоукосных луговых травостоев. Это снижение начинается с уровня среднего давления 200 кПа и составляет в среднем 19 %. При уровне давления 300 кПа снижение урожайности уже не менее 20 %. Особенно страдает урожай во втором и последующих укосах (до 59... 73 %).

Применение универсальных колес с развитым рисунком протектора не улучшает ситуацию, поскольку работа колесного движителя характеризуется

буксованием в несколько раз большим, чем буксование гусеничного двигателя. Поэтому колесо срывает поверхностный слой почвы, и колесные машины в тяговом режиме способны нанести большой вред по сравнению с гусеничными.

Результат выполнения НИР

<http://www.ideasandmoney.ru/Ntrr/Details/127060>

Одной из серьезных проблем, с которой столкнулось современное земледелие, является машинная деградация почвы, заключающаяся в переуплотнении и разрушении верхнего продуктивного слоя почвы ходовыми системами сельскохозяйственных машин. Эти явления глобальны и наносят громадный агроэкологический ущерб, особенно значимый в зонах с радиоактивным заражением почв.

Однозначно доказано, что ходовые системы сельскохозяйственной техники оказывают негативное воздействие на всю совокупность физических свойств почвы и как следствие, приводят к значительному снижению плодородия и урожаев.

Это положение усугубляется и тем, что при современных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур неизбежны многократные проходы по полю различных машин. По некоторым данным, от 30 до 80 % поверхности полей подвергаются 3-9-кратному воздействию двигателей.

Особенно повышается опасность машинной деградации почвы в связи с увеличением в сельскохозяйственном производстве доли тяжелых колесных тракторов (Т-150К, К-701), приводящих к росту напряжения в пахотном слое почвы приблизительно в 2 раз выше, чем в случае применения гусеничных тракторов.

**Уплотняющее воздействие на почву тракторов кл.2
при возделывании картофеля**

http://edu.rgazu.ru/file.php/1/vestnik_rgazu/data/20150119_2/ramazanova_gg.pdf

В связи интенсификацией сельскохозяйственного производства и использованием новых более тяжелых тракторов неразрывно связано значительное возрастание отрицательного воздействия ходовых систем машин на плодородие почвы. Так на возделывании пропашных культур в настоящее время вместо тракторов кл. 1,4 (тракторы типа МТЗ-80/82) часто применяют тракторы класса 2,0 (типа МТЗ-1221, Джон-дир 6920 и др.). В связи с тем, что новые тракторы имеют большую массу (5,3 тонны и более), то и давление на почву они оказывают большее. Известно, что при увеличении плотности почвы на $0,2 \text{ кг/см}^2$ от оптимального значения урожайность пропашных культур, на возделывании которых применяются новые более тяжелые тракторы, снижается, например, картофеля на 54%, сахарной свеклы на 13%.

**Перечень описаний некоторых изобретений СССР
в области индукционной сельскохозяйственной навигации**

1. Андрианов В.В. и др. Устройство для автоматического направления движения самоходных агрегатов. А.с. 615880, ОНИС НАТИ. БИ № 27, 25.07.1978.
2. Андрианов В.В. и др. Устройство для автоматического вождения колесного трактора. А.с. 1210685. ОФ НАТИ. БИ № 6, 15.02.1986.
3. Аронов И.Б, Домонтович М.В. Устройство для автоматического управления движением транспортного средства. А.с. 344809, БИ №22, 14.07.1972.
4. Балыкин В.А. Система для автоматического направления движения мобильных агрегатов. А.с.276566, БИ № 23, 14.07.1970.
5. Балыкин В.А. Система для автоматического направления движения мобильных агрегатов. А.с. 345889. БИ № 23, 28.07.1972.
6. Балыкин В.А. Система для автоматического направления движения мобильных агрегатов. А.с. 354783. БИ №31, 16.10.1972.
7. Балыкин В.А. Система для группового автоматического вождения мобильных агрегатов. А.с. 477684. БИ № 27, 25.07.1975.
8. Балыкин В.А. Способ автоматического направления движения тракторного агрегата по ориентирующему токопроводу. А.с. 352619. БИ № 29, 29.09.1972.
9. Белый В.Г. и др. Устройство для автоматического управления движением транспортного средства. А.с. 650538. БИ №9, 05.03.1979.
10. Белый В.Г. и др. Устройство для автоматического управления движением самоходного агрегата. А.с. 767710. БИ №36, 30.09.1980.

