

*А.И. МИТЮШОВ,  
Л.С. ЕГОРЕНКОВ,  
С.А. КАРПОВ*

**ИНДУКЦИОННЫЙ  
СПОСОБ  
ВВОДА ЭНЕРГИИ  
И ИНФОРМАЦИИ  
ВО ВЗРЫВАТЕЛЬ  
В ПРОЦЕССЕ  
АРТИЛЛЕРИЙСКОГО  
ВЫСТРЕЛА**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Балтийский государственный технический университет «Военмех»  
Кафедра автономных информационных и управляющих систем

*А.И. МИТЮШОВ, Л.С. ЕГОРЕНКОВ,  
С.А. КАРПОВ*

**ИНДУКЦИОННЫЙ СПОСОБ  
ВВОДА ЭНЕРГИИ  
И ИНФОРМАЦИИ  
ВО ВЗРЫВАТЕЛЬ В ПРОЦЕССЕ  
АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ВЫСТРЕЛА**

Учебное пособие

Санкт-Петербург  
2019

УДК 623.457.3-585.3(075.8)

**Митюшов, А.И.**

**М67** Индукционный способ ввода энергии и информации во взрыватель в процессе артиллерийского выстрела: учебное пособие / А.И. Митюшов, Л.С. Егоренков, С.А. Карпов; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2019. – 108 с.

ISBN 978-5-907054-88-2

Кратко изложены основные теоретические положения, лежащие в основе построения индукционных линий связи, проанализированы особенности применения таких линий в автономных информационных и управляющих системах. Основное внимание уделено методам расчета индукционных линий на основе теории поля и теории цепей. Предложена методика и рассмотрены примеры расчета индукционных линий связи для передачи энергии и информации во взрыватель.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 17.05.01 «Боеприпасы и взрыватели», по направлениям бакалавриата 27.03.04 «Управление в технических системах» и магистратуры 27.04.04 «Управление в технических системах».

М67

**УДК 623.457.3-585.3(075.8)**

**Р е ц е н з е н т** д-р техн. наук, проф., зав. каф. О8  
БГТУ «Военмех» *П.А. Галайдин*

*Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета*

**ISBN 978-5-907054-88-2**

© БГТУ, 2019  
© Авторы, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в вооруженных силах армий развитых стран большое внимание уделяется развитию высокоточного оружия (ВТО). Отличительным признаком ВТО является способность гарантированно поразить цель одним выстрелом, в любое время суток, в сложных метеорологических условиях при интенсивном противодействии со стороны противника, т.е. реализация принципа "выстрел–поражение". Это оружие позволяет, в случае его массированного применения, не только добиться превосходства в ходе боевых действий, но в корне изменить сам характер войны.

Эффективность ВТО достигается главным образом за счет точной доставки средства поражения к цели, а также за счет многофункциональности боевых элементов. Точная доставка зависит от возможностей систем разведки, целеуказания и управления полётом. Многофункциональность предполагает наличие полного набора боевых элементов по назначению (бронебойных, зажигательных, осколочно-фугасных и т.д.), а также различных режимов их срабатывания (дистанционного, контактного, неконтактного, замедленного и т.д.). Отсюда вытекает необходимость создания унифицированных взрывателей, способных удовлетворить требования к многофункциональности боевых элементов.

Принцип «выстрел–поражение» активно реализуется в артиллерийских системах. Точность доставки (попадания) обусловлена возможностями не только средств разведки и прицеливания, но и средств коррекции траектории снаряда. Решающее значение имеет обеспечение наиболее эффективного режима подрыва боевой части (БЧ) в заданной точке траектории, т.е. в заданный момент времени. Управление устройствами коррекции траектории, режимами срабатывания и моментом подрыва возможно при условии передачи во взрыватель снаряда информации (управляющих сигналов). Для этого используются радиоэлектронные устройства, часть которых располагается во взрывателе. В связи с этим возникают две задачи: 1) обеспечить энергией электронные схемы взрывателя и устройства, инициирующие подрыв БЧ (задача ввода энергии); 2) обеспечить своевременную и надёжную передачу всей необходимой информации во взрыватель (задача ввода информации).

Во взрывательных устройствах применяются различные источники энергии: химические, электромеханические, термоэлектрические и т.д. Для передачи информации используются линии связи разной физической природы: проводные, оптические, радиолнии и т.д. Как правило, принцип работы источника питания во взрывателе никак не связан с принципом работы устройства приема информации. Тем не менее существует способ ввода энергии и информации во взрыватель, основанный на одном физическом явлении – электромагнитной индукции.

Индукционный способ обладает рядом достоинств и позволяет использовать одни и те же элементы для ввода энергии и информации, что уменьшает массогабариты и стоимость взрывателя при сохранении всех функциональных возможностей.

В данном пособии анализируются особенности индукционного способа ввода энергии и информации применительно к артиллерийским системам, излагаются теоретические основы функционирования индукционной линии связи, методы расчёта устройств индукционной связи для таких систем. Описывается способ кодирования информации, учитывающий особенности индукционной линии связи и позволяющий увеличить объём передаваемой информации.

## **1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ В АВТОНОМНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ**

### **1.1. Применение индукционных линий связи в процессе выстрела**

Разрабатываемые средства поражения, в частности артиллерийские системы, должны удовлетворять требованиям к высокоточному оружию, а именно гарантированно поражать цель одним выстрелом в любое время суток, в сложных метеорологических условиях.

Погода в районе боевых действий, направление и скорость ветра могут измениться в любое время. Типы целей, их скорость, направление движения, расстояние до целей постоянно меняются в ходе боя. Эти факторы необходимо учитывать при каждом выстреле. Кроме того, для точного определения момента подрыва необходимо знать реальную скорость каждого снаряда. Следовательно, возникает необходимость ввести в боеприпас информацию о моменте подрыва, режиме срабатывания, времени замедления и т.д. непосредственно во время стрельбы, причём способ ввода не должен ограничивать скорострельность образца вооружения.

Учет почти всех факторов и подготовка данных для стрельбы выполняется спецвычислителем системы управления оружием в реальном времени на основе информации от средств разведки и целеуказания. Ввод этих данных может быть осуществлен до выстрела. Однако точно определить момент подрыва можно только с учетом реальной скорости снаряда, которая зависит от состава пороха, степени разогрева ствола и т.д. Реальную скорость конкретного снаряда можно определить после выстрела, когда снаряд покинул ствол, или в процессе выстрела, когда снаряд движется вблизи дульного среза. В последнем случае необходимо пересчитать скорость в стволе в дульную скорость снаряда.

Рассмотрим возможные способы ввода информации во взрыватель.

**Особенности ввода информации во взрыватель.** В настоящее время наибольшее распространение получили проводные, радиолнии и индукционные линии ввода информации.

*Проводная линия* реализует гальваническую связь электронной схемы взрывателя с внешними электрическими цепями при помощи разъёмов или врезных контактов на корпусе взрывателя. Её основное достоинство – простота.

Недостатки связаны со способом соединения. Ввод информации через разъёмы, соединяемые вручную перед выстрелом, требует времени и ограничивает скорострельность. Использование врезных контактов помогает исключить участие человека, однако требует определённой ориентации боеприпаса, что усложняет заряжающее устройство. Сопrotивление цепи в месте врезания ножей в контактные кольца многократно возрастает при пониженной температуре, появлении инея, загрязнений и т.п. Увеличение силы врезания контактных ножей не решает эти проблемы. Ножи и кольца требуют постоянного обслуживания контактирующих поверхностей. Коррозия в процессе длительного хранения также ухудшает качество контакта. Плохой контакт может привести к частичной потере или искажению информации. Таким образом, существенным недостатком проводной линии связи является низкая надёжность контакта. Кроме того, поскольку ввод информации осуществляется до выстрела, невозможно учесть реальную скорость снаряда после выстрела.

*Радиолния* позволяет вводить информацию до выстрела (на линии заряжания) и после выстрела («вдогон» снаряду). Ввод информации до выстрела не учитывает реальную скорость снаряда. Ввод информации «вдогон» позволяет передавать данные во взрыватель после определения скорости конкретного снаряда, однако имеет три основных недостатка.

1. Этот способ нельзя использовать для артиллерийских систем с высокой скорострельностью (автоматических зенитных установок, корабельных комплексов и т.д.), так как радиосигнал, посланный вдогон, может воздействовать на другие, выпущенные ранее снаряды.

2. Минимальная дальность управляемого подрыва недопустимо возрастает. Это связано с тем, что после выстрела образуется облако раскалённых газов, которое отражает и поглощает радиоволны. Поэтому радиосигнал можно излучать после рассеяния облака – через десятые доли секунды. За это время снаряд пролетает значительное расстояние. Например, снаряд танковой пушки при скорости 1000 м/с за 0,2 с пролетит 200 м. Примерно такой же будет и минимальная дальность подрыва по радиосигналу. В то же время требование к этому параметру, особенно при ведении боевых действий в городе, составляет десятки метров.

3. Радиолиния подвержена организованным помехам, и достоверность получаемой информации может существенно снизиться.

*Индукционный способ* ввода информации, основанный на электромагнитном взаимодействии двух катушек, может быть реализован до выстрела и в процессе выстрела.

До выстрела информация вводится при помощи специального установщика, который стыкуется со снарядом вручную или автоматически (рис. 1.1). В любом случае это ограничивает скорострельность. Вторым недостатком является невозможность учёта реальной скорости снаряда после выстрела.

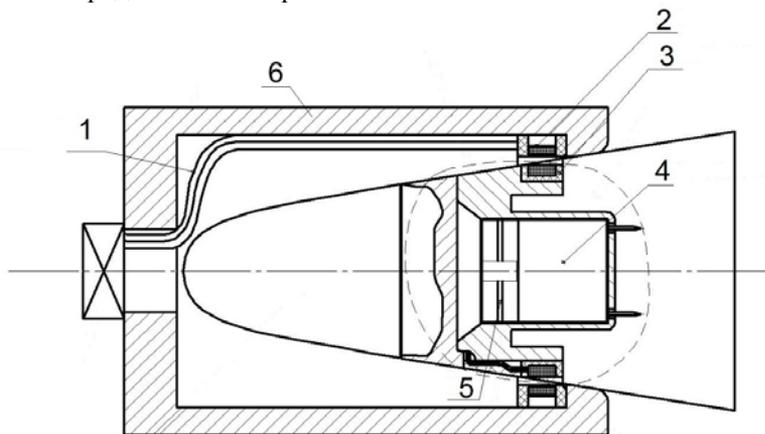


Рис. 1.1. Пример индуктивного установщика: 1 – соединительные провода, 2 – передающая катушка, 3 – приёмная катушка взрывателя, 4 – источник питания, 5 – электронный блок обработки информации, 6 – корпус установщика

Более предпочтителен ввод информации в процессе выстрела. Один из вариантов приведен на рис. 1.2. Индукционный узел ввода информации состоит из трёх катушек. Первые две предназначены для измерения скорости снаряда, а третья – для передачи информационного сигнала, сформированного с учётом проведенных измерений. Координаты цели определяются при помощи радиолокатора обнаружения и сопровождения. Данные о координатах цели с заданной дискретностью передаются в систему управления оружием (СУО). На основании этих данных СУО рассчитывает направление и скорость цели и дальность до неё на любой момент времени, определяет точку встречи и наводит орудие.

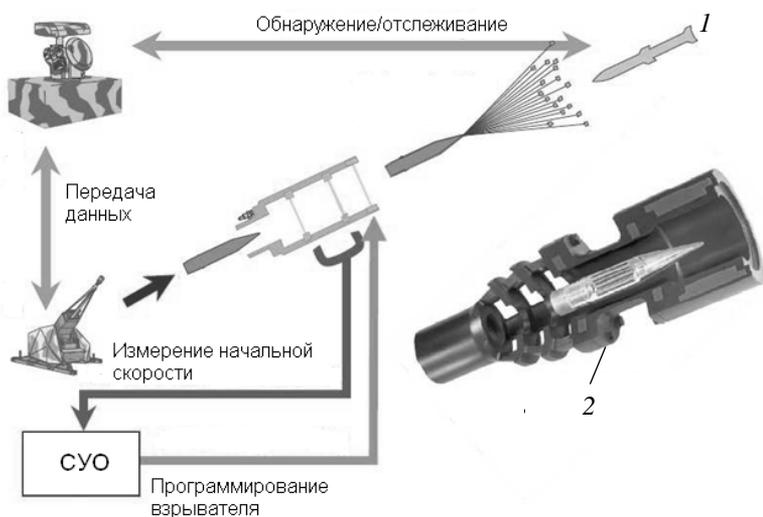


Рис. 1.2. Принцип индукционного ввода информации: 1 – цель; 2 – индуктивный узел с установщиком

В процессе выстрела, во время выхода снаряда из ствола, измеряется его реальная скорость при помощи двух катушек, установленных на известном расстоянии  $\Delta L$ . При пролете снаряда в катушках изменяется магнитный поток и наводится ЭДС электромагнитной индукции. Измерив время  $\Delta t$  между максимумами всплесков ЭДС, можно найти скорость снаряда:  $v_{сн} = \Delta L / \Delta t$ .

Данные о скорости снаряда также поступают в СУО, которая по заданному алгоритму рассчитывает точку встречи с целью и время подрыва снаряда. Алгоритм должен учитывать ряд баллистических

параметров конкретного выстрела, например ракурса цели, угол подхода снаряда к траектории цели, относительную скорость снаряда и цели в районе встречи, данные о метеоусловиях, направление и скорость ветра и т.д. Момент подрыва рассчитывается с учётом реальной скорости снаряда таким образом, чтобы цель находилась в конусе разлёта осколков, а плотность осколков обеспечивала заданную вероятность поражения.

Сформированный в СУО информационный сигнал для программирования взрывателя изменяет ток в третьей, передающей катушке, переменное магнитное поле которой наводит ЭДС электромагнитной индукции в приёмной катушке, расположенной во взрывателе снаряда. Сигнал с приёмной катушки поступает в электронный блок взрывателя, где происходит его декодирование и в заданный момент времени вырабатывается импульс на подрыв БЧ.

Необходимо отметить, что индуктивно связанные катушки представляют собой трансформатор, который является основой вторичных источников питания. Другими словами, ЭДС электромагнитной индукции в приёмной катушке может использоваться и для получения энергии, необходимой для функционирования взрывателя.

***Особенности индукционного ввода энергии в процессе выстрела.*** Появление и развитие ВТО, увеличение требований к средствам поражения привело к необходимости заменить механические взрыватели электронными с улучшенными показателями безопасности, надежности и расширенными функциональными возможностями. Однако при такой замене взрыватель должен быть снабжен собственным малогабаритным источником питания (ИП). Решение этой проблемы, т.е. обеспечение энергией электронного взрывателя, становится одной из главных задач при проектировании боеприпасов. От правильности выбора ИП зависят эффективность применения боеприпаса и безопасность личного состава в условиях войсковой эксплуатации.

Основные требования к ИП:

- 1) гарантированное обеспечение работы электронных узлов и электродетонатора до дальней границы зоны поражения;
- 2) устойчивость к значительным ударным перегрузкам, сопутствующим выстрелу из орудия;
- 3) длительный срок хранения – от 10 лет и более;
- 4) малые габариты и стоимость, что особенно важно для боеприпасов малого и среднего калибра, учитывая их размеры и массовость;
- 5) обеспечение в рабочем режиме питания электронной схемы взрывателя до передачи информационного сигнала.

Электрическая энергия может быть получена путем преобразования различных видов энергии: химической, механической, тепловой, световой и т.д.

Источники питания, используемые во взрывателях, могут быть классифицированы по физическому принципу выработки электроэнергии следующим образом (рис. 1.3):

- химические, в которых химическая энергия различных веществ непосредственно преобразуется в электрическую (аккумуляторы, ампульные источники и термохимические батареи);

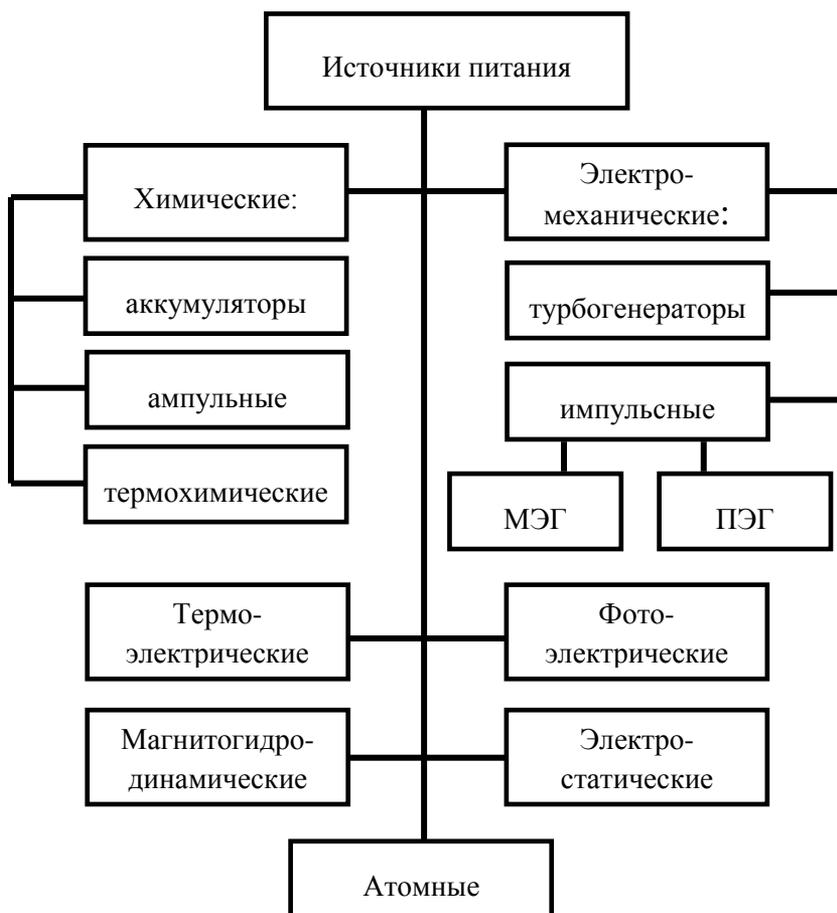


Рис. 1.3. Классификация ИП по физическому принципу действия

- электромеханические, преобразующие механическую энергию в электрическую (турбогенераторы, работающие под воздействием набегающего потока воздуха, а также импульсные магнитоэлектрические генераторы (МЭГ) и пьезоэлектрические генераторы (ПЭГ));

- термоэлектрические, преобразующие тепловую энергию в электрическую;

- фотоэлектрические, преобразующие лучистую энергию светового потока в электрическую;

- магнитогидродинамические и магнитокумулятивные, преобразующие энергию потока ионизированного газа или проводящего вещества в магнитном поле в электрическую энергию;

- электростатические, использующие электростатические заряды на поверхности объекта;

- атомные, в которых энергия внутриатомного распада преобразуется в электрическую энергию.

Анализ требований к ИП взрывателей артиллерийских систем малого и среднего калибра позволяет исключить отдельные типы источников, которые не подходят для обеспечения питанием электронных устройств снаряда в процессе выстрела и на траектории полёта.

От выбора ИП зависит эффективность действия всей системы. При этом источник должен стабильно обеспечивать взрыватель энергией после того, как будет подвергнут значительным ударным перегрузкам, сопутствующим выстрелу из орудия, а также должен быть устойчив к длительному хранению, сроком от 10 и более лет. Одно из основных требований, предъявляемых к ИП, – малые массогабариты, что позволяет исключить проблемы, связанные с его размещением внутри взрывателя.

Альтернативой автономного источника питания, преобразующего различные виды энергии в электрическую энергию, являются *конденсаторные источники питания*.

Конденсатор, так же как аккумулятор, заряжается от посторонних источников электроэнергии. Однако зарядить его можно практически мгновенно, тогда как для заряда аккумулятора требуется длительное время. Но это свойство конденсатора содержит и отрицательную сторону: накапливаемый им заряд сравнительно невелик и потому более или менее длительный расход его возможен только через большое сопротивление при малой силе тока.

В ряде случаев можно использовать конденсаторы очень большой емкости, так называемые *ионисторы*. Их емкость может достигать нескольких фарад. Недостатком ионисторов, затрудняющих их использование во взрывателях, является высокое внутреннее сопро-

тивление, препятствующее быстрому (за доли секунды) заряду при предстартовой подготовке и во время выстрела.

Конденсаторы могут использоваться как единственный источник питания электронного блока, так и в сочетании с более мощными источниками, обеспечивая стабилизацию питания электронного блока в процессе ввода в него данных.

Расширение функциональных возможностей взрывателей, усложнение их схем, использование микроконтроллеров приводило к увеличению тока потребления электронных устройств, что ограничивало область использования конденсаторных ИП задачами, связанными с питанием электронных блоков взрывателей до выхода на режим основного источника питания. Однако успехи в развитии элементной базы привели к резкому снижению энергопотребления электронных блоков взрывателей. Это делает возможным использование конденсатора, заряжаемого при предстартовой подготовке или в процессе выстрела, в качестве единственного источника питания после выстрела, энергии которого достаточно в течение времени полета снаряда.

К достоинствам конденсаторов относятся простота конструкции, дешевизна исходных материалов, малые габариты, практически неограниченная сохранность, малое время заряда. По этим показателям конденсаторы превосходят все остальные источники питания, являясь исключительно пригодными для трубок и взрывателей. В современных многофункциональных взрывателях артиллерийских снарядов использование конденсаторного источника питания является предпочтительным. В отличие от турбогенераторов, магнетогидродинамических и электростатических генераторов он не влияет на баллистику снаряда. Отсутствие собственной энергии конденсатора до выстрела гарантирует безопасность взрывателя в служебном обращении.

Это положительное качество влечет за собой существенный недостаток – несамостоятельность ИП, т.е. необходимость устройств и цепей зарядки перед боевым использованием. Вторым, не менее важным недостатком является зависимость ёмкости и внутреннего сопротивления от температуры.

Несамостоятельность конденсатора вынуждает заряжать его от постороннего источника энергии. Этот источник может быть как внутренним, так и внешним. Примером внутреннего источника энергии является МЭГ, который срабатывает во время выстрела, пример внешнего – автоматический заряд конденсатора от сети самолёта в момент сбрасывания бомбы. Заряд конденсатора непосредственно перед применением боеприпасов позволяет не предъявлять особо высоких требований к нему с точки зрения самозаряда.

Для артиллерийских снарядов среднего и малого калибра с учётом их массовости использование внутренних источников (МЭГ, ПЭГ) для заряда конденсатора нежелательно, так как это усложняет конструкцию, увеличивает массогабариты и стоимость взрывателя. Более предпочтителен заряд от внешних источников, который может быть контактным и бесконтактным (индукционным). Контактный способ требует усложнения заряжающего устройства, ограничивает скорострельность и характеризуется низкой надёжностью. Альтернативой является бесконтактный индукционный способ ввода энергии в конденсатор.

Индукционный ввод энергии основан на использовании ЭДС электромагнитной индукции, возникающей в катушке при изменении в ней магнитного потока, т.е. ввод информации и энергии могут быть основаны на одинаковом принципе. Так же как ввод информации, ввод энергии может быть реализован до выстрела и в процессе выстрела. До выстрела при помощи специального установщика (см. рис. 1.1) сначала заряжается конденсатор, а затем, когда схемы электронного блока войдут в рабочий режим, с помощью этого же установщика передается информация.

Для ввода энергии в процессе выстрела можно использовать изменение магнитного потока при перемещении приёмной катушки, расположенной во взрывателе снаряда, относительно источника постоянного магнитного поля, расположенного на стволе. Таким образом, в отличие от индукционного ввода информации, приёмная катушка взаимодействует со статическим полем, которое создаётся при помощи постоянного магнита или катушки с постоянным током. Для получения максимальной скорости изменения магнитного поля, а следовательно, и максимальной ЭДС, источник постоянного магнитного поля целесообразно размещать вблизи дульного среза ствола, где скорость снаряда наибольшая (рис. 1.4).

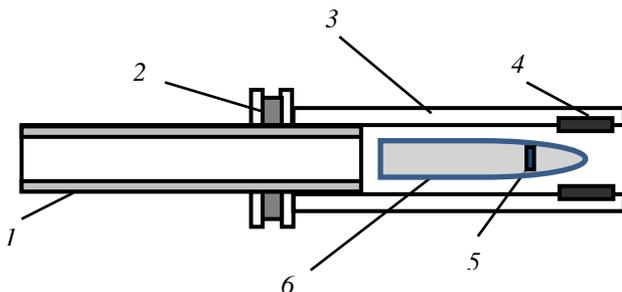


Рис. 1.4. Размещение элементов устройства ввода энергии и информации:  
 1 – ствол; 2 – катушка для ввода энергии; 3 – дульная насадка; 4 – катушка для ввода информации; 5 – приёмная катушка; 6 – снаряд

В отличие от ввода энергии индукционный ввод информации основан на воздействии переменного магнитного поля на приемную катушку 5. Переменное магнитное поле создается при помощи катушки для ввода информации 4. Учитывая, что информационный сигнал можно подавать только после ввода энергии, включения электронных схем взрывателя и окончания переходных процессов, катушка 4 должна располагаться на некотором расстоянии от катушки с постоянным током для ввода энергии 2, а именно в дульной насадке 3. Приемная катушка находится во взрывателе снаряда 6.

Дульная насадка может использоваться как экран для защиты устройства ввода информации от внешних помех.

## 1.2. Принципы функционирования индукционных устройств

Под индукционной линией связи (ИЛС) будем понимать систему магнитно-связанных контуров, один из которых (излучающий) размещен на пусковой установке или в аппаратуре заряжания, а второй (приёмный) – во взрывателе боеприпаса (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Структурная схема индукционной линии связи

Достоинства ИЛС состоят в том, что в процессе выстрела она:

- 1) позволяет учесть реальную скорость каждого снаряда;
- 2) не ограничивает скорострельность;
- 3) позволяет вводить самую последнюю информацию о цели на момент выстрела в быстроменяющейся обстановке боя;
- 4) обеспечивает безопасность при хранении и транспортировке боеприпасов, а также в боевых условиях благодаря отсутствию энергии во взрывателе до выстрела;
- 5) по сравнению с контактной связью обладает большей надёжностью, поскольку линия связи не подвержена окислению, загрязнению и т.д.;
- 6) не требует специального обслуживания, удобна в эксплуатации;

7) по сравнению с оптической связью обеспечивает передачу информационных сигналов через непрозрачные среды (пыль, дым и т.д.);

8) по сравнению с радиосвязью «вдогон» реализует избирательность ввода информации в каждый взрыватель при высокой плотности стрельбы;

9) обладает высокой помехозащищённостью;

10) позволяет использовать одни и те же элементы для ввода энергии и приема информации.

Излучающий контур или передающая катушка (ПК) является источником магнитного поля, параметры которого изменяются (модулируются) в процессе передачи информации.

Приёмный контур или приёмная катушка (ПрК) представляет собой магнитную антенну, в которой наводится ЭДС электромагнитной индукции при изменении окружающего её магнитного поля.

Поскольку магнитное поле создается током в ПК, необходимым элементом передающей части ИЛС является усилитель тока. С другой стороны, ЭДС электромагнитной индукции в ПрК, как правило, недостаточна для непосредственного использования в системе управления взрывателем, поэтому в приёмной части ИЛС используется усилитель напряжения.

Несмотря на кажущуюся простоту ИЛС, её создание связано с большими сложностями. Это объясняется тем, что магнитные свойства материала сердечников катушек, экрана, а также элементов конструкции заряжающего устройства зависят от интенсивности магнитного поля, т.е. с точки зрения математического описания являются нелинейными элементами. Изменение параметров магнитного поля при передаче информации приводит к появлению вихревых токов, поверхностному эффекту в элементах конструкции ствола и снаряда. Кроме того, математическая модель ИЛС должна отражать размеры, число витков, диаметр, активное и индуктивное сопротивления проводов катушек, межвитковую ёмкость, расположение и взаимную ориентацию катушек, геометрические размеры, электромагнитные свойства элементов конструкции и т.д. Учёт всех факторов практически невозможен или приводит к сложным математическим уравнениям, которые не имеют явного решения. Практические методы расчета связаны с допущениями и упрощениями.

### **1.3. Обзор методов расчета индукционных устройств**

В настоящее время расчет электромагнитных устройств, к которым относится ИЛС, осуществляется тремя путями: методами теории электромагнитного поля (полевыми методами), методами теории

электрорадиоцепей (методами цепей), комбинированными, когда совместно используются первые и вторые.

**Полевые методы.** Функционирование ИЛС основано на физических законах электромагнетизма, к числу которых относятся законы Ампера, Био–Савара–Лапласа, Гаусса, Кулона, Фарадея. Эти законы сведены Максвеллом в единую систему из четырех векторных уравнений:

$$\begin{aligned}
 1) \quad \oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} &= \int_S \left( \mathbf{J}_{\text{в}} + \frac{d\mathbf{D}}{dt} \right) d\mathbf{S}; \\
 2) \quad \oint_L \mathbf{E} d\mathbf{L} &= - \int_S \frac{d\mathbf{B}}{dt} d\mathbf{S}; \\
 3) \quad \oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} &= \int_V \rho_v dV; \\
 4) \quad \oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} &= 0.
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

где  $\mathbf{H}$  – вектор напряженности магнитного поля;  $\mathbf{E}$  – вектор напряженности электрического поля;  $\mathbf{B}$  – вектор магнитной индукция;  $\mathbf{D}$  – вектор электрической индукция;  $\mathbf{J}_{\text{пр}}$  – вектор плотности тока проводимости;  $\rho_v$  – объемная плотность зарядов.

Здесь и далее буквы в формулах, выделенные полужирным шрифтом, обозначают векторные величины.

Первое уравнение представляет собой обобщенный закон полного тока и формулируется следующим образом: *магнитодвижущая сила, т.е. циркуляция вектора  $\mathbf{H}$  по любому замкнутому контуру  $L$ , равна сумме истинного электрического тока проводимости  $\mathbf{J}_{\text{пр}}$  и тока смещения, протекающих сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.*

Ток проводимости и ток смещения создают вихревое магнитное поле. Ток смещения возникает при изменении электрического поля.

Величина  $\frac{d\mathbf{D}}{dt}$  называется плотностью тока электрического смещения. Она зависит в первую очередь от частоты. На малых частотах, характерных для индукционных устройств, этой величиной обычно пренебрегают.

Второе уравнение является обобщенным законом электромагнитной индукции: *электродвижущая сила, т.е. циркуляция вектора напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$  по любому замкнутому контуру  $L$ , равна скорости изменения магнитного потока, пронизываю-*

щего этот контур с обратным знаком. Из второго уравнения следует, что вихревое электрическое поле создается только переменным магнитным полем.

Третье уравнение представляет закон Гаусса в общем виде: *поток вектора электрической индукции через любую замкнутую поверхность  $S$  равен суммарному электрическому заряду в объеме  $V$ , ограниченном этой поверхностью.* Таким образом, электрические заряды являются источниками электрического поля.

Четвертое уравнение выражает *условие отсутствия в природе магнитных зарядов* и подтверждает вихревой характер магнитного поля.

Из уравнений Максвелла следует, что электрические и магнитные поля взаимосвязаны и неразрывны, т.е. в природе существует единое электромагнитное поле (ЭМП).

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J}_{\text{ю}} + \frac{d\mathbf{D}}{dt}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{d\mathbf{B}}{dt}, \\ \operatorname{div} \mathbf{D} &= \rho_V, \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Взаимосвязь параметров электрического, магнитного поля и свойств среды выражают материальные уравнения

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon_a \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}_y, \\ \mathbf{B} &= \mu_a \mathbf{H} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{J}_i, \\ \mathbf{J}_{\text{ю}} &= \mathbf{J}_{\text{н0}} + \mathbf{J}_{\text{эф0}} = \sigma \mathbf{E}_{\text{н0}} + \sigma \mathbf{E}_{\text{эф0}}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где  $\mathbf{P}_y$  – вектор электрической поляризованности вещества;  $\mathbf{J}_m$  – вектор намагниченности вещества;  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянная;  $\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость, в общем случае зависит от температуры, частоты и напряженности электрического поля;  $\mu_a = \mu_0 \mu$  – абсолютная магнитная проницаемость, в общем случае также зависит от температуры, частоты и напряженности магнитного поля;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость;  $\sigma$  – удельная проводимость вещества, зависит от температуры.

Ток проводимости, т.е. упорядоченное движение зарядов, создается за счет действия стороннего источника питания или ЭДС электро-

магнитной индукции при изменении магнитного поля, отсюда плотность тока проводимости  $J_{\text{пр}}$  (последняя формула в (1.3)) может быть выражена через проводимость вещества и напряженности стороннего электрического поля  $E_{\text{ст}}$  и напряжённость поля индукции  $E_{\text{инд}}$ .

Уравнения Максвелла (1.1) и (1.2) вместе с материальными уравнениями среды (1.3) с учетом начальных и граничных условий позволяют найти параметры электромагнитного поля в любой точке пространства в любой момент времени.

*Граничные условия.* Для тангенциальных  $H_{\tau}$  и нормальных  $B_n$  составляющих на границе раздела сред  $a$  и  $b$  уравнения граничных условий можно записать в виде

$$H_{\tau a} = H_{\tau b}; \quad B_{na} = B_{nb}. \quad (1.4)$$

Граничные условия в предельных случаях:

1) если за пределами области поля имеется среда с  $\mu = 0$ ,

$$H_n = B_n = 0. \quad (1.5)$$

Это означает, что силовые линии магнитного поля параллельны границе раздела двух сред;

2) если за пределами области поля имеется среда с  $\mu = \infty$ ,

$$H_{\tau} = B_{\tau} = 0. \quad (1.6)$$

Это означает, что силовые линии магнитного поля перпендикулярны границе раздела двух сред.

Следует отметить, что (1.1), (1.2) являются системой векторных нелинейных дифференциальных уравнений второй степени с переменными коэффициентами. Строгого решения такой системы для любой ситуации не существует. В отдельных случаях она может быть упрощена. Рассмотрим наиболее характерные из них.

*Стационарное электромагнитное поле*, т.е. не изменяющееся во времени, при отсутствии в анализируемом объёме проводников с постоянным током может быть описано при помощи *скалярного магнитного потенциала*  $\varphi_m$ , который вводится соотношением

$$\vec{I} = -\text{grad}(\varphi_1) = -\nabla\varphi_1, \quad (1.7)$$

где  $\nabla$  (набла) – векторный оператор дифференцирования по пространству. С учетом того, что электрическое и магнитное поля не меняются, т.е. производные по времени равны нулю, из (1.1) для  $\varphi_m$  можно получить уравнение Лапласа:

$$\nabla^2\varphi_1 = 0. \quad (1.8)$$

Стационарное магнитное поле при наличии проводников с постоянным током является вихревым. Для его описания используется *векторный магнитный потенциал*  $A_m$ , который связан с магнитной индукцией:

$$\text{rot}(\dot{A}_1) = \dot{A}. \quad (1.9)$$

Если значение  $\mu_a$  можно считать постоянным, то относительно векторного потенциала в стационарном поле получается уравнение Пуассона:

$$\nabla^2 \dot{A}_1 = -\mu J_{\text{н0}}. \quad (1.10)$$

Способы решения уравнений Лапласа и Пуассона известны.

*Квазистационарное электромагнитное поле* – это поле при гармоническом изменении параметров, когда можно пренебречь эффектом запаздывания электромагнитной волны в пределах магнитной системы и током смещения по сравнению с током проводимости. Такая ситуация возникает, когда длина волны, соответствующая частоте колебаний, намного больше размеров устройства.

Если  $H(t) = H_m \sin(\omega t)$ , то  $\frac{\partial^2 H(t)}{\partial t^2} = -\omega^2 H(t)$ .

Тогда для непроводящей среды можно получить уравнение Гельмгольца:

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0, \quad (1.11)$$

где  $k = \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a} = \frac{\omega}{v_0} = \frac{2\pi}{T \cdot v_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число.

При переходе к комплексным амплитудам гармонических величин для линейных характеристик материалов (магнитная проницаемость  $\mu = \text{const}$ , диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = \text{const}$ , удельная проводимость  $\sigma = \text{const}$ ) можно получить уравнение поля относительно векторного магнитного потенциала  $A_m$ :

$$\nabla^2 A_1 - j\omega\mu\sigma A_1 = -\mu J_{\text{н0}}. \quad (1.12)$$

Последнее выражение позволяет для гармонических процессов исключить переменную  $t$  и проводить расчеты для комплексных амплитуд, которые зависят только от координат. При этом плотность тока стороннего источника, параметры материалов и значения  $A_m$  на границах должны быть заданы.

Способы решения уравнений вида (1.12) также известны.

Сущность полевых методов расчёта устройств состоит в том, что решается система векторных уравнений электромагнитного поля с учётом геометрической формы и размеров элементов устройства, их электрических и магнитных свойств, заданных начальных и граничных условий.

Существующие полевые методы можно разделить на две группы: аналитические и численные.

*Аналитические методы* направлены на получение конечной формулы функции, которая является решением системы уравнений Максвелла для конкретной ситуации. Эта формула дает в явном виде зависимость параметров поля от любых переменных, позволяет проанализировать эту зависимость и найти числовые значения параметров устройства в широком диапазоне условий.

К аналитическим методам расчета полей относятся расчеты по закону полного тока и уравнению непрерывности, по закону Био–Савара–Лапласа, интегрирование уравнений Лапласа методом разделения переменных, методы наложения, зеркальных изображений, круговых гармоник, конформных преобразований.

К сожалению, приемлемые аналитические выражения в конечном виде удалось получить лишь для нескольких простых случаев, имеющих частный характер. Как правило, конечные выражения оказываются настолько сложными и громоздкими, что по формуле уяснить взаимосвязь параметров поля и параметров устройства, а также получить числовые значения удастся только после обработки на ЭВМ.

Возможности аналитических методов в настоящее время практически исчерпаны, в перспективе ожидать каких-либо прорывных результатов не приходится.

*Численные методы* основаны на решении исходных выражений системы уравнений Максвелла и законов электромагнетизма при помощи ЭВМ. При этом используются различные вычислительные методики решения дифференциальных уравнений и расчета интегралов.

К численным методам расчета можно отнести методы конечных разностей, конечных элементов, граничных интегральных уравнений, пространственных интегральных уравнений.

При высокой производительности современной вычислительной техники эти методы позволяют достаточно полно учесть влияние большинства факторов и с высокой точностью рассчитать поля в электромагнитных устройствах. В настоящее время разработаны специализированные пакеты прикладных программ для расчета электрических и магнитных полей. В большинстве из них используется наиболее отработанный метод конечных элементов. Широкое распро-

странение получили программы FEMM, FEMLAB, ANSYS, Ansoft, Cosmism, Vector Field. Имеются также отечественные разработки ELCUT, EASYMAG3D и др.

Задача расчета магнитного поля при заданном распределении токов заключается в определении магнитной индукции в различных точках пространства с учетом размеров и магнитных свойств элементов конструкции. Это позволяет рассчитать магнитный поток, пронизывающий заданную поверхность, в частности поверхность, ограниченную витками приёмной катушки. Расчёт магнитного потока в различные моменты времени, т.е. для разных пространственных положений ПрК с учётом движения снаряда в стволе, позволяет определить скорость изменения магнитного потока, коэффициент взаимной индукции и ЭДС индукции на выходе приёмной катушки.

**Методы цепей.** При использовании этих методов устройство представляется эквивалентной схемой, состоящей из идеализированных элементов, которым приписывают определенные электрические и магнитные свойства. Основное требование к эквивалентной схеме заключается в том, что процессы в ней должны быть идентичны процессам в реальном устройстве при заданных условиях. Таким образом, магнитная цепь – это некоторое упрощенное представление магнитной системы и магнитного поля устройства. Электромагнитные процессы в магнитной цепи рассматриваются с использованием таких понятий, как магнитодвижущая сила (МДС), магнитное напряжение (разность скалярных магнитных потенциалов), магнитный поток, магнитное сопротивление (магнитная проводимость). Эти понятия формально аналогичны ЭДС, электрическому напряжению, электрическому току, сопротивлению (проводимости) электрической цепи, что позволяет использовать для расчета магнитных цепей закон Ома, 1-й и 2-й законы Кирхгоффа, а также все методы расчета электрических цепей: метод контурных токов, метод узловых потенциалов, метод наложения, метод эквивалентного источника и т.д.

Методы цепей по сравнению с полевыми больше дают ошибку, так как используют ряд допущений и упрощений:

- 1) трехмерная картина магнитного поля заменяется участками магнитной цепи, в пределах которых магнитное поле однородно ( $H = \text{const}$ );
- 2) расчет проводится с использованием средних значений магнитной индукции в магнитопроводе;
- 3) петлю гистерезиса для ферромагнитных материалов заменяют основной кривой намагничивания;

4) для обеспечения линейных свойств магнитной цепи в расчётах используется линейный участок кривой намагничивания сердечников катушек.

Рассмотрим основные соотношения для магнитной цепи. Заметим, что для рассматриваемой задачи ввода энергии и информации поле можно считать квазистационарным. На низких частотах ток смещения  $\frac{dD}{dt}$  можно пренебречь. С учетом того, что магнитная цепь состоит из участков с однородным полем, закон полного тока из интегральной формы (1.13) преобразуется в сумму (1.14):

$$\oint_L (\dot{\mathbf{I}} \cdot d\mathbf{L}) = \int_S (\mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}), \quad (1.13)$$

$$\sum_i (\dot{I}_i \cdot dL_i) = \sum_k I_k, \quad (1.14)$$

где  $\mathbf{H}$  – вектор напряженности магнитного поля;  $d\mathbf{L}$  – вектор элемента контура с током;  $\mathbf{J}$  – вектор плотности тока в элементах поверхности, охваченных контуром;  $d\mathbf{S}$  – вектор элемента поверхности, охватываемой контуром;  $I_k$  – ток через элемент поверхности контура.

Если магнитное поле создается катушкой, имеющей  $w$  витков с током  $I$ , а контур обхода выбран вдоль силовой линии (в этом случае угол между векторами  $\mathbf{H}$  и  $d\mathbf{L}$  равен нулю и скалярное произведение векторов равно произведению их модулей), можно перейти к скалярной записи:

$$\sum_i \dot{I}_i \cdot L_i = wI, \quad (1.15)$$

где  $wI$  – магнитодвижущая сила (МДС);  $H_i \cdot L_i$  – падение магнитного напряжения на участке длиной  $L_i$ :

$$U_{\dot{I}_i} = H_i \cdot L_i. \quad (1.16)$$

Таким образом, формула (1.15) представляет собой запись 2-го закона Кирхгофа для магнитной цепи: в замкнутой магнитной цепи (в магнитном контуре) МДС равна сумме падений магнитного напряжения на элементах контура.

В свою очередь магнитное напряжение на  $i$ -м участке может быть выражено через магнитный поток  $\Phi_i$  и магнитное сопротивление

ние  $R_{mi}$ . Действительно, для однородного участка цепи магнитный поток

$$\hat{O}_i = \hat{A}_i \cdot S_i = \mu_{ai} H_i \cdot S_i,$$

где  $B_i$  – магнитная индукция на участке цепи;  $\mu_{ai}$  – абсолютная магнитная проницаемость материала участка.

После подстановки  $H_i$  из (1.16)

$$\hat{O}_i = \mu_{ai} \frac{U_{\dot{i}i}}{L_i} \cdot S_i = \frac{U_{\dot{i}i}}{\frac{1}{\mu_{ai}} \frac{L_i}{S_i}} = \frac{U_{\dot{i}i}}{R_{\dot{i}i}}. \quad (1.17)$$

Выражение (1.17) является аналогом закона Ома для участка магнитной цепи: магнитный поток прямо пропорционален магнитному напряжению и обратно пропорционален величине, которую можно рассматривать как магнитное сопротивление:

$$R_{\dot{i}i} = \frac{L_i}{\mu_{ai} \cdot S_i}. \quad (1.18)$$

Как видно,  $R_{mi}$  зависит от материала, геометрических размеров и формы элементов устройства. Если магнитные свойства материала и сечение в пределах участка меняются, магнитное сопротивление может быть определено через интеграл:

$$R_{\dot{i}i} = \int_{(L_i)} \frac{dL_i}{\mu_i(L) \cdot S_i(L)}. \quad (1.19)$$

Таким образом, магнитное напряжение участка магнитной цепи равно

$$U_{\dot{i}i} = \hat{O}_i \cdot R_{\dot{i}i}. \quad (1.20)$$

Задача расчёта магнитной цепи формулируется следующим образом. Известны размеры, конфигурация магнитной системы и свойства материала магнитопровода, а также МДС обмотки. Требуется найти магнитный поток в любой ветви магнитной цепи.

В качестве примера рассмотрим порядок составления магнитной цепи для индуктивной линии связи через ствол орудия. Цель расчётов – найти ЭДС на выходе приёмной катушки.

1. Построение картины магнитного поля. На рис. 1.6 показан момент движения снаряда в канале ствола, когда приёмная катушка взрывателя находится напротив источника магнитного поля.

Магнитные потоки изображены пунктирными линиями только в верхней части рисунка с учетом их симметричности относительно оси ствола:  $\Phi_{H1}, \Phi_{H2}, \dots, \Phi_{H7}$  – наружные относительно канала ствола потоки;  $\Phi_{P1}, \Phi_{P2}, \Phi_{P3}$  – рабочие потоки, пересекающие поверхность контура ПрК.

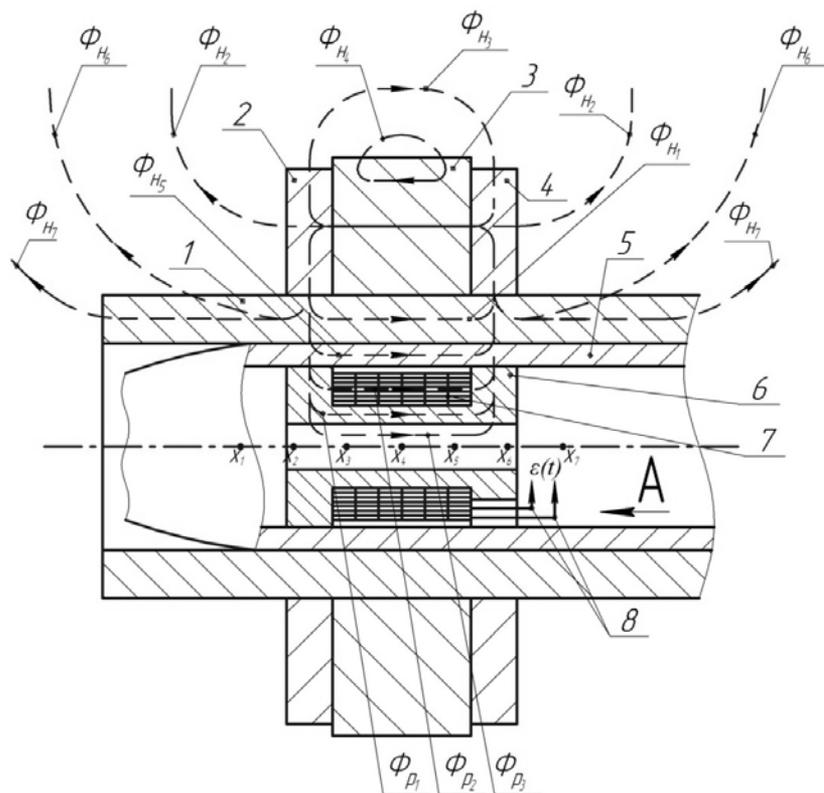


Рис. 1.6. Распределение магнитных потоков при расположении источника магнитного поля на стволе

Потоки  $\Phi_{H1} - \Phi_{H7}$  могут быть названы потоками рассеивания, поскольку их наличие приводит к уменьшению рабочих магнитных потоков через приёмную катушку. К потокам рассеивания относится также и поток  $\Phi_K$ , проходящий через корпус взрывателя. Необходимо иметь в виду, что стенка корпуса взрывателя (вокруг катушки) должна быть изготовлена из неферромагнитного металлического сплава.

Представленная на рис. 1.6 картина магнитного поля основана на физических представлениях о распределении магнитных потоков в среде с учётом её магнитной проницаемости и на результатах измерения магнитной индукции внутри стальной трубы и вне её при различных фиксированных положениях катушки.

Часть пространства с включением в него ферромагнитных и неферромагнитных материалов (в том числе воздуха), через которое проходит одинаковый магнитный поток, называется *магнитной трубкой*. Магнитные трубки образуют ветви магнитной цепи. Конфигурация, геометрические параметры таких трубок находят одним из следующих способов:

- задают её те, кто производит расчет магнитной системы по принимаемым ими допущениям;
- принимают и вычисляют по рекомендациям (положениям, формулам), содержащимся в литературных источниках;
- определяют путем построения силовых линий на основе теории поля с привлечением для этого программ ANSYS или FEMM.

Перечисленные способы можно комбинировать. Но в любом случае требуется последующее опытное подтверждение результатов расчета.

2. На основе картины магнитного поля составление схемы магнитной цепи (рис. 1.7), для которой справедливо равенство

$$wI = \hat{O} \cdot R_{i\check{y}\hat{e}\hat{a}} , \quad (1.21)$$

где  $wI$  – магнитодвижущая сила (1.15) источника магнитного поля;  $\Phi$  – суммарный разветвляющийся магнитный поток, создаваемый источником магнитного поля;  $R_{м\check{э}кв}$  – эквивалентное магнитное сопротивление магнитной цепи.

Магнитная цепь (см. рис. 1.7) содержит параллельные ветви. Для решения задачи необходимо выделить часть магнитной цепи, которая учитывает рабочие магнитные потоки через приёмную катушку  $\Phi_{p1} + \Phi_{p2} + \Phi_{p3} = \Phi_p$ , и наружные магнитные потоки рассеивания  $\Phi_{n1} + \Phi_{n2} + \dots + \Phi_{n7} + \Phi_k = \Phi_n$ , так что  $\Phi = \Phi_p + \Phi_n$ ;  $R_{ni}$ ,  $R_k$ ,  $R_{pi}$  – магнитные сопротивления на путях прохождения составляющих потоков, или магнитные сопротивления соответствующих ветвей магнитной цепи.