11. Биенко Ю.Н и др. Устройство для ориентации транспортного средства в электромагнитном поле токонесущего провода. А.с. 1064884, ИЭ АНБ. БИ № 1, 07.01.1984.
12. Богданов А.А. и др. Устройство автоматического направления движения самоходных агрегатов. А.с. 399219, ОНИС НАТИ. БИ № 39, 03.10.1973.
13. Богданов А.А и др. Устройство автоматического направления движения самоходных агрегатов. А.с.399219, ОНИС НАТИ, БИ 03.10.1973.
14. Богданов А.А и др. Устройство ориентации для систем группового автоматического вождения машинно-тракторных агрегатов. А.с. 1376963, ОФ НАТИ. БИ № 8, 29.02.1988.
15. Богданов А.А. и др. Способ ориентации самоходных машин в индукционном поле токонесущего провода. А.с. 695600. ОНИС НАТИ, БИ 05.11.1979.
16. Богданов А.А. и др. Способ ориентации самоходных машин в индукционном поле токонесущего провода. А.с. 695600, ОНИС НАТИ, ОЭТИС. БИ № 41, 05.11.1979.
17. Гехман и др. Система автоматического управления самоходными агрегатами при полигонных испытаниях в режиме крутых поворотов. А.с.173500, БИ №15, 21.07.1965.
18. Гореликов А.И. и др. Устройство формирования направляющего электромагнитного поля для управления дождевальными машинами. А.с. 1069654. БИ № 4, 30.01.1984.
19. Гурьянов В.А и Зеленецкий О.В. Устройство для автоматического направления движения трактора. А.с. 231918, ВИМ. БИ № 36, 28.11.1968.
20. Гурьянов В.А, Зеленецкий О.В. Устройство для автоматического направления движения трактора по магнитному полю ориентирующих проводов. А.с. 276567, ВИМ, БИ № 23, 14.07.1970.
21. Драгаев В.П. и др. Устройство автоматического управления движением транспортного средства. А.с. 847950, ОТИПП. БИ № 27, 23.07.1981.

22. Драновский А.И и др. Устройство автоматического направления движения самоходной колесной машины. ОНИС НАТИ. А.с.249110, БИ № 24, 18.07.1969.
23. Драновский А.И. и др. Устройство для автоматического вождения колесных машин. А.И.206215, БИ №24, 02.12.1967.
24. Драновский А.И. и др. Устройство для автоматического направления движения самоходных агрегатов для комплексной автоматизации сельскохозяйственных работ. А.с.323087, ОНИС НАТИ, БИ № 1, 10.12.1971.
25. Заиченко В.В. и др. Устройство для автоматического направления движения самоходных машин по токонесущему проводу. А.С. 345890, ОНИС НАТИ, БИ № 23, 28.07.1972.
26. Заиченко В.В. и др. Чувствительный элемент для систем автоматического направления движения самоходных машин по эквидистантным линиям относительно токонесущего провода. А.с. 312560, ОНИС НАТИ, БИ №26, 31.08.1971.
27. Заиченко В.В. и др. Чувствительный элемент для систем автоматического направления движения самоходных машин по эквидистантным линиям относительно токонесущего провода. А.С. 454000, ОНИС НАТИ. БИ №47, 25.12.1974.
28. Заиченко В.В., Драновский А.И. Способ ориентации самоходных машин в индукционном поле токонесущего провода. А.С. 398197, ОНИС НАТИ. БИ № 38, 27.09.1973.
29. Заиченко В.В., Драновский А.И. Устройство для измерения курсового угла самоходных машин. А.с. 377616, ОНИС НАТИ. БИ №18, 17.04.1973.
30. Заиченко В.В., Драновский А.И. Чувствительный элемент для систем автоматического направления движения самоходных машин по эквидистантным линиям относительно токонесущего провода. А.С. 385548, ОНИС НАТИ. БИ №26, 14.06.1973.