Как и в электрических цепях, эквивалентное сопротивление параллельных ветвей находят по формуле

$$\frac{1}{R_{i\check{y}\hat{e}\hat{a}}} = \sum_i \frac{1}{R_{i i}}$$

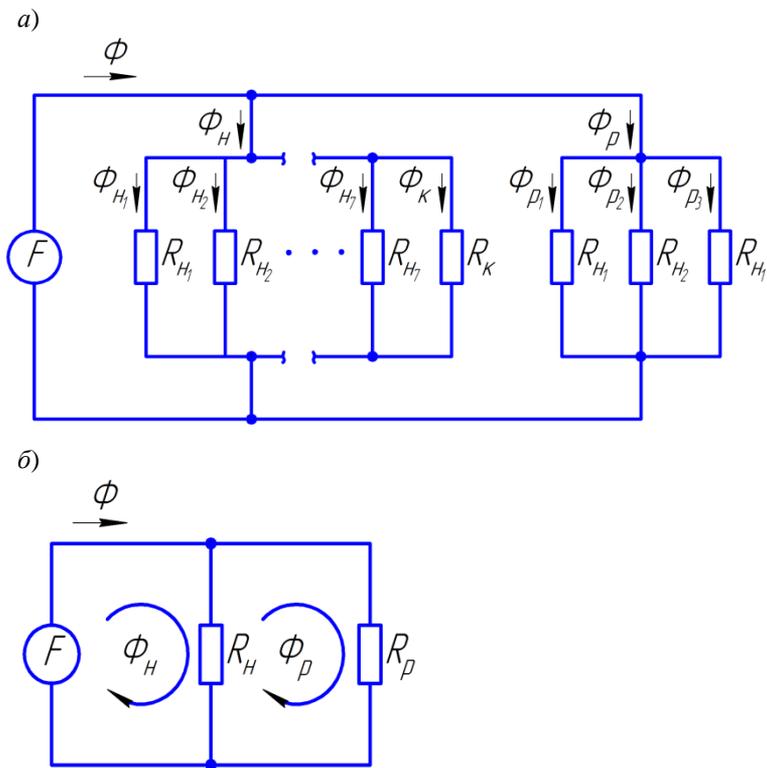


Рис. 1.7. Схема магнитной цепи: *a* – с учетом разветвления потока  $\Phi$ ; *б* – после эквивалентного преобразования ( $\Phi_H$  – наружный поток,  $\Phi_P$  – рабочий поток)

Магнитные сопротивления ветвей  $R_{mi}$  могут включать в себя последовательно соединенные магнитные сопротивления отдельных участков, которые находятся по формуле (1.18) или (1.19). В таком случае магнитное сопротивление всей ветви  $R_{mi}$  равно сумме магнитных сопротивлений этих участков.

Необходимо отметить, что магнитная проницаемость участков магнитной цепи из ферромагнитных материалов в сильных полях зависит от величины магнитной индукции. Это приводит к нелинейности уравнений.

На рис. 1.7,*a* представлена исходная схема магнитной цепи устройства индукционного ввода, соответствующая рис. 1.6, а на рис. 1.7,*б* – схема той же цепи после эквивалентных преобразований, что позволяет существенно упростить расчеты.

Искомым результатом является рабочий магнитный поток  $\Phi_p$ , проходящий через приёмную катушку. Рассчитывая  $\Phi_p$  для различных положений ПрК в процессе движения, т.е. для разных моментов времени, можно найти скорость изменения магнитного потока, а это позволяет определить ЭДС электромагнитной индукции, наводимую в приёмной катушке взрывателя при движении снаряда.

Деление методов расчета на «полевые» и «цепные» является условным, так как при расчете магнитной системы методами цепей все равно предварительно нужно решить полевую задачу определения магнитных сопротивлений (проводимостей) магнитных трубок, т.е. пространства, окружающего источник магнитного поля. От этого зависит точность определения магнитных потоков и решения всей задачи расчета магнитной цепи.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ИНДУКЦИОННОЙ ЛИНИИ ВВОДА ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ**

### **2.1. Расчет магнитного поля передающей катушки**

Расчет магнитного поля передающей катушки является одним из важных и необходимых этапов расчета индукционной линии связи (ИЛС).

Для создания ИЛС необходимо знать распределение интенсивности магнитного поля вокруг ПК. Это позволит смоделировать процесс взаимодействия с приёмной катушкой, оценить величину коэффициента взаимоиндукции и ЭДС.

Рассмотрим особенности расчета магнитной индукции в произвольной точке пространства с учетом влияния геометрических размеров ПК и магнитных свойств материалов вокруг ПК (ствола, снаряда, концентраторов магнитного поля и т.д.).

Расчеты проводятся на основании закона Био–Савара–Лапласа, который отражает принцип суперпозиции и гласит: магнитная индукция, создаваемая проводником с током произвольной формы в любой точке пространства (например, в точке  $M$ ), равна непрерывной векторной сумме магнитных индукций, создаваемых отдельными элементарными участками проводника:

$$\mathbf{B}_M = \int_L d\mathbf{B}_1 .$$

В свободном пространстве элемент индукции магнитного поля  $d\mathbf{B}_M$  в точке  $M$  (рис. 2.1) в векторной форме определяется выражением

$$d\mathbf{B}_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{R_i^3} [d\mathbf{L} \times \mathbf{R}_i], \quad (2.1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $I$  – ток, полагается одинаковым во всех элементах проводника;  $\mathbf{R}_M$  – вектор от элемента с током в точку наблюдения,  $R_M$  – его модуль;  $d\mathbf{L}$  – вектор, модуль которого равен длине элементарного участка проводника, а направление совпадает с направлением тока (рис. 2.1).

При расчетах на ЭВМ интеграл заменяется суммой по элементам проводника с током:

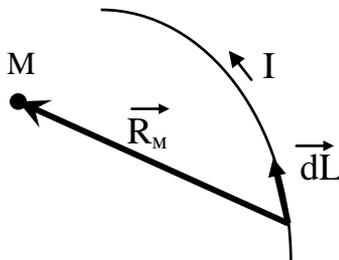


Рис. 2.1. Пространственное расположение векторов

$$\mathbf{B}_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \sum_i \frac{[d\mathbf{L}_i \times \mathbf{R}_{i_i}]}{R_{i_i}^3}. \quad (2.2)$$

Методика расчета:

1) задать длину, пространственное положение и ориентацию всех векторных элементов проводника  $d\mathbf{L}_i$ ;

2) определить векторы  $\mathbf{R}_{Mi}$  от всех элементов проводника в заданную точку пространства (точку наблюдения  $M$ ), т.е. их модуль и ориентацию;

3) рассчитать векторные произведения  $[d\mathbf{L}_i \times \mathbf{R}_{Mi}]$  для всех элементов проводника с током;

4) найти индукцию магнитного поля  $\mathbf{B}_M$  в заданной точке пространства по формуле (2.2).

Рассмотрим сначала поле одного витка в свободном пространстве, затем поле двух витков в свободном пространстве и, наконец, поле витков, надетых на трубу из ферромагнитного материала с учетом его магнитных свойств.

Пусть виток (контур) радиусом  $R_v$  с током  $I$  (рис. 2.2) лежит в плоскости  $XOY$ , центр витка совпадает с началом координат, ось витка совпадает с осью  $Z$ . Применительно к поставленной задаче ось  $Z$  совпадает с осью ствола и направлена в сторону движения снаряда. При составлении алгоритма расчета необходимо руководствоваться методикой, описанной выше.

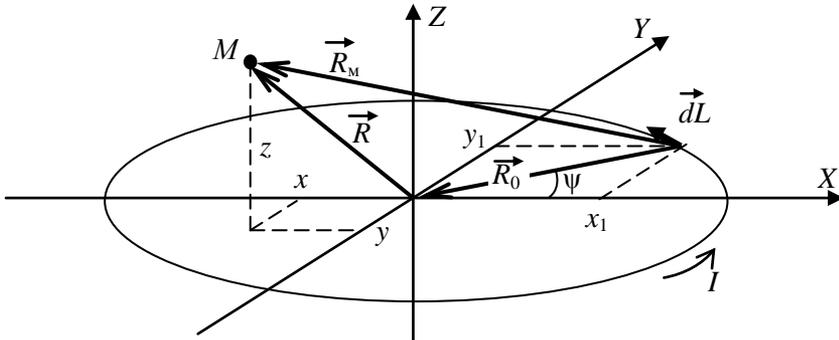


Рис. 2.2. Расположение витка относительно координатных осей

1. *Определение элементов витка  $dL_i$ .* При решении данной задачи целесообразно использовать осевую симметрию витка. Длина элемента витка однозначно связана с углом его видимости из центра, а угол видимости  $d\psi$  можно определить, задав количество элементов  $N$ :  $d\psi = 2\pi / N$ . Длина элемента в этом случае равна  $dL = R_v \cdot \sin(d\psi)$ .

Следует отметить, что с увеличением  $N$  суммарная длина всех элементов проводника стремится к длине окружности. В качестве критерия выбора количества элементов можно использовать допустимую разность  $\Delta L$ :  $2\pi \cdot R_v - N \cdot dL_i \leq \Delta L$ .

Угол относительно оси  $X$ , под которым виден элемент с номером  $i$  (номер может изменяться от нуля до  $N-1$ ), равен  $\psi_i = d\psi \cdot i$ .

Декартовы координаты элементов с током можно найти по формулам

$$x_1(\psi_i) = R_v \cdot \cos(\psi_i), \quad y_1(\psi_i) = R_v \cdot \sin(\psi_i). \quad (2.3)$$

Ориентация элемента с током в пространстве имеет большое значение, так как от нее зависит результат векторного произведения (см. формулу (2.2)). Известно, что ориентация вектора определяется его проекциями на оси координат. Проекция вектора может быть отрицательной, если начало вектора имеет большее значение координаты, чем его конец. Например, для вектора  $dL$ , показанного на рис. 2.3, проекция  $L_x < 0$ , а проекция  $L_y > 0$ . Проекции на ось  $Z$  всех элементов витка в рассматриваемой задаче равны нулю.

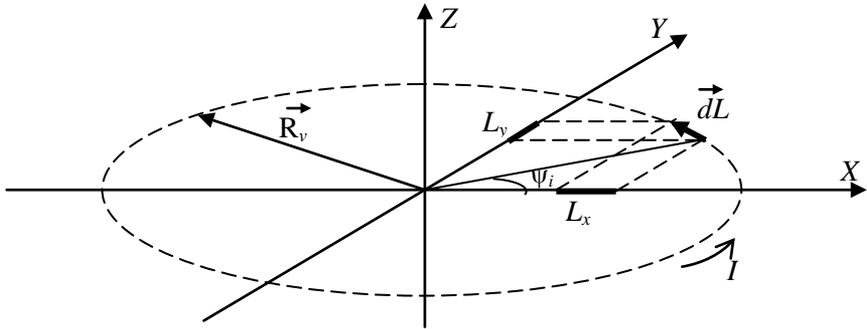


Рис. 2.3. Определение проекций  $dL$  на координатные оси

Учитывая, что элемент  $dL$  перпендикулярен радиусу, его угол относительно оси  $X$  равен  $\pi/2 + \psi_i$ . Отсюда проекции элементов витка на координатные оси определяются выражениями

$$L_x(\psi_i) = -dL \cdot \sin(\psi_i), \quad L_y(\psi_i) = dL \cdot \cos(\psi_i), \quad L_z(\psi_i) = 0. \quad (2.4)$$

2. *Определение векторов  $R_{Mi}$ .* Вектор  $R_M$  (рис. 2.2) можно представить как сумму вектора  $R_0$  (от элемента витка в начало координат) и радиус-вектора точки  $M$  (на рис. 2.2 обозначен  $R$ )

$$R_M = R_0 + R.$$

Модуль вектора  $R_0$  равен радиусу витка  $R_v$ , а его проекции равны

$$R_{0x}(\psi_i) = -x_1 = -R_v \cdot \cos(\psi_i), \quad R_{0y}(\psi_i) = -y_1 = -R_v \cdot \sin(\psi_i), \quad R_{0z} = 0.$$

Радиус вектор точки  $M$  задается её координатами  $R(x, y, z)$ , т.е. его проекции известны. При сложении векторов складываются их проекции. Из рис. 2.2 следует, что проекции вектора  $R_M$  равны

$$R_{Mx}(x, \psi_i) = x - x_1(\psi_i), \quad R_{My}(y, \psi_i) = y - y_1(\psi_i), \quad R_{Mz} = z. \quad (2.5)$$

Проекция  $R_{Mz}$  на ось  $Z$  фактически задается координатой точки наблюдения и одинакова при расчёте поля в этой точке от всех элементов витка.

Модуль вектора  $R_M$ , т.е. расстояние от элемента с током до точки наблюдения, определяется через его проекции:

$$R_1(x, y, z, \psi) = \sqrt{R_{ix}^2(x, \psi) + R_{iy}^2(y, \psi) + R_{iz}^2}. \quad (2.6)$$

3. *Расчет векторных произведений*  $[dL_i \times R_{mi}]$ . Известно, что результат векторного произведения является вектором, который может быть представлен векторной суммой проекций на оси координат.

Пусть даны два вектора  $A = A_x \cdot i + A_y \cdot j + A_z \cdot k$ ,

$$B = B_x \cdot i + B_y \cdot j + B_z \cdot k,$$

где  $i, j, k$  – орты осей координат,  $A_x, A_y, A_z$  и  $B_x, B_y, B_z$  – проекции векторов  $A$  и  $B$  на оси координат. Векторное произведение  $A$  на  $B$  равно  $C = [A \times B] = C_x \cdot i + C_y \cdot j + C_z \cdot k$ .

Проекции вектора  $C$  можно найти через проекции векторов множителей:

$$C_x = A_y \cdot B_z - A_z \cdot B_y \quad C_y = A_z \cdot B_x - A_x \cdot B_z \quad C_z = A_x \cdot B_y - A_y \cdot B_x. \quad (2.7)$$

Эти проекции могут быть как положительными, так и отрицательными и определяют ориентацию вектора  $C$ , а его модуль

$$|\vec{C}| = \sqrt{C_x^2 + C_y^2 + C_z^2}.$$

В данной задаче находим векторное произведение  $V_M = [dL \times R_M]$ . Проекции вектора  $V_M$  в соответствии с (2.7) равны

$$\begin{aligned} V_{Mx} &= dL_y \cdot R_{Mz} - dL_z \cdot R_{My}, \\ V_{My} &= dL_z \cdot R_{Mx} - dL_x \cdot R_{Mz}, \\ V_{Mz} &= dL_x \cdot R_{My} - dL_y \cdot R_{Mx}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

4. *Определение магнитной индукции в заданной точке* пространства. Проекции результирующего вектора магнитной индукции, создаваемого одним витком в точке с координатами  $(x, y, z)$ , в соответствии с (2.2) равны сумме проекций векторов магнитной индукции, создаваемых всеми элементами витка:

$$\begin{aligned} B_{1x}(x, y, z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I_v \cdot \sum_i \frac{V_{ix}(y, z, \Psi_i)}{R_1(x, y, z, \Psi_i)^3}, \\ B_{1y}(x, y, z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I_v \cdot \sum_i \frac{V_{iy}(x, z, \Psi_i)}{R_1(x, y, z, \Psi_i)^3}, \\ B_{1z}(x, y, z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I_v \cdot \sum_i \frac{V_{iz}(x, y, \Psi_i)}{R_1(x, y, z, \Psi_i)^3}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Модуль вектора  $\mathbf{B}_1$  определяется через его проекции:

$$\hat{A}_1(x, y, z) = \sqrt{\hat{A}_{1x}^2(x, y, z) + \hat{A}_{1y}^2(x, y, z) + \hat{A}_{1z}^2(x, y, z)}. \quad (2.10)$$

Возможность расчета модуля и проекций вектора магнитного поля в любой точке пространства позволяет анализировать распределение интенсивности магнитного поля, определить магнитный поток через заданную поверхность.

В соответствии с рассмотренной методикой по формулам (2.8) – (2.10) проведены расчёты магнитного поля витка с током в окружающем его пространстве. Координаты точек нормированы к величине радиуса витка  $R_v$ .

*Анализ результатов расчёта поля витка с током.* Сначала рассмотрим распределение поля в плоскости витка вдоль одной из координатных осей, например вдоль оси  $X$ . Пусть  $x_i$  – координата точки наблюдения. Для получения зависимости магнитной индукции от  $x_i$  координаты точки должны изменяться с заданной дискретностью  $\Delta x$ . Представляет интерес распределение поля как внутри, так и снаружи витка. Поэтому диапазон изменения координаты  $x_i$  выберем в пределах  $\pm 2R_v$ . Тогда количество точек наблюдения равно  $N_i = 4R_v / \Delta x$ .

При задании координат нужно исключить совмещение точек наблюдения с витком, так как в этом случае  $R_m = 0$ , а из (2.2) следует, что это приведет к переполнению разрядной сетки ЭВМ. С учетом этого зададим координаты точек наблюдения  $x_{ij} = -(2R_v + 0,5\Delta x) + \Delta x_j$ , где индекс  $j$  изменяется от 0 до  $N_i$ .

График зависимости продольной (вдоль оси ствола) составляющей индукции магнитного поля от координаты  $X$  при  $Y = 0$  и  $Z = 0$ , рассчитанный по формулам (2.2)–(2.10), т.е. график  $B_z(x_i, 0, 0)$ , приведен на рис. 2.4.

Ниже графика изображен виток с указанием направления тока (сравнить с рис. 2.2, 2.3), а также силовые линии и направление вектора  $\mathbf{B}$ . Эти изображения иллюстрируют вид кривых графика.

Внутри витка магнитная индукция положительна (вектор  $\mathbf{B}$  направлен вверх и совпадает с направлением оси  $Z$ , см. рис. 2.3), снаружи витка отрицательна ( $\mathbf{B}$  направлен вниз). Вблизи витка магнитная индукция резко возрастает, что соответствует закону Био–Савара–Лапласа.

Проверим правильность числовых значений полученных результатов. Известно, что в центре витка индукцию можно определить по формуле  $B = (\mu_0 I_v) / 2R_v$ . При токе в витке  $I_v = 1$  и радиусе витка  $R_v = 1$  магнитная индукция должна быть равна  $B = 2\pi \cdot 10^{-7}$  Тл.

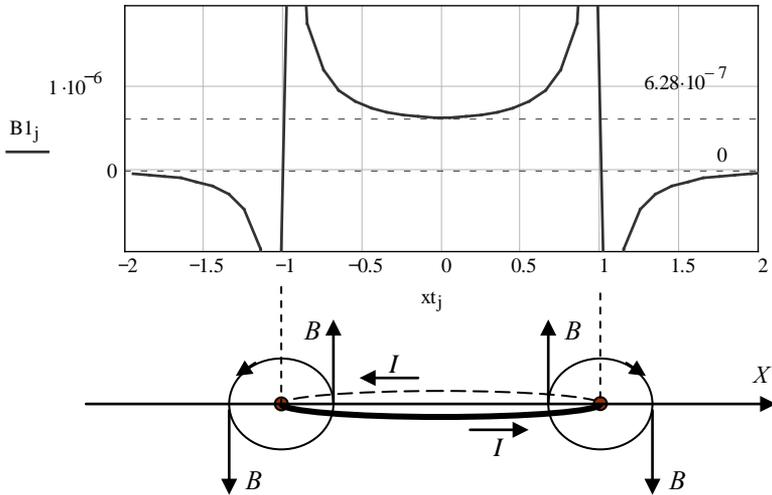


Рис. 2.4. Изменение индукции магнитного поля в плоскости витка

Рассчитанное по (2.9) значение индукции в начале координат т.е. для  $x_i = 0$ , можно видеть на графике. Это значение указано маркером – горизонтальной пунктирной линией и равно  $6,28 \cdot 10^{-7}$ , что соответствует теории и подтверждает правильность программы расчета.

С учётом центральной симметрии витка можно утверждать, что изменение индукции магнитного поля в плоскости витка будет одинаковым вдоль любой прямой, проходящей через его ось. Пространственная картина изменения магнитной индукции в плоскости витка показана на рис. 2.5.

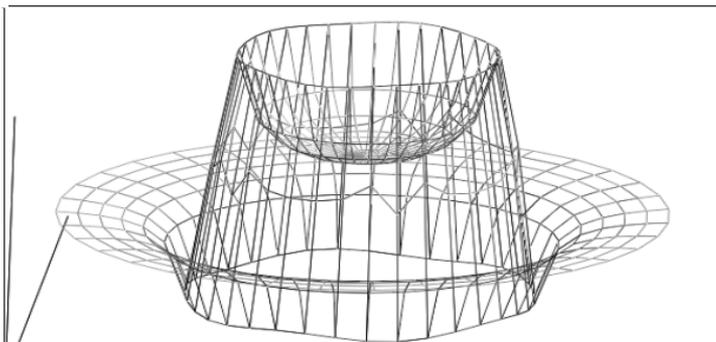


Рис. 2.5. Изменение магнитной индукции в плоскости витка

Магнитный поток через приёмную катушку боеприпаса создаётся как раз продольной составляющей  $\mathbf{B}$  вдоль ствола, т.е. вдоль оси  $Z$ . Эта составляющая направлена нормально к плоскости катушки (рис. 2.6). Представляет интерес изменение интенсивности продольной составляющей  $B_z$  магнитного поля, создаваемого витком на разных расстояниях от плоскости витка.

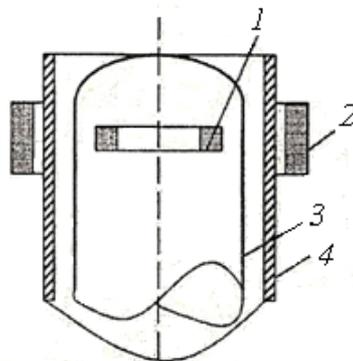


Рис. 2.6. Расположение источника магнитного поля и приемной катушки: 1 – приёмная катушка; 2 – передающая катушка; 3 – боеприпас; 4 – кран

На рис. 2.7 показан рассчитанный по рассмотренной выше методике график изменения  $B_{1z}$  вдоль прямой, перпендикулярной оси  $Z$  и проходящей через ось на разном расстоянии от плоскости витка, т.е. зависимость  $B_{1z}$  от  $x$  при  $y = 0$  и  $z = \text{const}$ . В расчётах использованы значения  $z$ , равные  $0, 0,2R_v, 0,5R_v$ .

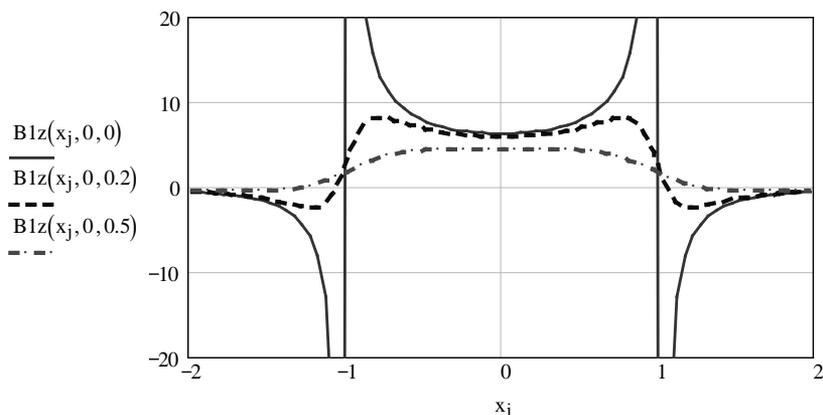


Рис. 2.7. Зависимость индукции магнитного поля от координаты  $x$

Для удобства по вертикальной оси отложено значение магнитной индукции при опущенном множителе  $10^{-7}$ . Учитывая, что  $R_v = 1$ , по пространственным осям  $X, Y, Z$  фактически указаны значения в радиусах витка. На данном этапе расчетов принято допущение о том, что материал ствола не влияет на магнитное поле. График  $B_{1z}(x,0,0)$  рассмотрен ранее (см. рис. 2.4).

При  $z = 0,2$ , т.е. на расстоянии 0,2 радиуса над плоскостью витка, магнитная индукция  $B_{1z}(x, 0, 0.2)$  в центральной части ствола ( $-0,5 < x < 0,5$ ) почти не меняется, в то время как вблизи стенок ствола ( $x = \pm 0,8$ ) значительно уменьшается. На расстоянии 0,5 радиуса над плоскостью витка магнитное поле в центре ствола примерно в два раза меньше, чем в плоскости витка, и при смещении от оси достаточно быстро уменьшается.

На рис. 2.8 приведен график изменения  $B_{1z}$  вдоль прямой, параллельной оси  $Z$  и проходящей на разном расстоянии от неё, т.е. зависимость  $B_{1z}(x,y,z)$  от  $z$  при  $y = 0$  и фиксированном значении  $x$ . По этим графикам можно анализировать изменение продольной составляющей магнитной индукции в приёмной катушке при движении снаряда (см. рис. 2.6) в канале ствола.

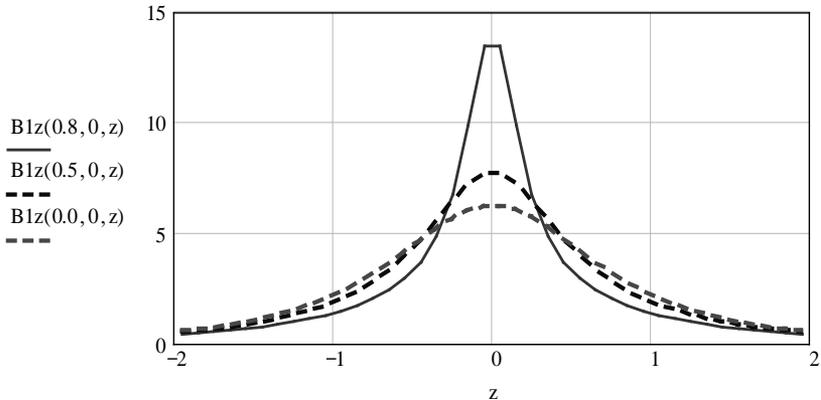
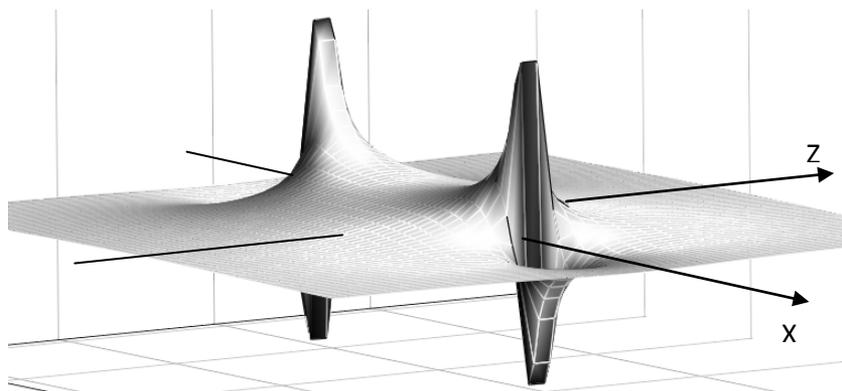


Рис. 2.8. Зависимость индукции магнитного поля от координаты  $z$

График  $B_{1z}(0,0,z)$  показывает изменение магнитной индукции на оси, график  $B_{1z}(0,5,0,z)$  – на расстоянии 0,5 радиуса от оси, а график  $B_{1z}(0,8,0,z)$  – на расстоянии 0,8 радиуса от оси, т.е. вблизи стенки ствола. Графики, как и на рис. 2.7, показывают, что индукция магнитного поля максимальна у стенок ствола. Из этих графиков также сле-

дует, что при движении снаряда скорость изменения магнитной индукции у стенок больше, чем в центре ствола.

На рис. 2.9 приведена пространственная картина распределения  $B_{1z}$  в плоскости  $XOZ$ .



BM1z

Рис. 2.9. Пространственная картина распределения продольной составляющей  $B_{1z}$

Рассмотрим, как изменяется поперечная составляющая магнитной индукции (перпендикулярная оси витка и оси ствола), например вдоль оси  $X$ , на разных расстояниях от плоскости витка.

На рис. 2.10 показан график изменения  $B_{1x}$  вдоль прямой, перпендикулярной оси  $Z$  и проходящей через неё на расстояниях  $z = 0; 0,2R_v; 0,5R_v$  от плоскости витка. Видно, что при  $x = 0$ , т.е. на оси, поперечная составляющая магнитной индукции равна нулю независимо от координаты  $z$ . Действительно, вектор магнитной индукции совпадает с осью витка, поэтому перпендикулярная составляющая отсутствует. Кроме того, известно, что во всех точках плоскости витка поперечная составляющая также равна нулю. Это подтверждает график  $B_{1x}(x,0,0)$ .

Однако на некотором удалении от плоскости витка и от его оси поперечная составляющая вектора магнитной индукции появляется, причем её экстремумы наблюдаются непосредственно над витком (при  $x = \pm 1$ ).

Ниже графика изображен виток с указанием направления тока, а также силовые линии и направление вектора магнитной индукции. Это позволяет лучше понять вид графиков, которые построены для  $z > 0$ , когда точка наблюдения перемещается параллельно оси  $X$  над

витком. В этом случае справа от центра витка (справа от оси  $Z$ ) проекция вектора  $\mathbf{B}$  на ось  $X$  положительна, а слева – отрицательна. Максимум поперечной составляющей соответствует радиусу витка, т.е. значению  $x = \pm 1$ .

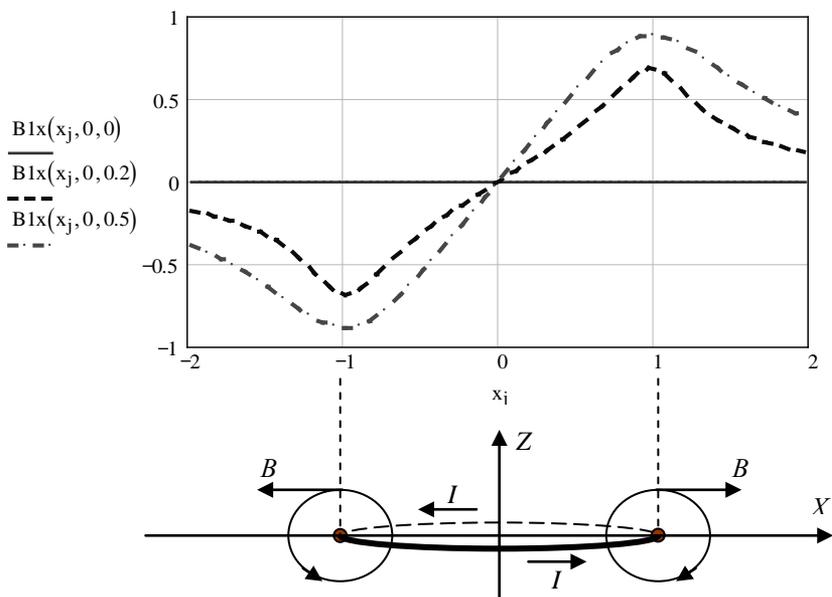


Рис. 2.10. График изменения поперечной составляющей  $B_{1x}$  вдоль прямой, параллельной оси  $X$  и проходящей через ось витка на разном расстоянии от его плоскости

Следует отметить, что величина максимума поперечной составляющей  $B_{1x}$  примерно в 10 раз меньше, чем продольной составляющей  $B_{1z}$  (см. рис. 2.8).

На рис. 2.11 приведены графики изменения поперечной составляющей  $B_{1x}$  при перемещении точки наблюдения вдоль прямой, параллельной оси  $Z$  на некотором расстоянии  $x$  от неё. Эти графики также показывают, что на оси витка (когда  $x = 0$ ) поперечная составляющая равна нулю. Когда  $x \neq 0$ , при переходе через плоскость витка поперечная составляющая меняет знак.

Следует обратить внимание на тот факт, что максимальное значение  $B_{1x}$  принимает на расстоянии примерно половины радиуса витка вдоль оси  $Z$ . Чем ближе к оси витка, тем меньше максимум  $B_{1x}$ .

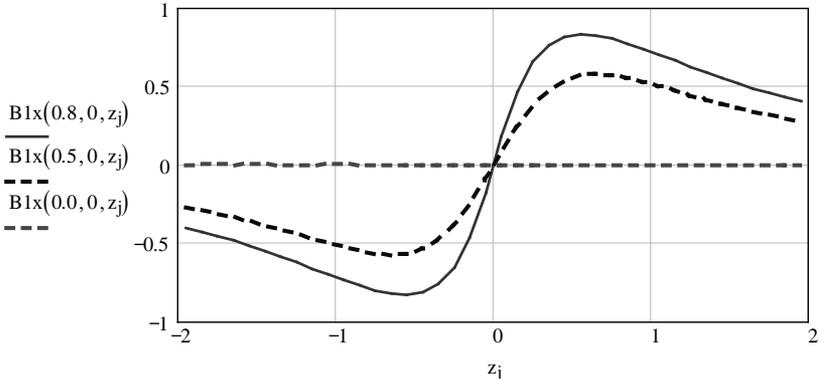


Рис. 2.11. График изменения  $B_{1x}$  вдоль прямой, параллельной оси витка на разном расстоянии от неё

Рассмотрим поле двух витков, оси которых совпадают, а центр второго витка расположен на некотором расстоянии  $z_2$  от начала координат, т.е. от центра первого витка.

Методика расчета прежняя. В каждой точке пространства по формулам (2.3) – (2.10) находим вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}_1$ , создаваемой первым витком, затем – магнитную индукцию  $\mathbf{B}_2$ , создаваемую вторым витком. Результирующую магнитную индукцию  $\mathbf{B}$  в точке  $M(x, y, z)$  находим как сумму векторов  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{B}_2$ . Для этого нужно сложить их проекции на оси координат:

$$\begin{aligned} B_x(x, y, z) &= B_{1x}(x, y, z) + B_{2x}(x, y, z), \\ B_y(x, y, z) &= B_{1y}(x, y, z) + B_{2y}(x, y, z), \\ B_z(x, y, z) &= B_{1z}(x, y, z) + B_{2z}(x, y, z). \end{aligned}$$

Модуль вектора  $\mathbf{B}$  определим через его проекции:

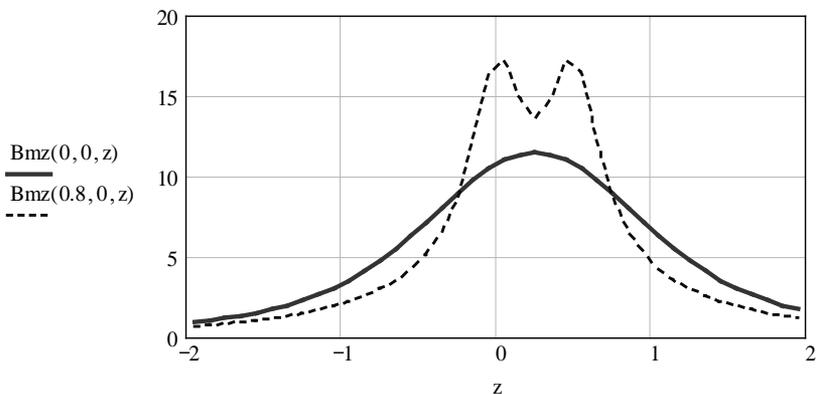
$$\hat{A}(x, y, z) = \sqrt{\hat{A}_x^2(x, y, z) + \hat{A}_y^2(x, y, z) + \hat{A}_z^2(x, y, z)}.$$

Рассмотрим полученные результаты. На рис. 2.12 показано изменение суммарной продольной составляющей в центре  $B_{mz}(0, 0, z)$  и у стенок ствола  $B_{mz}(0.8, 0, z)$ . Расстояние  $z_2$  между витками равно  $0,5R_v$  (а) и  $1,5R_v$  (б). Рисунок позволяет понять, с одной стороны, какое максимальное расстояние может быть между витками, при котором они создают единое поле, а с другой стороны – на каком минимальном расстоянии должны располагаться магниты (катушки) на

стволе, чтобы их поля воспринимались отдельно. Раздельный прием необходим при передаче информации на приёмные катушки боеприпаса.

Из рис. 2.12 следует, что для надежного разделения сигналов приёмными катушками в центре ствола передающие катушки на стволе должны располагаться на расстоянии не менее 4-5 радиусов ствола. Однако, если приёмные катушки располагать ближе к стенкам ствола, интенсивность поля будет больше, а расстояние между передающими катушками на стволе можно уменьшить.

a)



b)

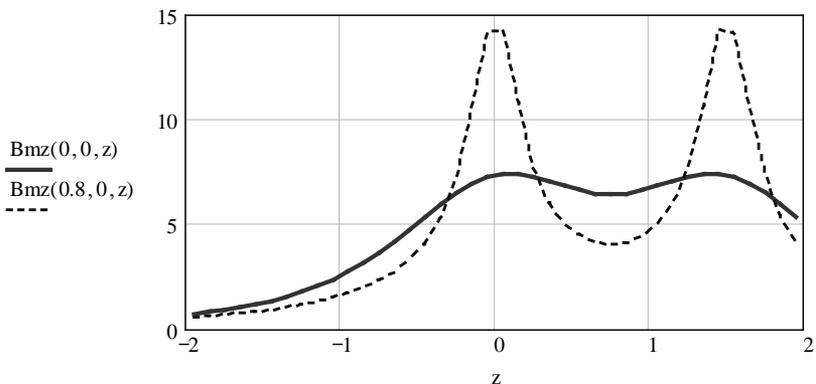


Рис. 2.12. Изменение продольной составляющей поля двух катушек

На рис. 2.13 представлена трёхмерная картина распределения продольной составляющей магнитного поля в плоскости  $XOZ$ , когда расстояние между витками равно  $0,5R_v$  (а) и  $1,5R_v$  (б).

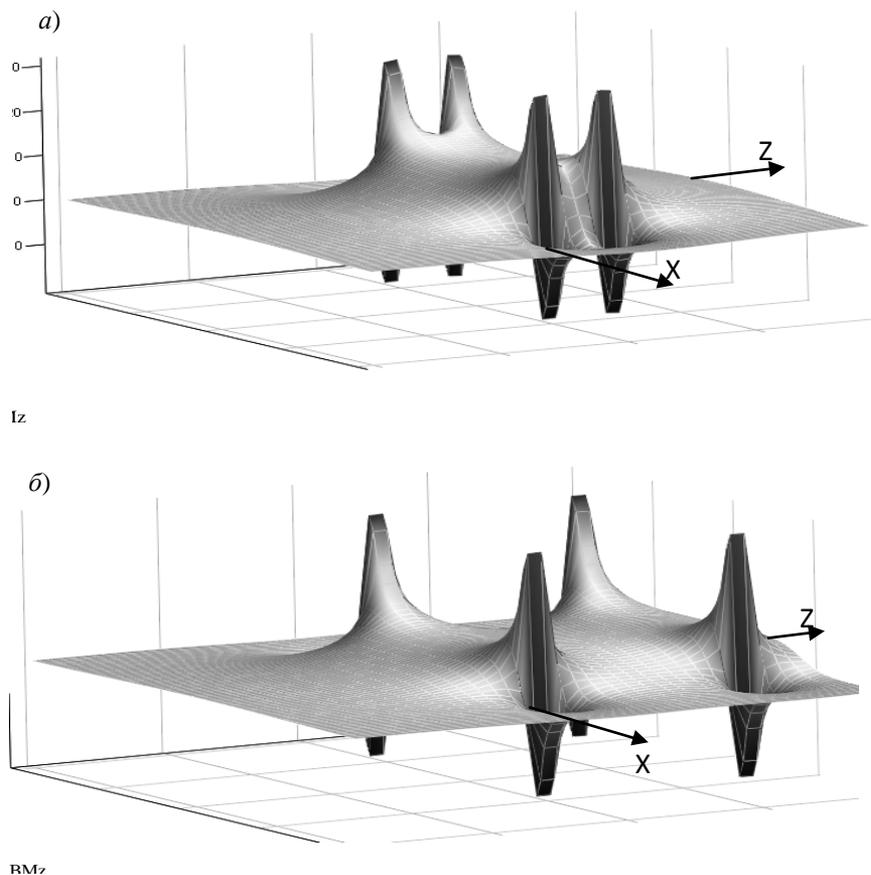


Рис. 2.13. Распределение продольной составляющей магнитного поля в плоскости  $XOZ$ : а – расстояние между витками  $0,5 R_v$ ; б – расстояние между витками  $1,5 R_v$

Рассмотрим поле витков, надетых на ствол из ферромагнитного материала. Учет магнитных свойств материала в первом приближении заключается в том, что в формулы расчета вводится относительная магнитная проницаемость для точек пространства, где находится материал. Во вторых, внутри трубы необходимо учитывать эффект

экранирования, который заключается в том, что намагниченный материал создает свое собственное магнитное поле, которое внутри материала усиливает поле источника, а вне материала ослабляет его.

Относительная магнитная проницаемость  $\mu$  ненасыщенного ферромагнетика составляет сотни и тысячи. Однако при насыщении его магнитная проницаемость уменьшается в десятки раз.

Эффективность экранирования оценивается коэффициентом  $\gamma = B_0/B$ , где  $B_0$  – магнитная индукция в заданной точке без экрана;  $B$  – при наличии экрана.

Коэффициент экранирования показывает, во сколько раз экран ослабляет поле. В большинстве источников приводятся эмпирические формулы, которые справедливы в конкретных условиях. Так, например, для полого шара  $\gamma = 1 + 0,66\mu(d/R)$ , где  $d$  – толщина стенки шара,  $R$  – радиус шара.

На рис. 2.14 приведены графики изменения продольной составляющей магнитной индукции поля витка, внутри которого находится труба из ферромагнитного материала. Рассчитывалось изменение магнитной индукции вдоль координаты  $X$  в плоскости витка –  $B_{mz}(x,0,0)$  и в плоскости над витком на расстоянии  $0,3 R_v$  –  $B_{mz}(x,0,0.3)$ . В расчетах принято, что внутренний диаметр трубы равен  $0,6R_v$ , наружный  $0,8R_v$ . Между витком и трубой расположена прокладка из немагнитного материала. Графики рассчитаны с учетом магнитных свойств трубы  $\mu = 10$  и эффекта экранирования  $\gamma = 3$ . Видно, что в стенках трубы (ствола) магнитное поле существенно возрастает.

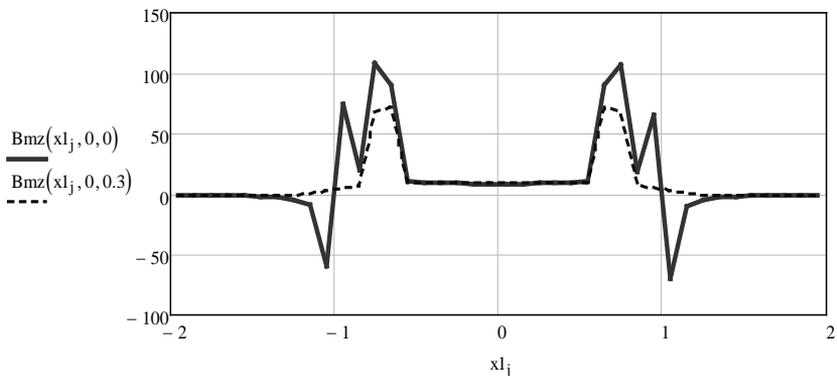


Рис. 2.14. Графики изменения продольной составляющей магнитной индукции поля витка, внутри которого находится труба

На расстоянии  $0,3R_v$  над витком (кривая  $B_{mz}(x,0,0.3)$ ) поле в основном находится в объеме трубы. Можно сказать, что ферромагнитный материал раздвигает область интенсивного магнитного поля вдоль ствола.

Качественно проанализировать распределение интенсивности магнитного поля можно по рис. 2.15, на котором представлены результаты расчета продольной составляющей поля  $B_{mz}$  в плоскости  $XOZ$ . Поле создается двумя витками, расположенными на расстоянии  $1,5R_v$  по оси  $Z$ , внутри витков – труба, размеры и параметры которой указаны выше. Видно, что поле витков в трубе перекрывается даже на таком относительно большом расстоянии. Это свидетельствует о том, что информационные катушки на стволе нужно располагать как можно дальше друг от друга, чтобы насыщенный материал ствола не «размазывал» картину магнитного поля.

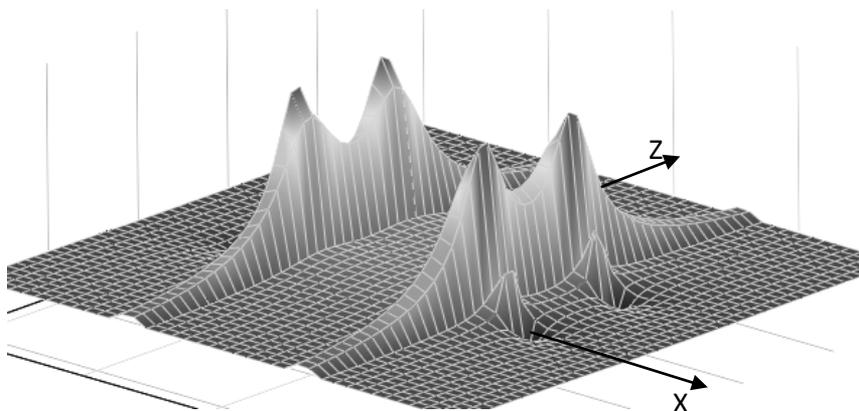


Рис. 2.15. Распределение магнитного поля двух витков, надетых на ферромагнитную трубу

Рассмотренная методика обеспечивает расчёт индукции магнитного поля в заданной точке пространства с учетом магнитных свойств материалов. Наглядное представление результатов расчёта позволяет проанализировать распределение в пространстве любой составляющей вектора магнитной индукции и сделать практические выводы о требуемых параметрах и конструктивных особенностях источников и приёмников магнитной энергии.

Представленные результаты для отдельных витков можно распространить на катушки, размеры которых в поперечном сечении су-

щественно меньше среднего радиуса. Магнитное поле катушки увеличивается пропорционально числу витков.

Проведенные расчеты показывают, что при расположении витков на расстоянии менее 0,2 радиуса витка разделить их магнитные поля, т.е. обеспечить отдельный прием, практически невозможно. По сути, это определяет максимальное допустимое расстояние между витками одной катушки для создания однородного магнитного поля. С другой стороны, для исключения взаимного влияния катушек при передаче информации они должны располагаться на расстоянии не менее 5 радиусов ствола.

Магнитное поле у стенок ствола больше, чем в центре (см. рис. 2.7, 2.8). Следовательно, можно утверждать, что при движении боеприпаса скорость изменения магнитного поля и ЭДС электромагнитной индукции, которую необходимо получить, также больше у стенок ствола. В частности, необходимо оценить целесообразность замены одной приёмной катушки, расположенной в центре, несколькими катушками меньшего размера, размещёнными по бокам боеприпаса.

## **2.2. Расчёт магнитного потока через приёмную катушку**

В отличие от индукционного ввода информации, когда передающая катушка создает переменное магнитное поле, для ввода энергии можно использовать постоянное магнитное поле, которое создаётся при помощи магнита или катушки с постоянным током. Магнитный поток в приёмной катушке, расположенной во взрывателе, изменяется при перемещении снаряда относительно источника постоянного магнитного поля, установленного на стволе.

По закону Фарадея, ЭДС электромагнитной индукции равна скорости изменения магнитного потока (потокосцепления) через поверхность, ограниченную контуром (катушкой). Очевидно, что скорость изменения магнитного потока в приёмной катушке взрывателя связана со скоростью снаряда. Для получения максимальной скорости изменения магнитного поля, а следовательно, и максимальной ЭДС источник постоянного магнитного поля целесообразно размещать вблизи дульного среза ствола, где скорость снаряда наибольшая (рис. 2.16).

Определить ЭДС в приёмной катушке можно, если рассчитать магнитный поток  $\Phi_m$  через поверхность, охватываемую её витками, и найти закон изменения  $\Phi_m$  во времени в процессе движения снаряда.

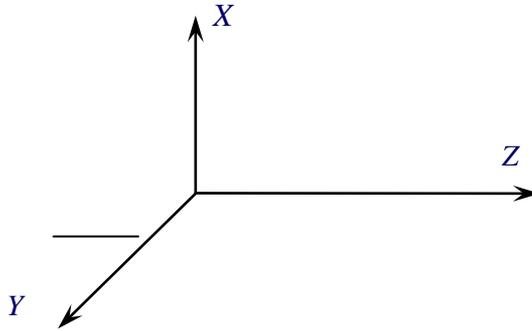


Рис. 2.16. Расположение катушек ИЛС и координатных осей

Как известно, в неоднородном магнитном поле поток  $\Phi_M$  через поверхность  $S$  равен

$$\Phi_M = \int_S \mathbf{B}_n dS, \quad (2.11)$$

где  $\mathbf{B}_n$  – нормальная составляющая вектора магнитной индукции к поверхности в заданной точке. Нормальной составляющей вектора магнитной индукции к поверхности, охватываемой приёмной катушкой, является продольная составляющая  $B_z(x, y, z)$  вдоль оси  $z$ , которая зависит от пространственных координат.

Для определения магнитного потока в приёмной катушке необходимо по методике, рассмотренной в предыдущем разделе (формулы (2.8) – (2.10)), рассчитать магнитную индукцию поля катушки с постоянным током во всех точках поверхности  $S$ , охватываемой приёмной катушкой.

Примем, что приёмная катушка, так же как и передающая, расположена в плоскости, перпендикулярной оси ствола. Выберем систему координат, в которой начало совпадает с центром передающей катушки, оси  $X$  и  $Y$  находятся в плоскости передающей катушки, а ось  $Z$  совпадает с осью ствола и направлена в сторону движения боеприпаса (см. рис. 2.16).

При расчетах на ЭВМ интеграл (2.11) заменяется суммой по элементам поверхности приёмной катушки:

$$\Phi_1(z) = \sum_i \sum_j B_z(x_i, y_j, z) \Delta S, \quad (2.12)$$

где  $\Delta S = \Delta x \cdot \Delta y$  – площадь элемента поверхности;  $\Delta x = x_i - x_{i-1}$  – шаг по координате  $x$ ;  $\Delta y = y_j - y_{j-1}$  – шаг по координате  $y$ . Продольная составляющая  $B_z(x, y, z)$  находится в соответствии с (2.9).

Можно рассчитать магнитный поток для разных значений  $z$ , т.е. для разных положений приёмной катушки при движении снаряда. Зная скорость снаряда  $v_c$ , и время  $\Delta t$ , за которое приёмная катушка проходит расстояние  $\Delta z = z_i - z_{i-1}$ , можно определить скорость изменения магнитного потока во времени и, следовательно, ЭДС электромагнитной индукции:  $e_{\text{инд}} = -\Delta\Phi_M/\Delta t$ , где  $\Delta t = \Delta z/v_c$ .