31. Заиченко и др. Устройство для измерения курсового угла самоходной машины. А.с. 324969, ОПИ, БИ №3, 07.01.1972.
32. Калинин В.М., Польшинников В.А. Устройство для автоматического управления движением самоходного средства. А.с. 976875. НПО «Сибцветметавтоматика». БИ № 44, 30.11.1982.
33. Калюжный А.Т. и др. Индукционное устройство для группового вождения тракторных агрегатов. А.с. 835320, СибИМЭ. БИ № 21, 07.06.1981.
34. Калюжный А.Т. и др. Способ дублирного вождения машинно-тракторных агрегатов. А.с. 1382417. СибИМЭ, БИ №11, 23.03.1988.
35. Калюжный А.Т. Индукционная система дублирного вождения машинно-тракторных агрегатов. А.с. 1246911, СибИМЭ. БИ № 28, 30.07.1986.
36. Калюжный А.Т. Способ программирования траектории движения сельскохозяйственных агрегатов. А.с. 751343, СибИМЭ. БИ №28, 30.07.1980.
37. Калюжный А.Т., Емельянов М.В. Индукционное устройство для группового вождения широкозахватных тракторных агрегатов. А.с. 829001, СибИМЭ. БИ № 18, 15.05.1981.
38. Калюжный А.Т., Лазовский В.В. Способ ориентации самоходных машин в переменном магнитном поле двух токонесущих проводов. А.с. 810112, СибИМЭ. БИ № 9, 07.03.1981.
39. Калюжный А.Т., Лукашук В.Г. Способ местоопределения машинно-тракторного агрегата в переменном магнитном поле токонесущего контура. А.С. 1358808, СибИМЭ. БИ № 46, 15.12.1987.
40. Кирток О.В. и др. Устройство для автоматического направления движения мобильных объектов. А.с. 299192, ОПИ, БИ №12, 26.03.1971.
41. Константиновский М.С. Способ автоматического вождения сельскохозяйственного агрегата. А.с. 1785595. БИ № 1, 07.01.1993.
42. Кравченко В.М. и др. Индукционная система автоматического направления движения самоходных машин при полигонных испытаниях. А.с. 344808. КубНИИ, БИ № 22, 14.07.1972.

- 43.Кремен О.Г. и др. Способ ориентации самоходных машин в переменном магнитном поле токонесущий проводов. А.с. 1017180, ИГД АНК. БИ № 18, 15.05.1983.
- 44.Кремер О.Г. и др.. Способ ориентации самоходных машин в переменном электромагнитном поле токонесущих проводов. А.с. 1147258, ИГД АНК. БИ № 12, 30.03.1985.
- 45.Кремер О.Г., Кокетаев А.И. Способ ориентации самоходной машины в переменном магнитном поле токонесущих проводов. А.с. 1087965, ИГД АНК. БИ № 15, 23.04.1984.
- 46.Кремер О.Г., Кокетаев А.И. Способ ориентации самоходных машин в переменном электромагнитном поле токонесущих проводов. А.с. 1136757, ИГД АНК. БИ № 4, 30.01.1985.
- 47.Кремер О.Г., Кокетаев А.И. Способ ориентации самоходных машин в переменном электромагнитном поле токонесущих проводов. А.с. 1139378, ИГД АНК. БИ № 6, 15.02.1985.
- 48.Лапин А.Н. Способ ориентации самоходного объекта относительно токонесущего провода. А.с. 1493130, БТИ. БИ № 26, 15.07.1989.
49. Литинский С.А и Гурьянов В.А. Устройство для автоматического вождения трактора на винограднике. А.с. 169305, БИ №6, 11.03.1965.
50. Литинский С.А. и др. Устройство для автоматического вождения трактора на винограднике. А.с. 149119, БИ №15 за 1962 г.
51. Литинский С.А. Устройство для измерения траектории самоходных машин. А.с. 235437, БИ № 5, 16.01.1969.
52. Литинский С.А. Устройство для измерения угла отклонения движения самоходной машины относительно базовой линии. А.с. 422955. БИ №13, 05.04.1974.
53. Малинов Д.М и др. Система автоматического вождения мобильных агрегатов. А.с. 620234, ПНИИС НАТИ. БИ №31, 25.08.1978.

54. Мищенко Л.В. и др. Способ автоматической ориентации полевых агрегатов. А.с. 634703. БИ №44, 30.11.1978.
55. Новиков В.А и др. Способ ориентации самоходной машины в индукционном поле токонесущего проводника. А.С. 1285148, ИЭ АНБ. БИ № 3, 23.01.1987.
56. Новиков В.А и др. Устройство контроля положения горной машины в индукционном поле токонесущего проводника. А.С. 1263844, ИЭ АНБ. БИ №38, 15.10.1986.
- 57.Новиков В.А. и др. Устройство для ориентации транспортных средств в электромагнитном поле токонесущего проводника. А.с. 1777682, ИЭ АНБ. БИ № 44, 30.11.1992.
- 58.Новиков В.А. и др. Устройство для ориентации транспортных средств в электромагнитном поле токонесущего проводника. А.С. 1796087, ИЭ АНБ. БИ № 7, 23.02.1993.
59. Платонов П.Н. и др. Устройство автоматического управления движением транспортного средства. А.с. 471872, ОТИПП. БИ №20, 30.05.1975.
60. Погирный Ю.В. и др. Система управления автоматическим транспортным модулем. А.с. 1558317, ОТИПП. БИ №15, 23.04.1990.
- 61.Прокопов О.И. Система для автоматического вождения сельскохозяйственного агрегата. А.с. 1052179, БСИ. БИ № 41, 07.11.1983.
- 62.Прокопов О.И. Система для автоматического вождения сельскохозяйственного агрегата. А.с. 1058528, БСИ. БИ № 45, 07.12.1983.
- 63.Прокопов О.И. Система для автоматического вождения сельскохозяйственного агрегата. А.с. 1126223, БСИ. БИ № 44, 30.11.1984.
- 64.Прокопов О.И. Система для автоматического вождения сельскохозяйственного агрегата по спиральной траектории. А.с. 1143325, БСИ. БИ № 9, 07.03.1985.
- 65.Прокопов О.И. Система для автоматического вождения транспортного средства. А.с. 1082642, БСИ. БИ № 12, 30.03.1984.

66. Синюшкин Ю.А. Устройство для автоматического направления движения подвижного объекта. А.с. 417101, НАМИ. БИ № 8, 28.11.1974.
67. Стоянов Л.Д. и др. Система автоматического обгона для самоходных агрегатов. А.с. 535041, ОНИС НАТИ. БИ № 42, 15.11.1976.
68. Стоянов Л.Д. и др. Устройство для автоматического направления движения транспортного средства. А.с. 449693, ОНИС НАТИ. БИ №42, 15.11.1974.
69. Ульянов Н.А и др. Система для группового вождения самоходных машин. А.с. 743612. ВИСИ, ВГУ. БИ №24, 30.06.1980.
70. Хорошенко В.К, Евстратов А.М. Чувствительный элемент системы автоматического управления вождением мобильного агрегата. А.с. 791282, ВИМ. БИ № 48, 30.12.1980.