Таким образом, задавая реальные размеры, количество витков и ток в передающей катушке, а также скорость, размеры и количество витков приёмной катушки, можно рассчитать ЭДС, наводимую в приёмной катушке в процессе её движения. Более того, можно изменить размеры, местоположение и геометрическую форму приёмной катушки и проанализировать влияние этих факторов на ЭДС.

Рассчитаем магнитный поток для следующих условий: радиус витков передающей катушки  $R_v = 6,5$  см, количество витков  $N_{\text{пер}} = 50$ , ток 1 А, радиус витков приёмной катушки  $R_{\text{пр}} = 0,8 \cdot R_v$ , количество витков  $N_{\text{пр}} = 200$ , скорость движения  $V_{\text{пр}} = 500$  м/с.

Для расчета магнитного потока значения магнитной индукции приравняются нулю, если точка пространства находится на расстоянии больше, чем  $0,8R_v$ :

$$B_{1zs}(x, y, z) := \begin{cases} B_{1zs}(x, y, z) & \text{if } (\sqrt{x^2 + y^2} < 0,8) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}.$$

Для иллюстрации на рис. 2.17 показано распределение продольной составляющей  $B_z$  магнитной индукции в пределах приёмной катушки без сердечника, когда она находится в плоскости передающей катушки.

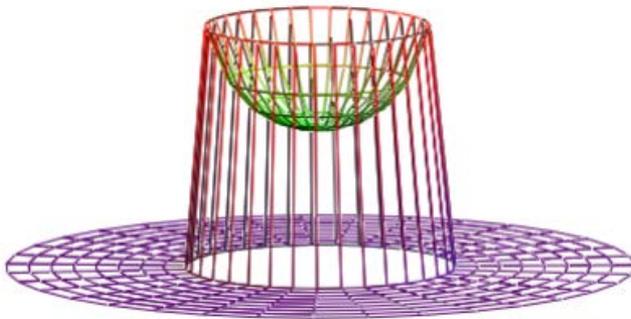


Рис. 2.17. Распределение магнитной индукции в круге с радиусом  $0,8R_v$ ,

Затем по формуле (2.12) суммируются магнитные потоки через элементарные площадки в плоскости с заданной координатой  $Z$ .

На рис. 2.18 показан магнитный поток для различных положений приёмной катушки в процессе движения снаряда. Точка  $Z = 0$  соответствует плоскости расположения передающей катушки.

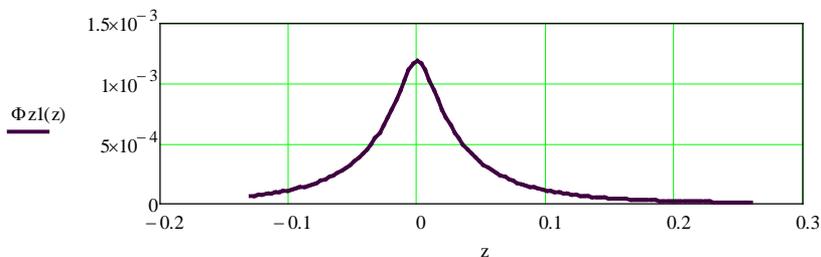


Рис. 2.18. Изменение магнитного потока через приёмную катушку

### 2.3. Расчёт ЭДС, наводимой в приёмной катушке

Для нахождения ЭДС необходимо найти скорость изменения магнитного потока во времени. Это требует сопоставления точек пространства (координат  $Z$ ) и моментов времени, когда приёмная катушка находится в этих точках. Принято, что в момент времени  $t = 0$  приёмная катушка находится в начале координат. Остальные моменты времени можно найти, задав скорость боеприпаса  $t = z / v_{\text{пр}}$ . График изменения магнитного потока в приёмной катушке во времени, рассчитанный для заданных условий, приведен на рис. 2.19.

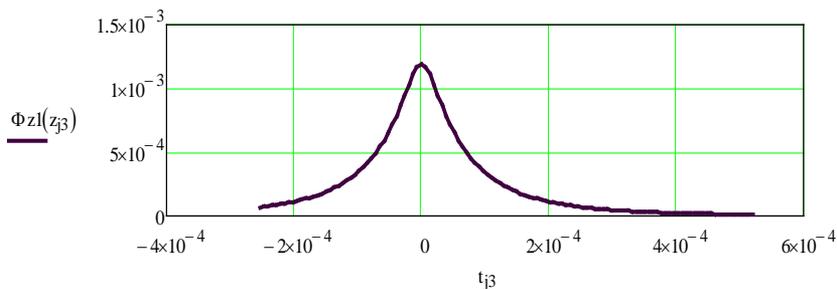


Рис. 2.19. Изменение во времени магнитного потока в приёмной катушке

По закону Фарадея, ЭДС электромагнитной индукции равна скорости изменения магнитного потока (потокосцепления) через поверхность, ограниченную контуром (катушкой). Для рассматриваемых условий скорость изменения потока – это отношение приращения потока  $\Delta\Phi_m = \Phi_{m_i} - \Phi_{m_{(i-1)}}$  на элементе расстояния  $\Delta z$  к величине временного интервала  $\Delta t = \Delta z/v_{пр}$ , за который приёмная катушка проходит этот элемент расстояния. График скорости изменения магнитного потока в приёмной катушке, т.е. график ЭДС электромагнитной индукции, показан на рис. 2.20.

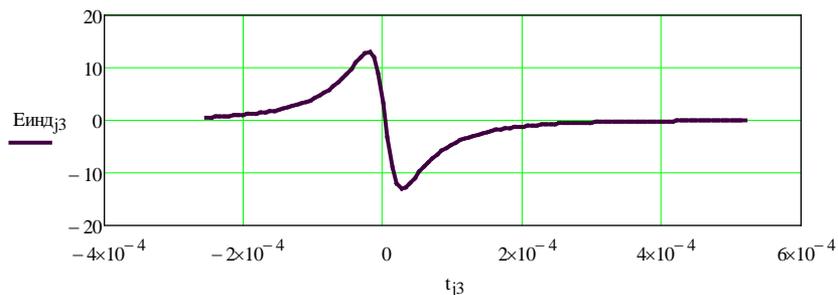


Рис. 2.20. ЭДС электромагнитной индукции в приёмной катушке

Проведенные расчеты подтверждают, что для ввода энергии в боеприпас следует использовать приёмную катушку, которая охватывает как можно большую поверхность в сечении ствола. Для приема информации целесообразно применять одну или несколько узких приёмных катушек, расположенных у поверхности боеприпаса.

## 2.4. Расчет процесса заряда конденсатора

Рассмотрим методику расчета переходного процесса в зарядной цепи конденсатора, накапливающего энергию для работы электронных схем взрывателя.

В предыдущих подразделах определены форма и параметры импульса ЭДС, который наводится в приёмной катушке взрывателя при движении боеприпаса в канале ствола. Этот импульс подается в зарядную цепь конденсатора. Энергии, накопленной в конденсаторе, должно быть достаточно для обеспечения функционирования электронных схем взрывателя и срабатывания электродетонатора.

В связи с этим возникает задача построения зарядной цепи, которая согласована с параметрами импульса ЭДС в приёмной катушке и обеспечивает максимальное накопление энергии. Для этого необхо-

дим определить функцию изменения напряжения на ёмкости во времени  $U_c(t)$  и влияние на неё параметров зарядной цепи.

В простейшем случае зарядная цепь представляет собой последовательное соединение резистора и конденсатора. Однако в данном случае напряжение для заряда конденсатора формируется в приёмной катушке (рис. 2.21) и необходимо учитывать её индуктивность. Эквивалентная схема зарядной цепи показана на рис. 2.22.

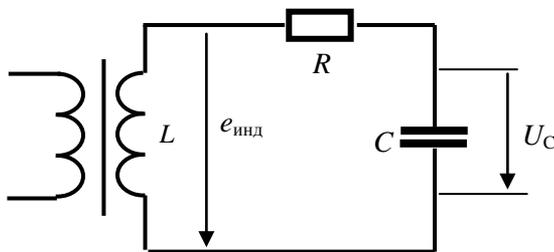


Рис. 2.21. Простейшая зарядная цепь

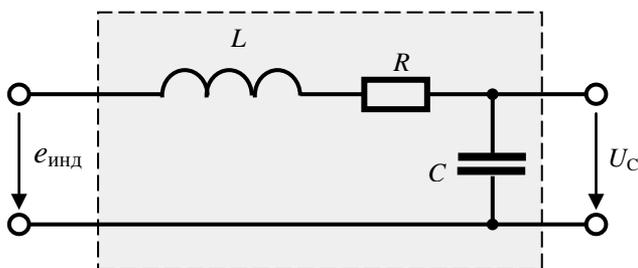


Рис. 2.22. Эквивалентная схема зарядной цепи

В этой задаче зарядная цепь может рассматриваться как линейная система (рис. 2.23), на вход которой подается импульс  $U_{инд}(t)$ . Отключением цепи (выходным сигналом) является напряжение на ёмкости  $U_c(t)$ .

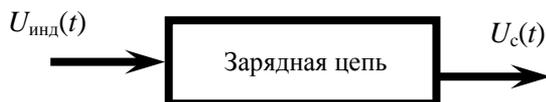


Рис. 2.23. Представление зарядной цепи как линейной системы

Известно, что полное описание поведения линейной системы при заданных начальных условиях дается решением соответствующего дифференциального уравнения. При входном воздействии сложной

формы не всегда удается найти строгое решение дифференциального уравнения. Вместо этого для решения большинства практических задач используют характеристики линейной системы: переходную, импульсную, частотную, передаточную.

*Импульсная характеристика*  $k(t)$  – это реакция системы с нулевыми начальными условиями на входное воздействие типа единичного импульса ( $\delta$ -функции Дирака):

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0, \\ \infty, & t = 0. \end{cases} \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1.$$

*Переходная характеристика*  $h(t)$  – это реакция системы с нулевыми начальными условиями на воздействие типа единичной ступенчатой функции  $1(t)$

$$1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t > 0. \end{cases}$$

Переходная характеристика в явном виде достаточно просто находится путем решения дифференциального уравнения системы.

Известно, что импульсная характеристика  $k(t)$  связана с переходной характеристикой  $h(t)$  соотношением

$$k(t) = \frac{dh(t)}{dt}. \quad (2.13)$$

При известном входном воздействии  $\xi(t)$  (рис. 2.24) и известной импульсной характеристике  $k(t)$  выходной сигнал  $\eta(t)$  (отклик системы) можно найти, используя интеграл свертки (интеграл Дюамеля):

$$\eta(t) = \int_{t_0}^t k(t - \tau) \xi(\tau) d\tau. \quad (2.14)$$

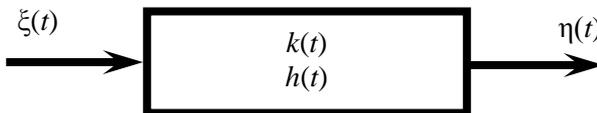


Рис. 2.24. Сигналы и временные характеристики линейной системы

Предлагается следующая методика решения задачи построения зарядной цепи.

1. Проверить линейность системы, т.е. уточнить, будут ли параметры цепи, а следовательно, и коэффициенты дифференциального уравнения постоянными при изменении входных величин во всём диапазоне возможных значений.

2. Составить дифференциальное уравнение цепи.

3. Решить уравнение цепи при нулевых начальных условиях и входном воздействии типа  $1(t)$ , т.е. найти переходную функцию  $h(t)$ .

4. Путем дифференцирования  $h(t)$  определить импульсную характеристику  $k(t)$  цепи.

5. Вычислить напряжение на ёмкости  $U_c(t)$ , когда входным воздействием для цепи является импульс ЭДС электромагнитной индукции  $U_{\text{инд}}(t)$ , наводимый в приёмных катушках при движении боеприпаса, т.е. интеграл свертки (2.14). Построить график изменения напряжения на ёмкости во времени  $U_c(t)$ .

6. Поскольку параметры  $U_c(t)$  зависят от параметров зарядной цепи, определить параметры элементов цепи, при которых в конденсаторе накапливается максимальная энергия.

Рассмотрим этапы решения и полученные результаты.

Зарядную цепь можно свести к эквивалентной схеме (см. рис. 2.22), которая содержит индуктивность приёмной катушки  $L$ , активное сопротивление  $R$  и накопительную ёмкость  $C$ , соединенные последовательно. К этой цепи подключена наводимая в приёмной катушке ЭДС индукции  $e_{\text{инд}}(t) = U_{\text{инд}}(t)$ , изменение которой во времени показано на рис. 2.20.

**Проверка линейности цепи.** Определим условия, при которых параметры зарядной цепи  $R$ ,  $L$  и  $C$  остаются постоянными, т.е. уравнение цепи будет линейным. В решаемой задаче активное сопротивление  $R$  и ёмкость  $C$  можно полагать не зависящими от входного воздействия  $U_{\text{инд}}(t)$ , величина которого (см. рис. 2.20) не превышает несколько десятков вольт. В то же время индуктивность приёмной катушки зависит от намагничённости её сердечника. Намагничённость определяется величиной напряжённости магнитного поля в сердечнике. При насыщении сердечника его магнитная проницаемость уменьшается, следовательно, индуктивность приёмной катушки может зависеть от величины входного сигнала.

Для выяснения степени намагничивания сердечника проведены расчеты магнитного поля при помощи программы FEMM 4.2. Расчеты выполнены для рассматриваемых условий. На рис. 2.25 показана пространственная картина магнитного поля в тот момент, когда приёмная катушка проходит мимо постоянного магнита с концентраторами, установленного снаружи ствола.

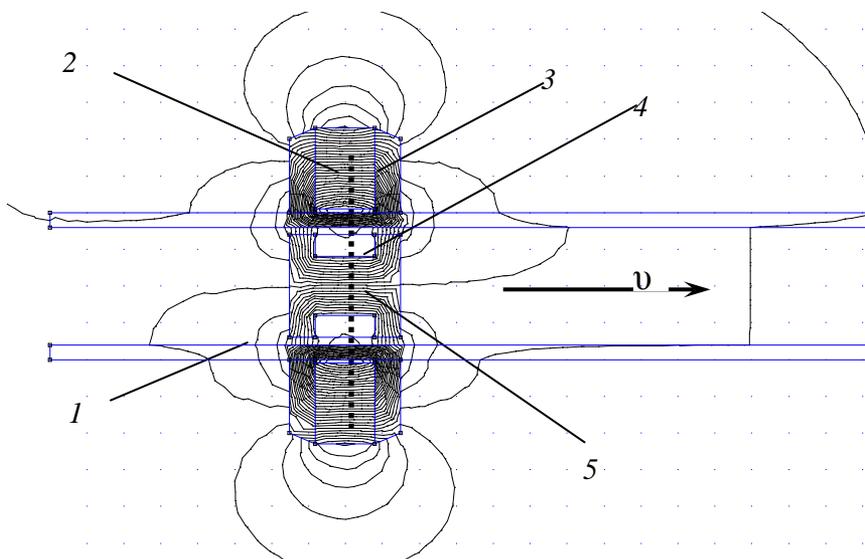


Рис. 2.25. Силовые линии магнитного поля в момент прохождения приёмной катушкой плоскости магнита: 1 – ствол; 2 – магнит; 3 – концентратор; 4 – обмотка приёмной катушки; 5 – сердечник приёмной катушки

Концентраторы и сердечник катушки выполнены из магнитомягкой стали с узкой петлей гистерезиса. Основная кривая намагничивания сердечника приведена на рис. 2.26.

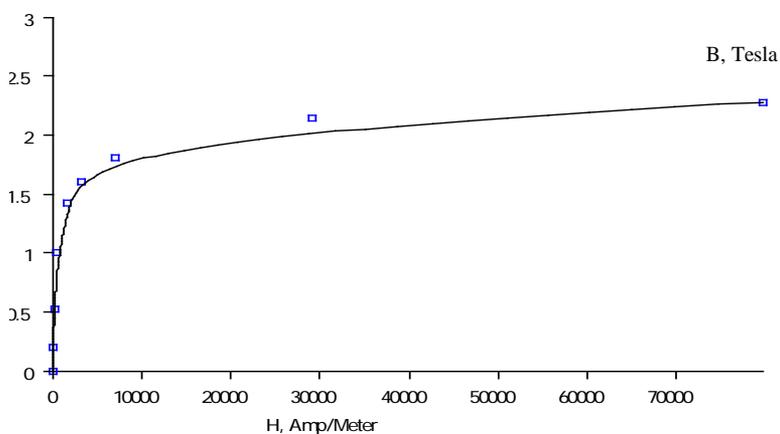


Рис. 2.26. Кривая намагничивания сердечника приёмной катушки

Проведены расчеты магнитного поля внутри ствола и в сердечнике приёмной катушки. Изменение модуля магнитной индукции поперёк ствола вдоль прямой, показанной на рис. 2.26 пунктирной линией, представлено на рис. 2.27. Цифры указывают области пространства, которым соответствуют значения магнитной индукции на графике: 1 – внутри магнита, 2 – внутри стенок ствола, 3 – в медной обмотке приёмной катушки, 4 – в сердечнике приёмной катушки. На рис. 2.28 показано изменение напряженности магнитного поля вдоль этой же прямой.

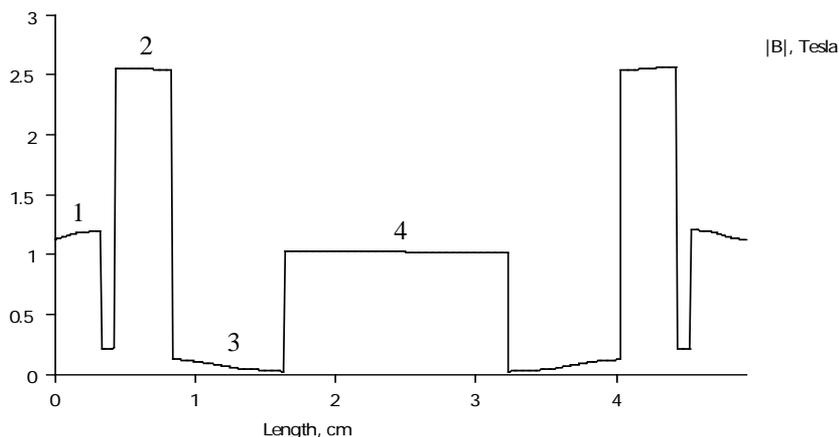


Рис. 2.27. Изменение модуля магнитной индукции поперек ствола

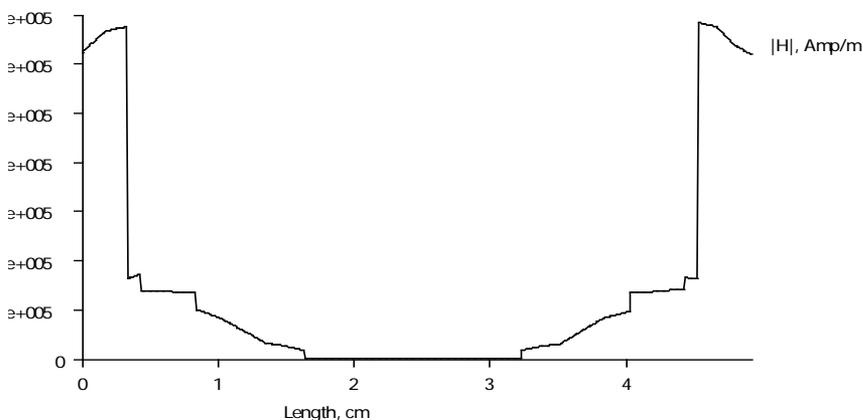


Рис. 2.28. Изменение модуля напряженности магнитного поля поперек ствола

Из рис. 2.27 следует, что максимальная магнитная индукция в сердечнике катушки (участок 4) равна примерно 1 Тесла. Значение напряженности магнитного поля в сердечнике – около 1000 А/м. Эта точка находится на линейном участке кривой намагничивания (см. рис. 2.26). Расчеты показывают, что при смещении приёмной катушки от положения, показанного на рис. 2.25, магнитная индукция и напряженность магнитного поля убывают. Таким образом, при движении приёмной катушки рабочая точка, характеризующая намагниченность сердечника, не будет выходить за пределы линейного участка. Следовательно, магнитную проницаемость сердечника и индуктивность приёмной катушки можно считать постоянными величинами, не зависящими от входного воздействия, так же как сопротивление и ёмкость, а зарядную цепь – линейной системой.

**Дифференциальное уравнение зарядной цепи.** По второму закону Кирхгофа для данной цепи в любой момент времени выполняется равенство

$$U_{\text{инд}}(t) = U_L(t) + U_R(t) + U_C(t)$$

или

$$L \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) + U_C(t) = U_{\text{эиä}}(t).$$

Учитывая, что ток в последовательной цепи является также током в ёмкости, который равен  $i(t) = \tilde{N} \frac{dU_C(t)}{dt}$ , получим

$$L\tilde{N} \frac{d^2U_C(t)}{dt^2} + R\tilde{N} \frac{dU_C(t)}{dt} + U_C(t) = U_{\text{эиä}}(t).$$

После деления на множитель у первого слагаемого выражение примет вид

$$\frac{d^2U_C(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dU_C(t)}{dt} + \frac{1}{L\tilde{N}} U_C(t) = \frac{1}{L\tilde{N}} U_{\text{эиä}}(t). \quad (2.15)$$

Это неоднородное дифференциальное уравнение второй степени, решение которого, как известно, состоит из свободной и вынужденной составляющих:

$$U_C(t) = U_{\text{св}}(t) + U_{\text{вын}}(t). \quad (2.16)$$

Свободная составляющая характеризует процессы в системе, выведенной из состояния равновесия, т.е. определяет переходной процесс. Вынужденная составляющая характеризует конечное состояние, в которое система перейдет после переходного процесса.

**Определение переходной характеристики цепи.** Эта задача решается при нулевых начальных условиях ( $U_C(0) = 0$ ;  $i(0) = 0$ ) и при единичном входном воздействии  $U_{\text{внд}}(t) = 1(t)$ . Рассмотрим порядок решения уравнения (2.15) в этих условиях.

Как указывалось ранее, решение включает свободную и вынужденную составляющие. Вынужденная составляющая

$$U_{\text{вын}}(t) = U_C(\infty) = 1. \quad (2.17)$$

Действительно, для данной схемы после подачи на вход постоянного напряжения и окончания переходных процессов конденсатор зарядится до величины этого напряжения.

Свободная составляющая находится в результате решения однородного уравнения, т.е. когда правая часть (2.15) равна нулю. Если обозначить коэффициенты при слагаемых (2.15)  $\frac{R}{L} = 2\beta$  и  $\frac{1}{LC} = \omega_0^2$ , то получим известную каноническую форму уравнения затухающих колебаний:

$$\frac{d^2 U_C(t)}{dt^2} + 2\beta \frac{dU_C(t)}{dt} + \omega_0^2 U_C(t) = 0.$$

Коэффициенты имеют конкретный физический смысл, а именно  $\beta$  – коэффициент затухания,  $\omega_0$  – частота собственных колебаний в системе. Решение такого уравнения в общем виде известно:

$$U_{\text{н\ddot{a}}}(t) = A_1 \cdot \exp(p_1 \cdot t) + A_2 \cdot \exp(p_2 \cdot t), \quad (2.18)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – корни характеристического уравнения  $p^2 + 2\beta p + \omega_0^2 = 0$ ;  $A_1$  и  $A_2$  – постоянные коэффициенты, которые находятся из начальных условий.

Формула для нахождения корней квадратного уравнения:

$$p_{1,2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}.$$

Если  $\beta > \omega_0$ , то корни действительные и уравнение (2.17) описывает аperiодический процесс. Если же  $\beta < \omega_0$ , то корни комплексносопряженные:

$$p_1 = -\beta + j\omega, \quad p_2 = -\beta - j\omega, \quad (2.19)$$

а уравнение (2.17) описывает затухающий колебательный процесс с частотой  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ .

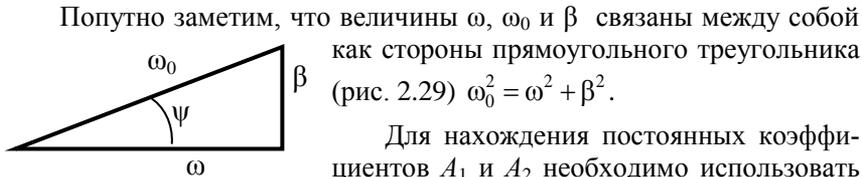


Рис. 2.29. Взаимосвязь величин  $\omega$ ,  $\omega_0$  и  $\beta$

мент времени:

$$U_C(0) = U_{св}(0) + U_{вын}.$$

После подстановки в (2.16) и (2.18)  $t = 0$  с учетом закона коммутации получим

$$U_{\tilde{N}}(-0) = U_{\tilde{N}}(+0) = A_1 + A_2 + 1 = 0. \quad (2.20)$$

Значение тока в начальный момент времени также равно нулю, так как, по законам коммутации, ток в индуктивности мгновенно измениться не может. В последовательной цепи  $i_L(t) = i_C(t) = \tilde{N} \frac{dU_C(t)}{dt}$ , продифференцируем (2.16) с учетом (2.17) и (2.18), в полученное выражение для тока подставим  $t = 0$ :

$$i_L(-0) = i_L(+0) = C(p_1 A_1 + p_2 A_2) = 0.$$

С учётом (2.20) для определения коэффициентов  $A_1$  и  $A_2$  получаем систему из двух уравнений:

$$\begin{aligned} A_1 + A_2 &= -1, \\ p_1 A_1 + p_2 A_2 &= 0, \end{aligned}$$

откуда

$$\dot{A}_1 = \frac{p_2}{p_1 - p_2}, \quad \dot{A}_2 = \frac{p_1}{p_2 - p_1}. \quad (2.21)$$

В полученные выражения подставим значения корней характеристического уравнения  $p_1, p_2$  (2.19):

$$\begin{aligned} \dot{A}_1 &= \frac{-\beta - j\omega}{-\beta + j\omega + \beta + j\omega} = \frac{-(\beta + j\omega)}{2j\omega}, \\ \dot{A}_2 &= \frac{-\beta + j\omega}{-\beta - j\omega + \beta - j\omega} = \frac{(\beta - j\omega)}{2j\omega}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Подставим (2.19) и (2.22) в общее выражение для свободной составляющей (2.18). С учётом вынужденной составляющей (2.17) напряжение на конденсаторе при подаче на вход  $1(t)$ , т.е. переходная характеристика цепи

$$U_C(t) = 1 + \frac{-(\beta + j\omega)}{2j\omega} e^{(-\beta + j\omega)t} + \frac{(\beta - j\omega)}{2j\omega} e^{(-\beta - j\omega)t}.$$

После перевода комплексной экспоненты в тригонометрическую форму:  $e^{\pm j\omega t} = \cos(\omega t) \pm j \sin(\omega t)$  и выполнения необходимых преобразований выражение для  $U_C(t)$  примет вид

$$U_C(t) = 1 - \frac{1}{\omega} e^{-\beta t} (\omega \cos \omega t + \beta \sin \omega t). \quad (2.23)$$

Умножим и разделим правую часть (2.23) на  $\omega_0$ :

$$U_C(t) = 1 - \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\beta t} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \cos \omega t + \frac{\beta}{\omega_0} \sin \omega t \right).$$

Учитывая, что, согласно рис. 2.29,

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \sin(\Psi), \quad \frac{\beta}{\omega_0} = \cos(\Psi)$$

получим окончательно

$$U_C(t) = h(t) = \left( 1 - \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\beta t} \sin(\omega t + \Psi) \right). \quad (2.24)$$

**Определение импульсной характеристики цепи.** Необходимо взять производную от переходной характеристики

$$k(t) = \frac{dh(t)}{dt} = \frac{\omega_0}{\omega} (e^{-\beta t} \sin(\omega t + \Psi))'_t.$$

После взятия производной от произведения функций в скобках выражение для импульсной характеристики принимает вид

$$k(t) = \frac{\omega_0^2}{\omega} e^{-\beta t} \sin \omega t. \quad (2.25)$$

Графики переходной  $h(t)$  и импульсной  $k(t)$  характеристики зарядной цепи приведены на рис. 2.30.

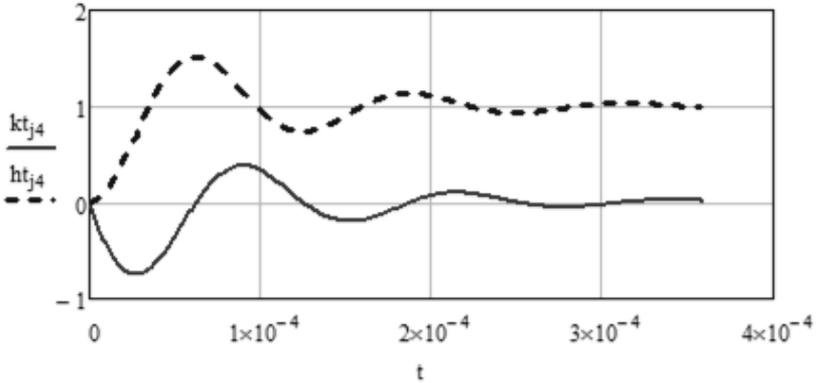


Рис. 2.30. Импульсная и переходная характеристики цепи

**Определение напряжения на ёмкости.** Выходной функцией цепи является напряжение на конденсаторе (см. рис. 2.22). Оно находится путём вычисления интеграла свертки (2.14). Входным воздействием для цепи является импульс ЭДС электромагнитной индукции  $U_{\text{инд}}(t)$ , наводимый в приёмной катушке при движении боеприпаса. Параметры и форма входного импульса определены ранее (см. рис. 2.20). Выражение для импульсной характеристики – (2.25). Вычисление интеграла свертки позволяет построить график изменения напряжения на ёмкости во времени.

Для накопления максимальной энергии необходимо зарядить аккумулирующий конденсатор до максимально возможного напряжения. Причем параметры напряжения (амплитуда, частота, коэффициент затухания и т.д.) зависят от параметров зарядной цепи. Для получения максимально возможного напряжения на конденсаторе необходимо использовать явление резонанса, которое наступит при совпадении частоты внешнего воздействия  $U_{\text{инд}}(t)$  (см. рис. 2.20) с частотой

$$\text{колебания зарядной цепи } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}.$$

**Выбор параметров зарядной цепи.** Проанализируем влияние параметров зарядной цепи, а следовательно, и её импульсной характеристики на величину накапливаемой энергии. Для этого рассмотрим четыре случая: 1) малые значения  $L$  и  $C$ , 2) увеличение ёмкости при малой индуктивности, 3) увеличение индуктивности при малой ёмкости, 4) определение наилучших значений  $L$  и  $C$ .

1.  $L = 0,0001$  Гн,  $C = 0,001$  мкФ. В этом случае импульсная характеристика цепи стремится к  $\delta$ -функции (рис. 2.3,б). Учитывая фильтрующее свойство  $\delta$ -функции, можно полагать, что интеграл Дюамеля (2.14) для каждого момента времени равен входному воздействию, т.е. выходной сигнал повторяет входное воздействие. Результаты расчётов (рис. 2.31,в) это подтверждают. Необходимо обратить внимание на то, что величина напряжения на конденсаторе в этом случае значительно меньше, чем на входе.

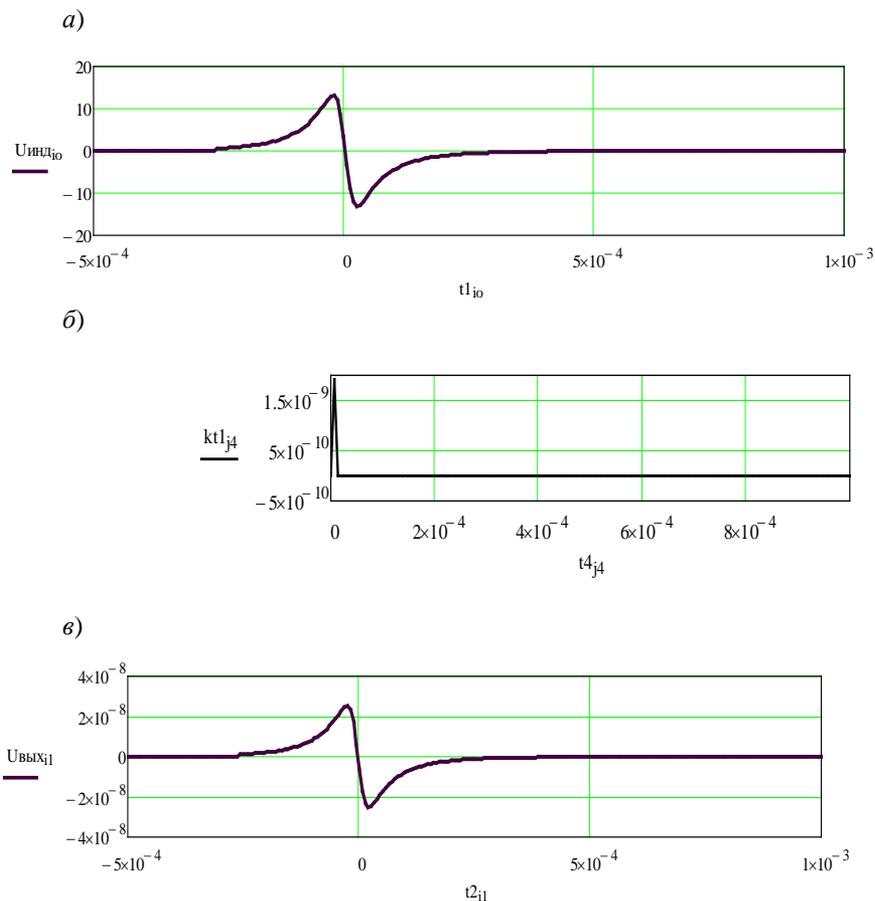


Рис. 2.31. Напряжение на конденсаторе при малых  $L$  и  $C$

2.  $L = 0,0001$  Гн, ёмкость возрастает до 6,2 мкФ. В этом случае импульсная характеристика цепи удлиняется по времени (рис. 2.32,*а*). Конденсатор заряжается дольше, чем действует первая половина входного сигнала (рис. 2.31,*а*). В результате на выходе положительный перепад напряжения ограничивается. Отрицательный перепад почти достигает входного сигнала (рис. 2.32,*б*).

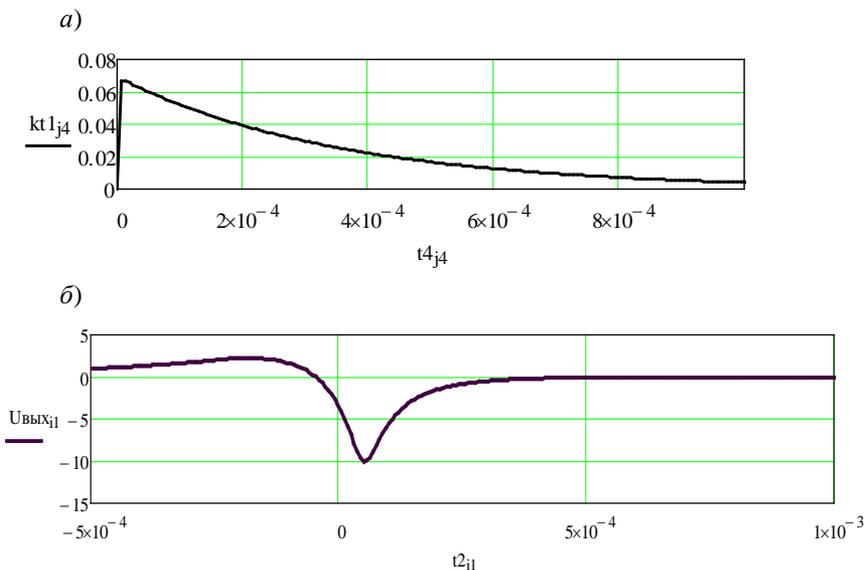


Рис. 2.32. Заряд конденсатора при малой индуктивности и большой ёмкости

3.  $C = 0,01$  мкФ, индуктивность возрастает до 0,03 Гн. В этом случае импульсная характеристика имеет колебательный характер (рис. 2.33,*а*) и удлиняется по времени при возрастании  $L$ . Напряжение на ёмкости также имеет колебательный характер. Амплитуда колебаний  $U_{\text{вых}}(t) = U_C(t)$  возрастает до 100 В, однако накапливаемая энергия невелика, так как ёмкость конденсатора недостаточна.

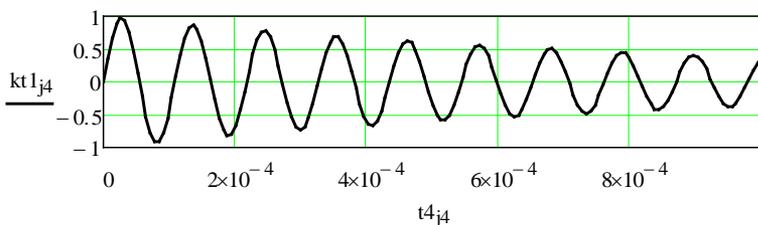


Рис. 2.33. Заряд конденсатора при малой ёмкости и большой индуктивности

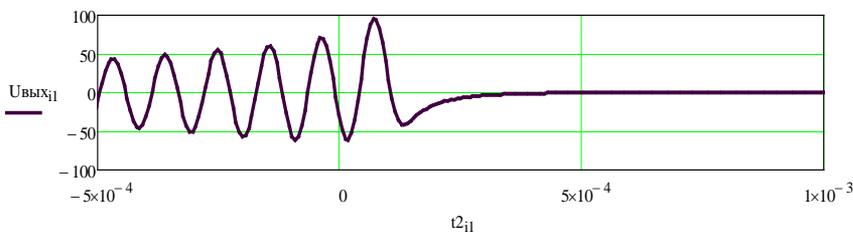


Рис. 2.33 (окончание)

4. Определение наилучших значений  $L$  и  $C$ . Расчёты показывают, что наилучшие, с точки зрения максимума накапливаемой энергии, значения  $L$  и  $C$  находятся в области, когда длительность импульсной характеристики по уровню  $0,1U_{\max}$  примерно в 4-5 раз больше длительности индукционного импульса (см. рис. 2.31,а), причём за это время импульсная характеристика совершает 2-3 колебания. На рис. 2.34 приведены графики изменения основных физических величин во времени при выбранных значениях  $L$  и  $C$ . Расчёты показали, что для рассматриваемых условий (см. подразд. 2.2) при активном сопротивлении зарядной цепи  $R = 60$  Ом лучшие значения  $L=0,03$  Гн,  $C = 2,8$  мкФ.

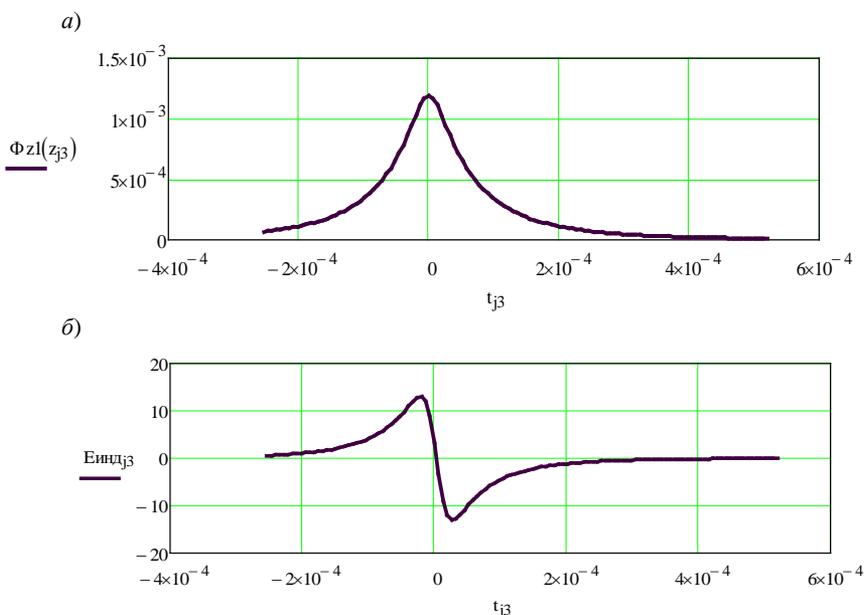
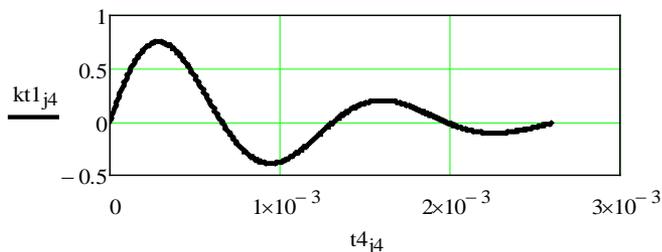


Рис. 2.34. Графики изменения основных физических величин во времени: а – магнитный поток в приёмной катушке; б – ЭДС электромагнитной индукции; в – импульсная характеристика зарядной цепи; г – напряжение на конденсаторе

б)



в)

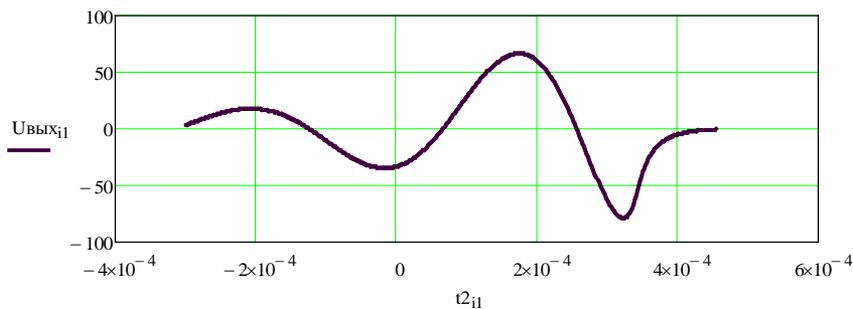


Рис. 2.34 (окончание)

Энергия, накапливаемая в конденсаторе, равна

$$W = \frac{CU^2}{2}, \quad (2.26)$$

где  $U_C$  – максимальное напряжение заряда конденсатора.

Максимальное положительное напряжение на конденсаторе 65 В, отрицательное – 80 В, накапливаемая энергия – 5 и 8 мДж соответственно. Данное значение энергии получено при токе в витках передающей катушки, равном 1 А. Этого достаточно для питания электрических цепей взрывателя и его устройств. Увеличение  $U_{C\max}$  может быть достигнуто путём увеличения числа витков приёмной и передающей катушек, а также при возрастании тока в передающей катушке.

В простейшей цепи после заряда конденсатора начинается его разряд. Для предотвращения разряда и фиксации максимального напряжения на конденсаторе можно использовать одноконтный преобразователь напряжения (рис. 2.35). Индуктивность  $L_1$  приёмной катушки и конденсатор  $C$  разделены выпрямительным диодом  $VD1$ , ко-

который препятствует разряду конденсатора. К аккумулялирующему конденсатору  $C$  подключен  $DLC$ -фильтр, включающий диод  $VD2$ , дроссель  $L$  и ёмкость нагрузки  $C_n$ . Диод  $VD2$  не только замыкает ток выходного дросселя через нагрузку, но и предотвращает перезаряд конденсатора. Дроссель сглаживает пульсации тока через нагрузку.

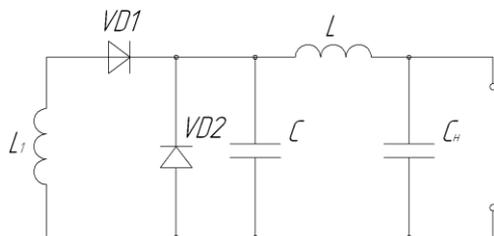


Рис. 2.35. Схема однофазного преобразователя напряжения

Из рис. 2.34,з следует, что напряжение на конденсаторе имеет колебательный характер. Для обеспечения прохождения переменного тока через приёмную катушку и фиксации максимального положительного и максимального отрицательного напряжения используется двухтактная схема (рис. 2.36).

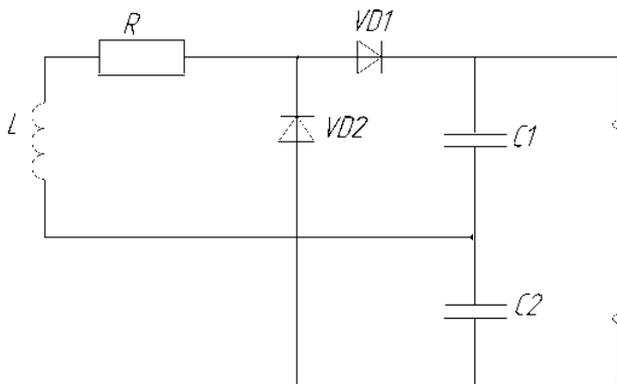


Рис. 2.36. Схема двухфазного преобразователя напряжения

При положительном перепаде напряжения на индуктивности приёмной катушки  $L$  заряжается конденсатор  $C1$  через диод  $VD1$ , а при отрицательном перепаде через диод  $VD2$  – конденсатор  $C2$ . Диоды  $VD1$  и  $VD2$  предотвращают разряд конденсаторов. Выходное напряжение схемы равно сумме напряжений на  $C1$  и  $C2$ . Параметры

элементов схемы выбираются с использованием рассмотренной методики.

### 3. ПОРЯДОК РАСЧЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА FEMM

#### 3.1. Состав и назначение элементов пакета FEMM

Пакет FEMM включает несколько основных программ: препроцессора (femm.exe), решателя (fkern.exe с дополнительной программой triangle.exe), постпроцессора (femmview.exe с дополнительной программой femmplot.exe).

Препроцессор обеспечивает ввод геометрических размеров и свойств материалов. Решатель производит вычисления уравнений ЭМП. Постпроцессор предназначен для визуализации результатов расчета и построения графиков.

Создание новой модели начинается с запуска препроцессора (рис. 3.1). В этом окне вводятся координаты опорных точек, соответствующие форме и геометрическим размерам магнитной системы устройства, и присваиваются магнитные свойства её составным частям, т.е. формируется модель устройства.

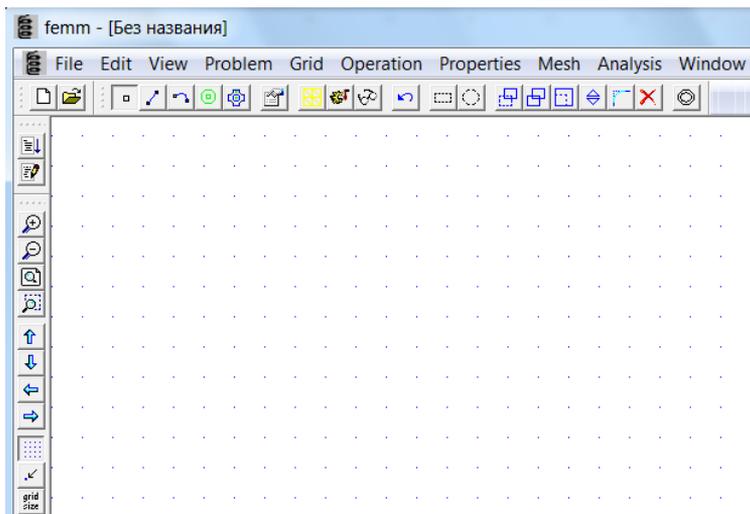


Рис. 3.1. Окно программы FEMM при работе в препроцессоре

Преппроцессор позволяет сохранить модель на диске. Файлу с параметрами модели автоматически присваивается расширение \*.fem.

### 3.2. Предварительная подготовка модели

Перед построением модели в программе FEMM рекомендуется создать ее на бумаге. Это особенно существенно, если магнитная система (МС) относительно сложная. При этом надо заранее по заданным исходным данным определить координаты характерных точек модели, называемых опорными.

Контуры модели получаются соединением опорных точек прямыми линиями или дугами окружностей так, чтобы были образованы замкнутые площадки (блоки). Характеристики материала внутри каждого блока должны быть одинаковыми.

### 3.3. Запуск программы, определение типа задачи

Запустить программу FEMM. Щелкнуть кнопку с пиктограммой в виде чистого листа бумаги (первая кнопка слева во второй строке меню – строке пиктограмм, см. рис. 3.1). Возникнет диалог *Create a new problem* (Создание новой задачи), в поле которого по умолчанию стоит *Magnetic Problem* (Магнитная задача). Нажать ОК.

Щелкнуть *Problem* (Задача) в верхней строке меню (см. рис. 3.1). Откроется диалог *Problem Definition* (рис. 3.2), в котором необходимо заполнить следующие поля:

*Problem Type* (Тип задачи). Под типом задачи имеется в виду расчет плоскопараллельного (Planar) или осесимметричного (Axisymmetric) полей;

*Length Units* (Единицы измерения). Можно выбрать миллиметры, сантиметры, дюймы;

*Frequency (Hz)* (Частота (Гц));

*Depth* (Толщина) – для плоскопараллельного поля.

После выбора параметров и заполнения полей щелкнуть ОК.

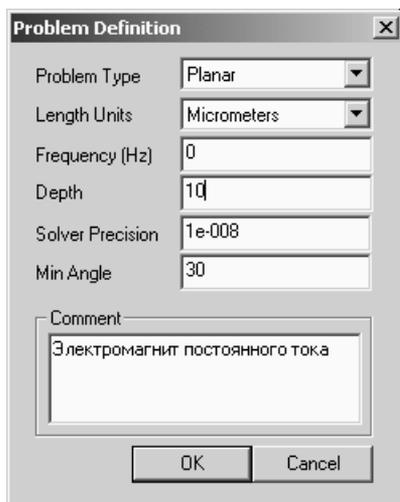


Рис. 3.2. Диалоговое окно ввода параметров задачи

### 3.4. Построение контуров модели

Опорные точки вводятся в режиме точек, когда нажата кнопка инструментов с пиктограммой в виде маленького контурного квадрата в центре  (см. рис. 3.1, третья слева кнопка в строке пиктограмм). Для точного ввода координат точек используется клавиша «tab».

Начало осей координат  $x$  и  $y$  плоскопараллельного поля относительно модели может находиться в любом месте; осесимметричная модель должна располагаться в области положительных значений  $z$  ( $z$  – ось вращения).

После ввода всех опорных точек необходимо соединить их отрезками прямых линий или дугами окружности. Для этого перейти в соответствующий режим (кнопки 4 или 5 в строке пиктограмм на рис. 3.1). Каждая линия вводится двумя последовательными щелчками опорных точек, введенных ранее.

### 3.5. Ввод электрических и магнитных свойств частей модели

Замкнутые площадки необходимо обозначить как *блоки*. Для этого надо перейти в режим работы с блоками (шестая слева кнопка зеленого цвета в строке пиктограмм на рис. 3.1). Если щелкнуть любую точку внутри блока, то на модели возникает маленький квадратик зеленого цвета и надпись <None> рядом с ним. Все замкнутые площадки модели должны быть помечены такими значками.

Затем необходимо ввести свойства всех блоков. Для этого сначала создается перечень материалов модели с указанием их электрических и магнитных свойств. С каждым блоком сопоставляется один из материалов модели.

В программе FEMM есть библиотека стандартных материалов. Можно также добавить материалы с нужными свойствами.

Целесообразно сначала отобрать те материалы, которые имеются в библиотеке. Для этого в верхней строке меню (см. рис. 3.1) щелкнуть *Properties -> Material Library* (Свойства -> Библиотека материалов). Возникнет одноименное окно (рис. 3.3).

В левой его части расположены папки библиотеки, открыть которые можно стандартным щелчком. Любой материал автоматически присваивается модели, если его значок «перетащить» в правую часть окна, где показано содержание папки *Model Materials* (Материалы модели). Изображение значка этого материала появится в папке *Model Materials*, при этом оно останется и в библиотеке.

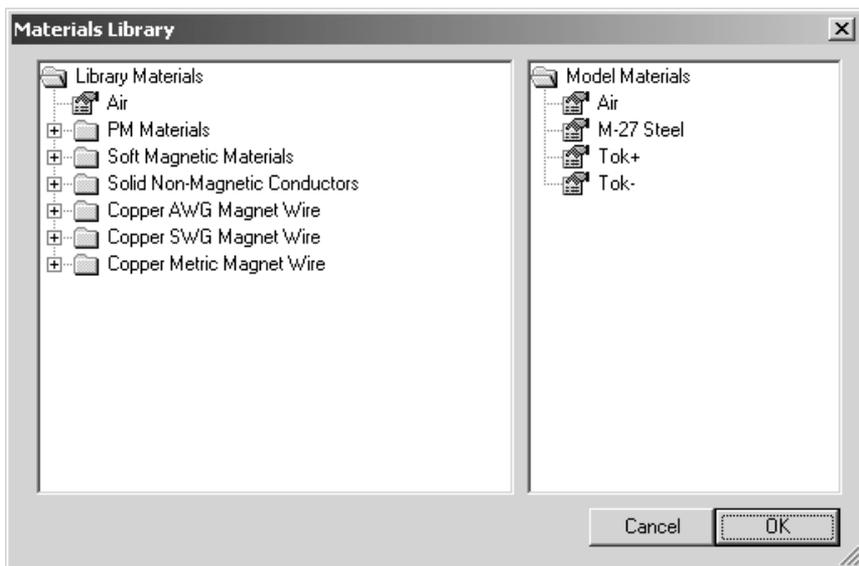


Рис. 3.3. Диалоговое окно библиотеки материалов

Например, почти все модели имеют в качестве одного из материалов воздух. Перетащив значок Air, можно получить возможность присвоить и имя, и свойства воздуха всем воздушным блокам модели.

Аналогично выбираются в библиотеке и переносятся в папку *Model Materials* те материалы, которые используются в модели.

Для присвоения блокам имен и свойств материалов необходимо после формирования перечня материалов модели перейти в режим работы с блоками (шестая слева кнопка зеленого цвета в строке на рис. 3.4). Затем правой кнопкой мыши выделить зеленый квадратик внутри блока модели. Он становится красным. Нажать клавишу пробела. Рядом с выделенным блоком возникнет окно *Properties for selected block* (Свойства выделенного блока). В верхнем поле (*Block type* – Тип блока) нажать квадратную кнопку с черным треугольником. Выпадающий список содержит перечень материалов модели, созданный ранее. Выбрать материал, соответствующий выделенному блоку.

В поле *Mesh size* (Длина стороны конечного элемента сетки) ввести с клавиатуры размер элемента сетки. От этого размера зависит расстояние между точками в пространстве, в которых рассчитывается магнитное поле.

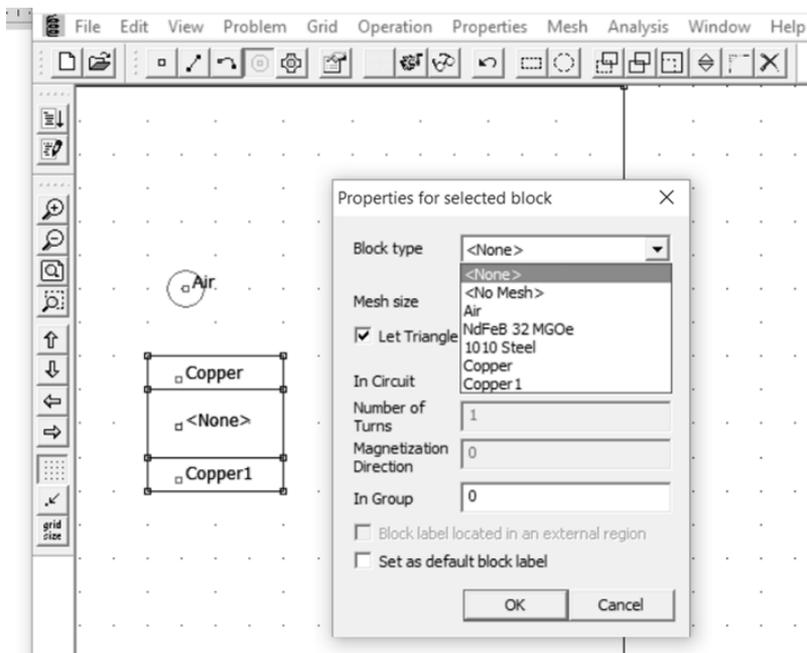


Рис. 3.4. Диалоговое окно свойств выделенного блока

После щелчка ОК окна *Properties for selected block* красный цвет квадратной метки выделенного блока превращается в зеленый и вокруг квадратика возникнет зеленая окружность, диаметр которой тем больше, чем больше размер конечного элемента. Вместо слова <None> рядом с меткой блока появляется название выбранного материала, а его свойства присваиваются блоку.

На рис. 3.4 показаны контуры модели катушки с током в воздухе.

Материалы библиотеки соответствуют стандартам США. При необходимости свойства материалов можно модифицировать или вводить дополнительные материалы и назначать им требуемые электрические, магнитные и конструктивные свойства.

### 3.6. Изменение свойств материалов

Щёлкнуть строку *Materials* (Материалы) пункта *Properties* (Свойства) главного меню. Возникнет окно (рис. 3.5) *Properties Definition* (Назначение свойств). Следует иметь в виду, что слово *Properties* в данном окне по смыслу обозначает материал, обладающий свойствами.

Если в поле *Property Name* (Имя свойства) нажать квадратную кнопку с черным треугольником, выпадет список, содержащий перечень материалов модели. Можно выбрать любой материал, и его название появится в данном поле. Кнопкой *Delete Property* можно этот материал удалить из перечня модели кнопкой *Modify Property* (Изменить свойство) – изменить свойства выбранного материала, кнопкой *Add Property* (Добавить свойства) – добавить новый материал, отсутствующий в перечне модели и в библиотеке FEMM.



Рис. 3.5. Диалоговое окно назначения свойств

Кнопка *Modify Property* вызывает окно *Block Property* (Свойства блока) (рис. 3.6). В поле *Name* отображается название выбранного материала, а в остальных полях – его основные электрические и магнитные свойства, которые можно менять.

a)

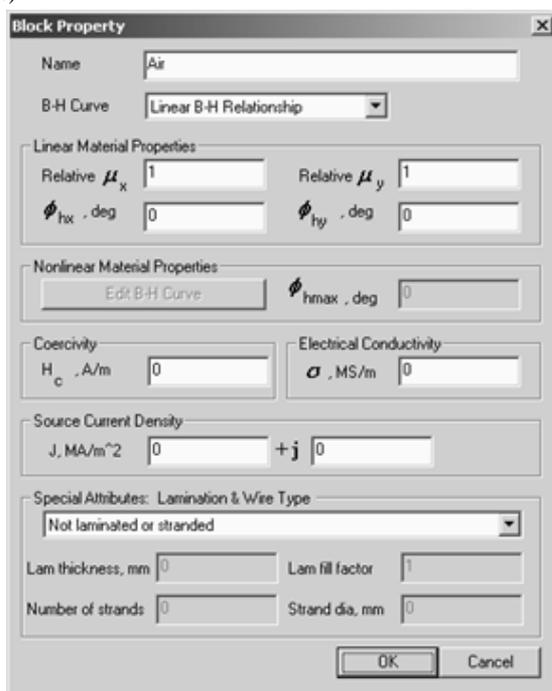


Рис. 3.6. Окно свойств блока «воздух»(а) и блока «сталь М-27» (б)

б)

**Block Property**

Name: M-27 Steel

B-H Curve: Nonlinear B-H Curve

Linear Material Properties

Relative  $\mu_x$ : 12138      Relative  $\mu_y$ : 12138

$\phi_{hx}$ , deg: 0       $\phi_{hy}$ , deg: 0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve       $\phi_{hmax}$ , deg: 20

Coercivity

$H_c$ , A/m: 0

Electrical Conductivity

$\sigma$ , MS/m: 2

Source Current Density

J, MA/m<sup>2</sup>: 0 + j 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Laminated in-plane

Lam thickness, mm: 0.635      Lam fill factor: 0.98

Number of strands: 0      Strand dia, mm: 0

OK      Cancel

Рис. 3.6 (окончание)

Кнопка *Add Property* также вызывает окно *Block Property*, но в поле *Name* отображается *New Material* (Новый материал). Значения остальных полей установлены по умолчанию. В этом случае в поле *Name* нужно ввести название материала, а в остальных полях указать его свойства. Рассмотрим их более подробно.

Поле *B-H Curve* (кривая намагничивания) имеет выпадающий список из двух строк: *Linear B-H Relationship* (линейная связь *B* и *H*) и *Nonlinear B-H Curve* (Нелинейная кривая намагничивания *B-H*).

Если выделить *Linear B-H Relationship*, как на рис. 3.6,а, будет активна группа параметров *Linear Material Properties* (Линейные свойства материала). FEMM позволяет ввести разные относительные проницаемости в горизонтальном  $\mu_x$  и вертикальном  $\mu_y$  направлениях для плоскопараллельного поля, или в радиальном  $\mu_r$  и осевом  $\mu_z$  направлениях для осесимметричного поля.

Если из выпадающего списка *B-H Curve* выделить *Nonlinear B-H Curve* (см. рис. 3.6, б), то активными станут параметры в прямоуголь-

нике *Nonlinear Material Properties* (Нелинейные свойства материала). Чтобы ввести кривую  $B(H)$ , нужно щелкнуть кнопку *Edit B-H Curve* (Редактирование кривой). Появляется окно *B-H Curve Data*, позволяющее ввести значения индукции  $B$  и соответствующие им значения напряженности магнитного поля  $H$  (рис. 3.7).

После ввода данных кривой  $B(H)$  необходимо ее построить, чтобы убедиться в том, что она получилась достаточно плавной (рис. 3.8). Это делается щелчком кнопки *Plot B-H Curve* (Построение  $B-H$  кривой). При необходимости координаты точек кривой  $B(H)$  можно скорректировать.

Поле *Coercivity* (коэрцитивная сила) (рис. 3.6) используется для задания свойств постоянных магнитов. Поле *Electrical Conductivity* (электропроводность) позволяет ввести удельную электропроводность материала.

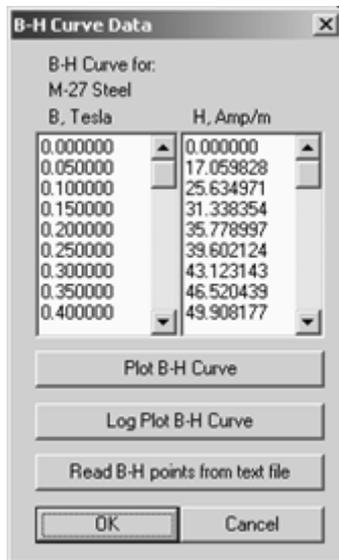


Рис. 3.7. Диалоговое окно ввода данных нелинейной кривой  $B-H$  стали М-27

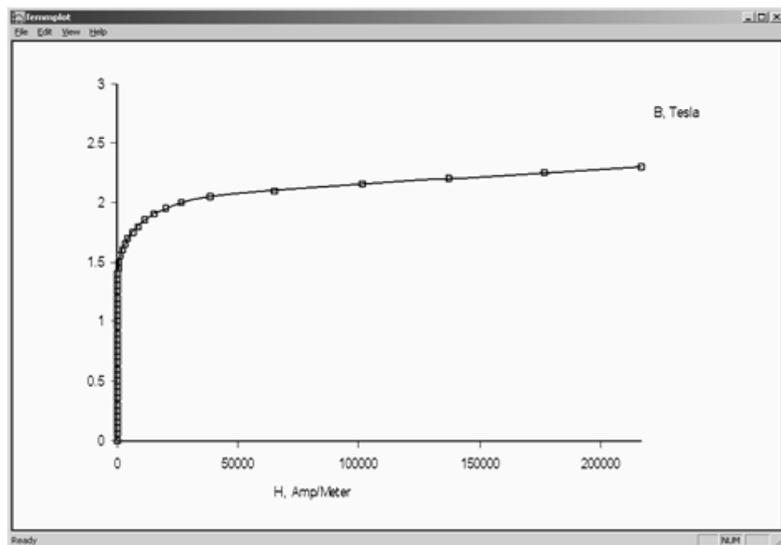


Рис. 3.8. Кривая намагничивания стали М-27

Поле *Source Current Density* (Плотность стороннего тока) предназначено для ввода действительной и мнимой составляющих плотности тока, если в материале выделенного блока протекает ток стороннего источника питания.

Группа свойств – *Special Attributes: Lamination & Wire Type* (Специальные свойства: шихтовка и тип провода). Если материал состоит из изолированных пластин (например, в трансформаторе), то выпадающий список этого поля используется для обозначения направления, в котором он разбит на пластины (рис. 3.9).

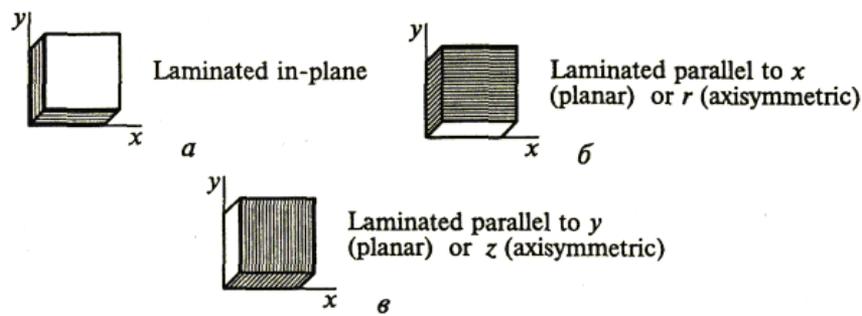


Рис. 3.9. Различные типы ориентации пластин: *a* – пластины параллельны плоскости  $xy$ , *б* – пластины параллельны только оси  $x$  при плоскопараллельном поле или оси  $z$  при осесимметричном; *в* – пластины параллельны только оси  $y$  при плоскопараллельном поле или оси  $z$  при осесимметричном поле

Если выбран какой-то тип разбивки на листы, то становятся активными поля *Lam thickness, mm* (Толщина листа) и *Lam fill factor* (Коэффициент заполнения стали). Эти данные позволяют учесть гистерезис и вихревые токи при расчете переменных полей.

В поле *Lam thickness, mm* следует подставить толщину одного листа без изоляции из набора. Если материал не из пластин, это поле неактивно. Коэффициент заполнения стали (*Lam fill factor*) в FEMM равен отношению площади поперечного сечения только стали магнитопровода к полной площади поперечного сечения магнитопровода, включающей и площади изоляционных промежутков между пластинами. Таким образом, коэффициент заполнения меньше единицы.

Если в поле *Special Attributes: Lamination & Wire Type* выбран тип провода, то становятся активными поля "Диаметр жилы" (*Strand dia*) и/или "Число жил" (*Number of strands*). Если выбран *Magnet wire* (Магнитопровод из магнитного материала) или *Square wire* (Прямоугольный проводник), то может быть только одна жила и поэтому по-

ле *Number of strands* неактивно. При этом в поле *Strand dia* вводится диаметр (или ширина) провода (без учета толщины изоляции). Для многожильного провода надо вводить число жил и диаметр жилы.

Каждый виток отдельно может не моделироваться. Программа будет автоматически учитывать изоляционные промежутки между витками. Однако если пользователь задает размеры площади поперечного сечения обмотки, число витков и диаметр провода, то он сам должен рассчитать коэффициент заполнения обмотки и убедиться в том, что выбранный провод войдет в заданное окно.

### 3.7. Ввод граничных условий

Область пространства, в пределах которой производятся расчеты, необходимо ограничить. Для этого щелкнуть строку *Boundaries* (Границы) пункта *Properties* главного меню – возникнет уже описанное окно *Property Definition* (см. рис. 3.5). Щелкнуть кнопку *Add Property* (или *Modify Property*) – появится окно *Boundary Property* (Свойство границы) (рис. 3.10).

The image shows a dialog box titled "Boundary Property". It contains the following fields and controls:

- Name:** A text input field containing "New Boundary".
- BC Type:** A dropdown menu currently set to "Prescribed A".
- Small skin depth parameters:**
  - $\mu$ , relative: Input field with "0".
  - $\sigma$ , MS/m: Input field with "0".
- Mixed BC parameters:**
  - $c_0$  coefficient: Input field with "0".
  - $c_1$  coefficient: Input field with "0".
- Prescribed A parameters:**
  - $A_0$ : Input field with "0".
  - $A_1$ : Input field with "0".
  - $A_2$ : Input field with "0".
  - $\phi$ , deg: Input field with "0".
- Buttons:** "OK" and "Cancel" buttons are located on the right side of the dialog.

Рис. 3.10. Диалоговое окно ввода граничных условий

В верхнее поле *Name* ввести имя, которое будет присвоено границе. Далее для этого участка границы модели ввести *BC Type* (Тип границы) и для выбранного типа в одной из трех соответствующих

рамок уточнить параметры условий на границе расчётов. Аналогично ввести граничные условия для всех остальных участков модели.

Самые распространенные границы магнитных полей – границы, которым магнитный поток параллелен (условия Дирихле), и границы, к которым поток перпендикулярен (условия Неймана). На первой векторный потенциал  $A = \text{const}$  чаще всего принимается равным нулю, поэтому в диалоге *Boundary Property* (см. рис. 3.10) следует выбрать *BC Type* (Тип граничного условия) *Prescribed A* (Предписанное  $A$ ) и коэффициенты  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  внутри прямоугольника с заголовком *Prescribed A parameters* оставить нулевыми. Вдоль вертикальной оси  $z$  плоскомеридианных магнитных систем условие  $A = 0$  выполняется по умолчанию, поэтому его вдоль этой оси можно специально не вводить.

Второй распространенный тип границы – с потоком, перпендикулярным границе, – можно установить в том же диалоге *Boundary Property*, выбрав тип граничного условия *Mixed* (Смешанный) и в прямоугольнике *Mixed BC parameters* (Параметры смешанных граничных условий) установив нули (0) в полях *c<sub>0</sub> coefficient* и *c<sub>1</sub> coefficient*.

Кроме упомянутых уже *Prescribed A* и *Mixed* граничных условий, ФЕММ располагает еще следующими типами границ: *Small Skin Depth* (Малая глубина проникновения), *Strategic Dual Image (SDI)* (Стратегия двух изображений), *Periodic* (Периодические) и *Antiperiodic* (Антипериодические).

Для того чтобы связать участок наружной границы с конкретным именем и свойствами выбранных ранее типов границ, необходимо щелкнуть кнопкой для работы в режиме прямых или кнопкой для работы в режиме дуг.

Щелкнуть правой кнопкой мыши какой-либо участок границы модели в виде отрезка прямой линии или дуги – его цвет изменится на красный. Нажать и отпустить клавишу пробела – на экране возникнет диалог *Segment Property*. В его верхнем поле выбрать из списка имя, которому должен быть поставлен в соответствие выделенный участок границы.

Значения остальных элементов рассматриваемого диалога – ноль по умолчанию в поле *Local element size along line* (Размер конечного элемента вдоль линии) и включенный по умолчанию переключатель *Chose mesh spacing automatically* (Выбор автоматического построения сетки) без особой необходимости можно не изменять. Если переключатель *Chose mesh spacing automatically* отмечен, то ноль в поле *Local element size along line* устанавливается автоматически. При этом разбивка на конечные элементы (треугольники) области, прилегающей к

линии, осуществляется по размерам треугольников, введенных в том блоке, стороной которого является выделенная линия.

Если снять галочку в переключателе *Chose mesh spacing automatically*, то от цифры, введенной в поле *Local element size along line*, может зависеть размер элементов сетки рядом с выделенным отрезком границы. При цифре, большей, чем у смежного блока, сетка возле линии будет в основном определяться размером сетки смежного блока. Если цифра меньше, чем у смежного блока, то возле линии создастся более густая сетка, чем сетка смежного блока, размер которой был задан в поле *Mesh size* диалога *Properties for selected block*.

После щелчка ОК диалог *Segment Property* с экрана монитора пропадет, а красный цвет выбранной линии превратится в синий.

После ввода свойств всех блоков и границ области расчётов необходимо сохранить созданную модель со своим именем через *File -> Save* главного меню.

### 3.8. Построение сетки конечных элементов и расчет модели

Чтобы увидеть сетку конечных элементов на экране (рис. 3.11), необходимо щелкнуть на кнопке с изображением квадрата желтого цвета (девятая слева в строке пиктограмм), состоящего из четырех квадратов, каждый из которых разбит диагональю на два треугольника.

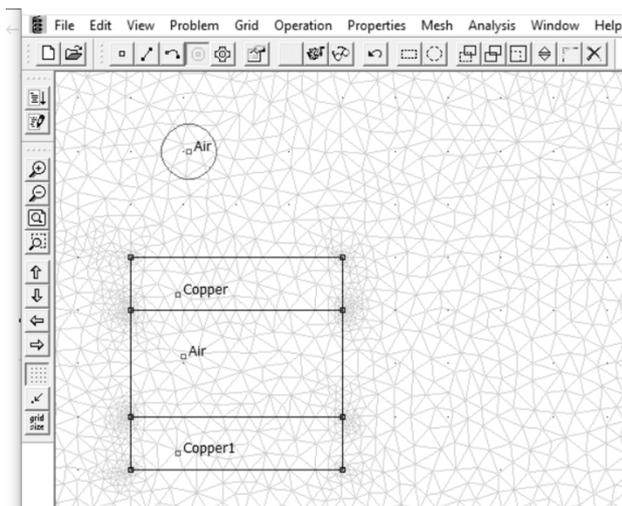


Рис. 3.11. Окно программы с сеткой конечных элементов

После просмотра сетку конечных элементов следует удалить с экрана, так как она занимает значительный объем памяти компьютера. Чтобы удалить изображение сетки с экрана, щелкнуть в главном меню *Mesh* -» *Purge Mesh* (Удалить сеть).

Для расчета магнитного поля созданной модели щелкнуть кнопкой *Run analysis* (десятая слева в строке пиктограмм на рис. 3.11). На этой кнопке изображено зубчатое колесо с ручным приводом.

### 3.9. Представление результатов расчёта магнитного поля

После окончания расчетов можно проанализировать результаты. Для визуализации результатов и построения графиков предназначен постпроцессор.

Запуск постпроцессора осуществляется кнопкой  *View Results* (Просмотр результатов). Это одиннадцатая слева кнопка в строке на рис. 3.11, на которой изображены очки. После нажатия кнопки программа FEMM переходит в режим просмотра (рис. 3.12), в котором строка меню и строка пиктограмм частично изменяются. Появляются новые инструменты. Файл, созданный для визуализации результатов расчёта, автоматически сохраняется с расширением *.ans*.

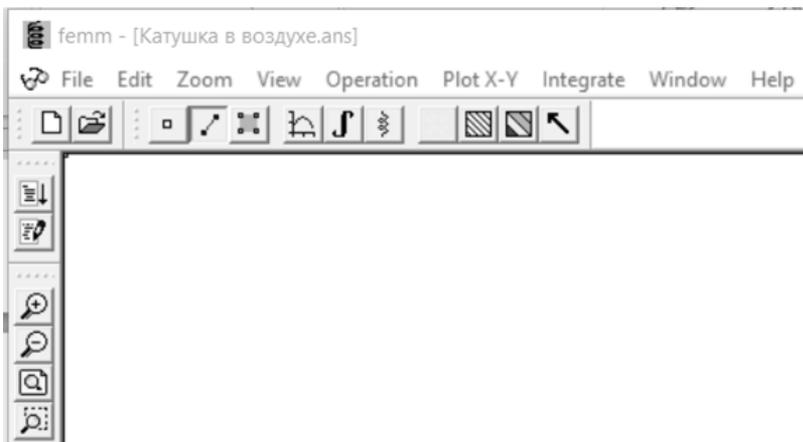


Рис. 3.12. Окно программы после вызова постпроцессора

В программе FEMM предусмотрены три способа представления картины магнитного поля: силовые линии поля, график интенсивности (зонная картина поля) и векторное поле.

**Силовые линии магнитного поля** включаются кнопкой  (третья справа кнопка в строке пиктограмм на рис. 3.12). При нажатии этой кнопки откроется окно *Dialog* (рис. 3.13), позволяющее включить отображение силовых линий путем установки флажка напротив надписи *Show flux lines*. Силовые линии строятся таким образом, чтобы магнитный поток, рассчитанный для участка перпендикулярной поверхности между двумя соседними силовыми линиями, был одинаков в любом месте. Пространство между силовыми линиями называют трубкой магнитного потока.

Окно *Dialog* позволяет установить число силовых линий (от 4 до 999) в поле *Numbers of contours* (Число контуров) и пределы изменения магнитной индукции (*Lower Bound* и *Upper Bound*), в которых рассчитываются эти линии. По умолчанию в эти поля заносятся минимальное и максимальное значения, полученные при расчёте.

В качестве примера на рис. 3.14 показаны силовые линии магнитного поля катушки с током.

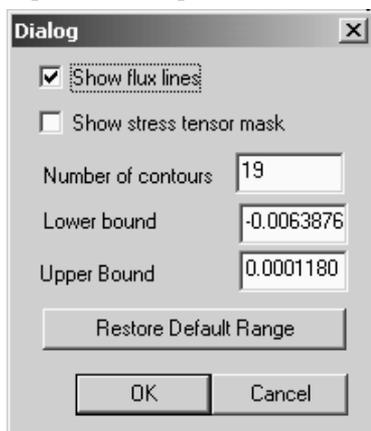


Рис. 3.13. Настройка показа силовых линий магнитного поля

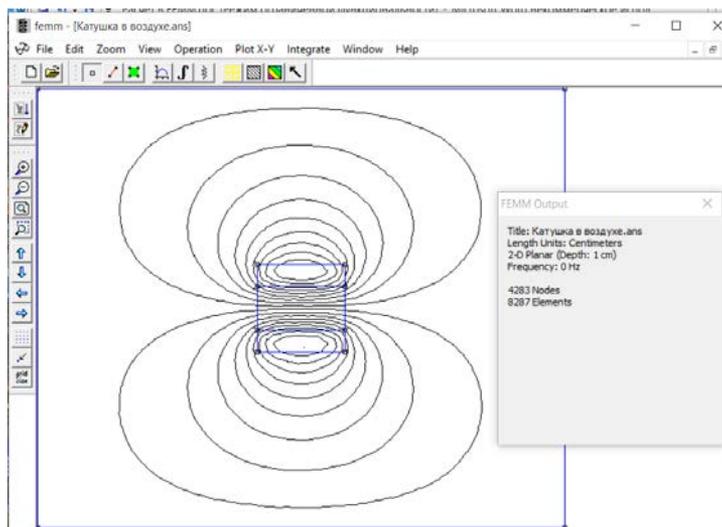


Рис. 3.14. Окно программы в режиме просмотра силовых линий

**График интенсивности** (зонная картина поля) представляет магнитное поле в виде зон с разной окраской. По цвету зоны можно судить о значении магнитной индукции. Включается кнопкой

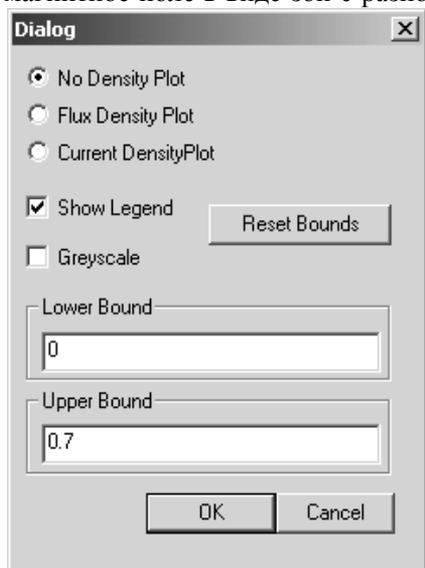


Рис. 3.15. Окно настроек зонной картины поля

те расчётов, делится на 20 частей. По желанию пользователя на 20 частей можно разделить любой промежуток, указанный между *Lower Bound* и *Upper Bound*. Чтобы вновь вернуться к изображению всего диапазона изменения индукции, надо щелкнуть кнопкой *Reset Bounds* (Переустановить границы).

В качестве примера на рис. 3.16 приведен график интенсивности магнитного поля катушки с током, а также окно легенды с указанием диапазона изменения магнитной индукции для каждого цвета.

**Векторное поле** – третий тип картины поля можно получить в программе FEMM, если в постпроцессоре щелкнуть кнопкой с пиктограммой в виде черной жирной стрелки . Это первая справа кнопка в строке пиктограмм на рис. 3.16. На экране возникнет диалог *Vector Plot Options* (Опции графика векторного поля) (рис. 3.17). Параметр, для которого будет построено поле, можно установить путем прокрутки списка в поле *Vector Plot Type* (Тип графика векторного поля) этого диалога.

Включается кнопкой  (вторая справа в строке пиктограмм на рис.3.14). При нажатии этой кнопки откроется окно *Dialog* (рис. 3.15).

Переключатели *No density plot* (Скрыть график плотности) и *Flux density plot* позволяют скрыть или показать цветное поле распределения магнитной индукции, а переключатель *Show Legend* (Показать легенду) – показать или скрыть специальное окно, в котором для каждого цвета указан диапазон изменения магнитной индукции.

По умолчанию весь диапазон изменения магнитной индукции, полученный в результа-

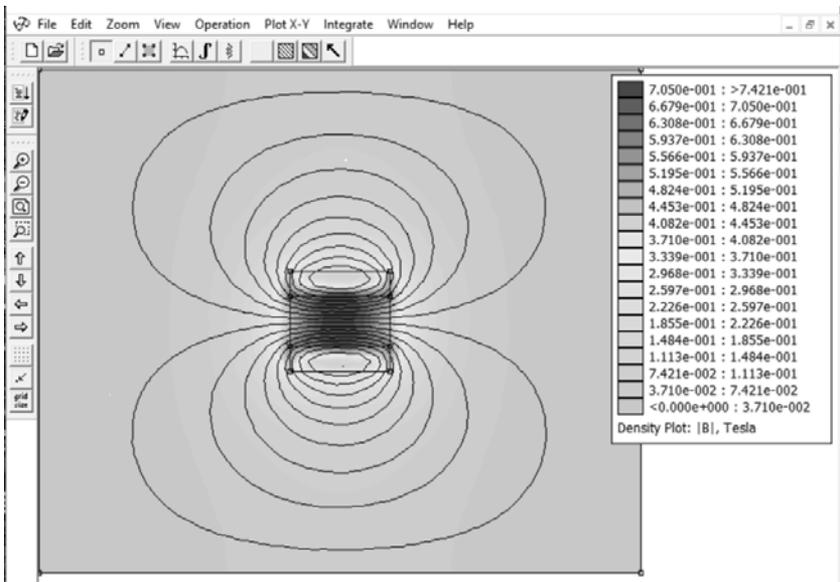


Рис. 3.16. График интенсивности магнитного поля катушки с током

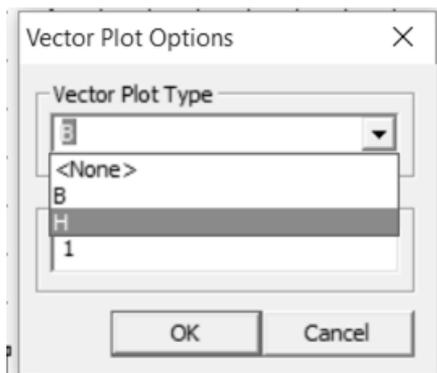


Рис. 3.17. Окно настроек векторного отображения поля

В списке три строки: None – векторы не отображаются, В – отображаются векторы магнитной индукции, Н – отображаются векторы напряженности магнитного поля.

После нажатия ОК поле представится в виде стрелок (рис. 3.18), которые начинаются в узловых точках сетки привязки (grid). Длина стержня стрелки и размер её наконечника пропорциональны величине выбранного параметра магнитного поля. Направление стрелки характеризует направление изображаемой величины в точке, в которой эта стрелка начинается. Количество стрелок-векторов на ней можно изменить, меняя шаг сетки привязки в диалоге *Grid Properties* (Свойства сетки), который вызывается из основного меню *Grid -> Set grid*.

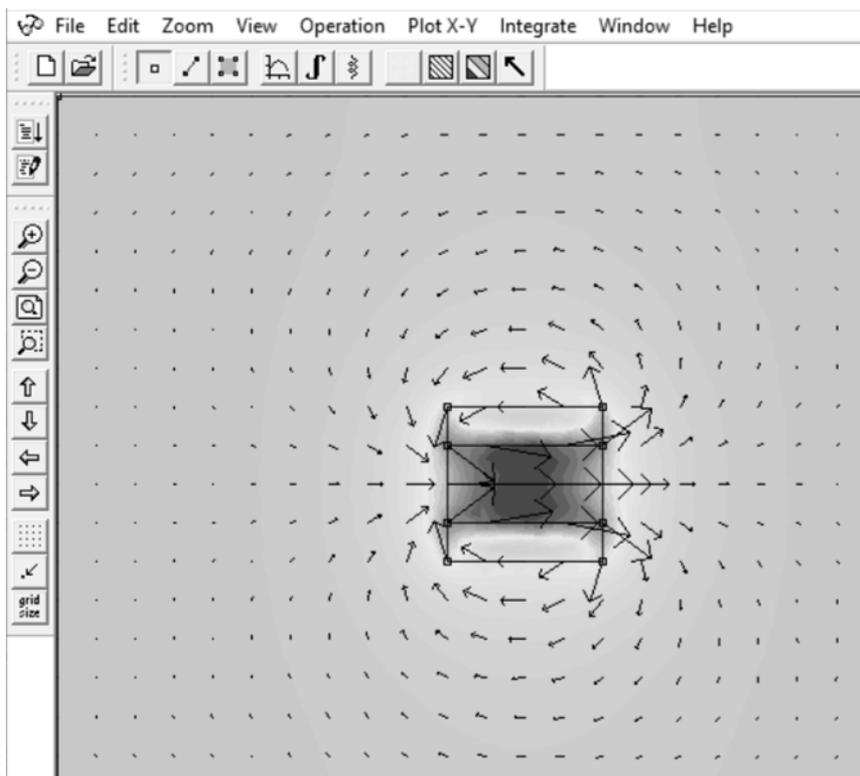


Рис. 3.18. Векторное поле катушки с током

Все три способа представления картины магнитного поля могут включаться по очереди, одновременно или в различных сочетаниях.

### 3.10. Построение графиков, обработка результатов

Вывести на экран расчетные данные и построить графики можно в режиме постпроцессора, т.е. только после расчета модели и нажатии кнопки  или после загрузки результатов предыдущего расчёта, записанных в файле с расширением \*.ans.

**Просмотр параметров поля в произвольной точке.** Щелкнуть кнопкой с изображением маленького квадрата – . (рис. 3.19).

Вызвать окно *FEMM Output* с помощью *View -> Output Window* главного меню. Навести курсор в нужную точку модели (в нижнем левом углу окна FEMM отображаются текущие координаты курсора) и нажать левую кнопку мыши.

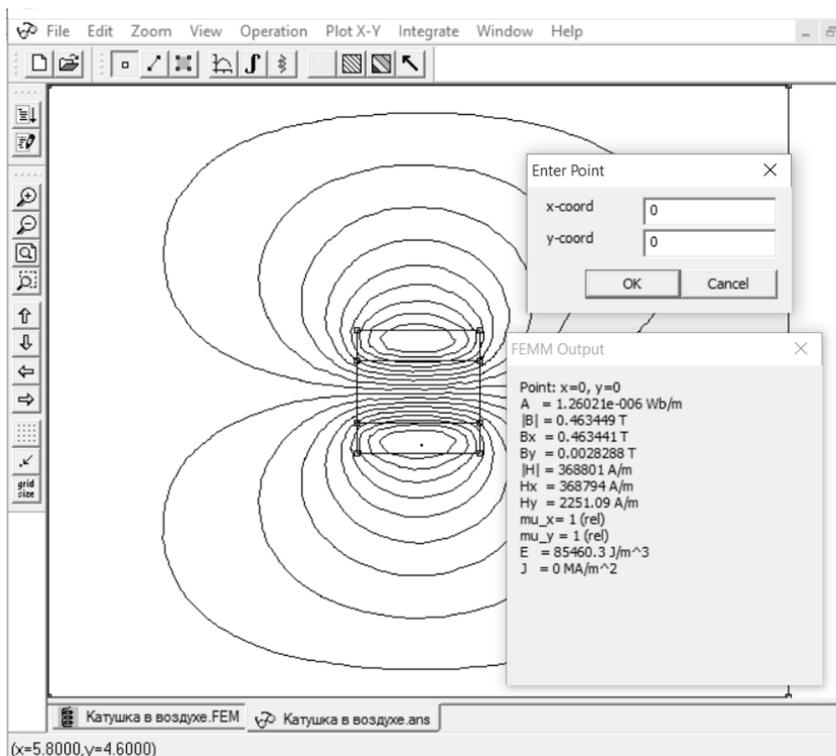


Рис. 3.19. Просмотр параметров поля в заданной точке

В окне *FEMM Output* появятся координаты точки поля и соответствующие ей значения магнитного потенциала  $A$ , модулей векторов магнитной индукции  $B$  и напряженности магнитного поля  $H$ , а также их проекции на горизонтальную и вертикальную оси.

Можно сразу задать координаты точки при помощи окна *Enter Point* (Ввод точки). Для этого нажать и отпустить клавишу [Tab]. Установить в полях x-tab и y-tab требуемые значения координат и нажать ОК. В окне *FEMM Output* появятся значения параметров магнитного поля в этой точке.

**Построение графиков.** Щелкнуть кнопкой с изображением линии –  (рис. 3.20).

Щелкнуть на модели правой кнопкой мыши точку одного конца предполагаемой линии – появится красный крестик, потом точку другого ее конца – на экране возникнет отрезок прямой красного цвета. Можно дополнительными щелчками добавить к ней еще прямые – сделать линию ломаной и даже замкнутой.

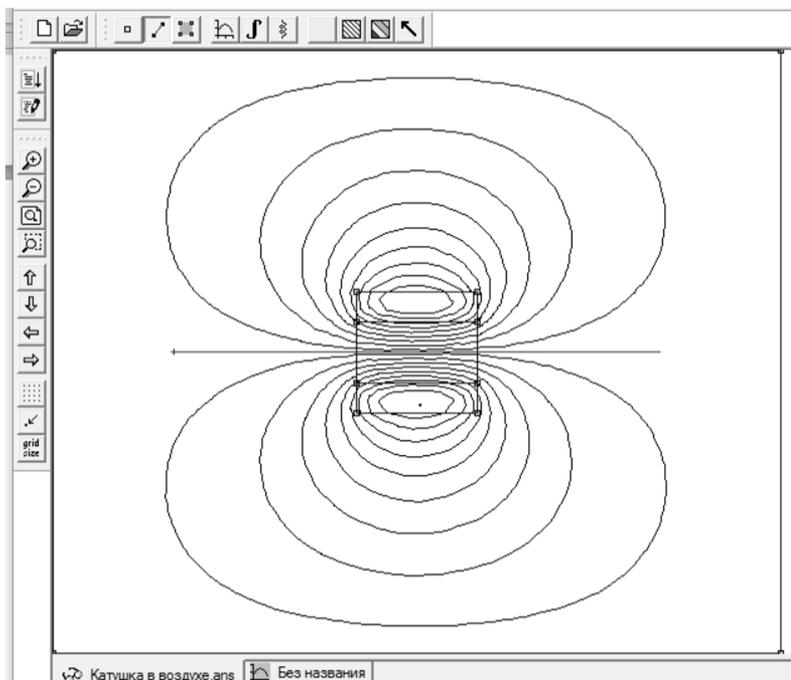


Рис. 3.20. Ввод линии для построения графика

Щелкнуть на панели инструментов кнопкой с изображением графика – .

Появится окно *X-Y Plot of Field Values* (График полевых параметров в прямоугольной системе координат) (рис. 3.21). Оно позволяет выбрать из выпадающего списка один из параметров магнитного поля и количество точек графика.

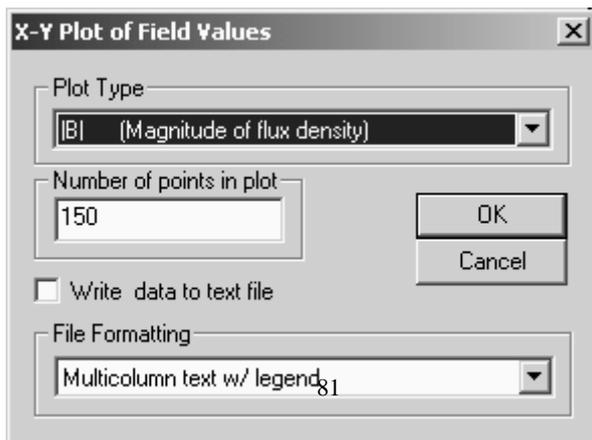


Рис. 3.21. Ввод линии для построения графика

После нажатия ОК в отдельном окне появится график изменения выбранного параметра вдоль введенной линии (рис. 3.22).

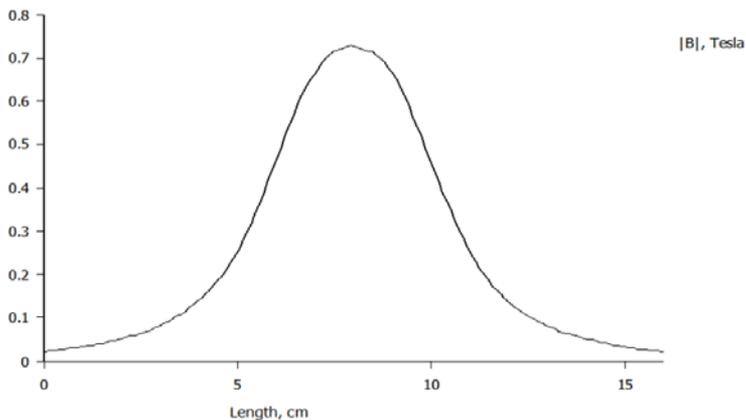


Рис. 3.22. График изменения модуля  $B$  вдоль выбранной линии

***Расчет интегральных характеристик вдоль линии (контура).***

После ввода линии щелкнуть кнопку с изображением интеграла – . На экране возникнет окно *Line Integrals* (Интегралы вдоль линии), позволяющее пользователю путем интегрирования вдоль введенного контура рассчитать (независимо от типа поля) любую из величин, выбранных из списка. Например, при выборе нормальной составляющей  $B_n$  после нажатия ОК появится окно *Integral Result* (Результат интегрирования) со значениями *Normal flux* (магнитного потока через контур) и *Average  $B_n$*  (среднего значения нормальной составляющей магнитной индукции в пределах контура) (рис. 3.23).

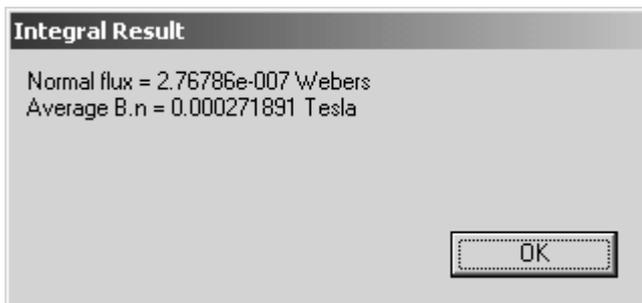


Рис. 3.23 Окно результатов интегрирования после выбора Вп

Программа FEMM позволяет рассчитать:

- магнитное напряжение на контуре;
- среднее значение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля контура;
- длину контура;
- составляющие электромагнитных сил, действующих на контур по осям координат;
- вращающий электромагнитный момент (относительно начала координат), действующий на контур;
- квадрат полного магнитного потока, нормальной контуру, и среднее на длине контура значение квадрата нормальной контуру магнитной индукции.

**Расчет параметров блока.** Щелкнуть кнопкой панели инструментов, имеющей вид зеленого квадрата с четырьмя маленькими квадратиками по углам – . При этом программа входит в режим *Define areas over which integration can be performed* (Назначение площади, по которой может быть выполнено интегрирование), в котором возможны расчеты параметров поля, связанных с площадью и объемом. Площадь, которая далее будет использоваться в расчетах, представляет собой наружную поверхность любого блока, созданного в процессе построения модели.

Щелкнуть любую точку внутри блока, параметры которого интересуют, при этом вся его площадь окрасится в зеленый цвет. Это означает, что блок выделен и можно проводить нижеописанные действия.

Щелкнуть кнопкой с изображением интеграла – на экране возникнет окно *Block Integrals* (Интегралы по площади блока), позволяющее рассчитать следующие величины: магнитный потенциал, энер-

гию магнитного поля, плотность тока, общий ток, потери в активном сопротивлении, потери на гистерезис, вихревые токи в магнитопроводе из пластин или за счет эффекта близости, суммарные потери, площадь и объем выделенного блока, интеграл магнитной индукции по площади блока, силы Ампера, приложенные к блоку, момент силы и момент инерции применительно к деталям магнитной системы, а также статическую индуктивность катушек с учетом их размеров и свойств материалов магнитной системы.

Результат расчета выводится в информационном окне, которое открывается на экране после выбора необходимой физической величины в выпадающем списке окна *Block Integrals* и щелчка ОК.

Можно рассчитать силу, приложенную к группе блоков. Для этого необходимо выделить блоки, на которые эта сила действует, вызвать окно *Block Integrals* и выбрать строку *Force via Weighted Stress Tensor* выпадающего списка.

## **4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНДУКЦИОННОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ**

### **4.1. Определение входных и выходных параметров ИЛС**

В задачи проектирования входит определение конструктивных, электрических и магнитных параметров катушек, обеспечивающих наибольшую их эффективность.

Показателем эффективности передающей катушки (ПК) как источника магнитного поля принято считать наибольший магнитный момент при минимальных габаритах и затрачиваемой мощности. Для приёмной катушки (ПрК) показателем эффективности является достижение наибольшей чувствительности при наименьших габаритах.

Исходные данные для проектирования: назначение ИЛС, дистанция индукционной связи, взаимная ориентация ПК и ПрК, рабочая частота, минимальный уровень сигнала на выходе ПрК.

### **4.2. Расчет передающей катушки**

ПК представляет собой многовитковую катушку на разомкнутом ферромагнитном сердечнике, например, цилиндрической или призматической формы.

*Интенсивность создаваемого внешнего магнитного поля* определяет магнитный момент катушки.

Магнитный момент  $P_m$  передающей катушки со стержневым ферромагнитным сердечником (рис. 4.1) создается обмоткой и сердечником:

$$P_i = \mathcal{E}_{io} + \mathcal{E}_{in} = \mu_n I W S_n + \frac{1}{\mu_o} \hat{A} \cdot V_n, \quad (4.1)$$

где  $I$  – ток в катушке;  $W$  – количество витков ПК;  $B$  – магнитная индукция;  $S_c$  – площадь сечения сердечника;  $V_c$  – объем сердечника.

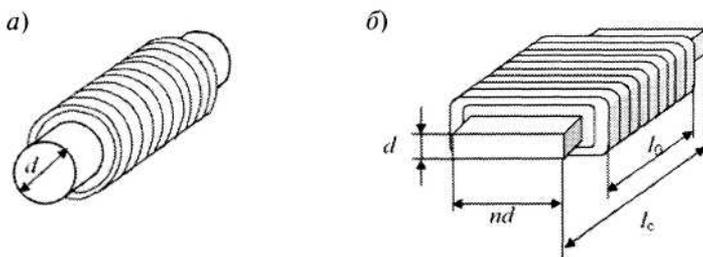


Рис. 4.1. Катушки с ферромагнитным сердечником: цилиндрическим (а) и призматическим (б)

Из (4.1) следует, что магнитный момент ПК пропорционален току в катушке, количеству витков и размерам сердечника.

Относительная магнитная проницаемость сердечника  $\mu_c$  определяется с учетом абсолютной магнитной проницаемости материала  $\mu$  и проницаемости формы  $m$ :

$$\mu_n = \frac{\mu \delta}{\mu + \delta}. \quad (4.2)$$

Проницаемость формы – величина, обратная фактору размагничивания  $m=N^{-1}$ . Она определяется, главным образом, удлинением сердечника, т.е. его относительной длиной. Зависимости для различных вариантов сердечника могут быть найдены в литературе.

Магнитный момент ПК позволяет рассчитать электромагнитное поле вокруг катушки. Формулы для расчета проекций (составляющих) векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  в сферических координатах:

$$H_r = P_i \frac{2 \cos \theta}{4\pi r^3} (1 - jkr) \exp(jkr),$$

$$H_{\theta} = P_1 \frac{\sin \theta}{4\pi r^3} (1 - jkr - k^2 r^2) \exp(jkr), \quad (4.3)$$

$$E_{\varphi} = P_1 \frac{\sin \theta}{4\pi r^2} j\omega \mu_a (1 - jkr) \exp(jkr).$$

При проектировании ПК следует определить конструктивные и электрические параметры, обеспечивающие требуемую величину магнитного момента при минимальной затрачиваемой мощности. Мощность расходуется на нагрев обмотки и сердечника, на потери в окружающей среде и элементах конструкции.

*Мощность на нагрев обмотки*, имеющей активное сопротивление  $R$ :

$$P_o = I^2 R. \quad (4.4)$$

Эту мощность следует выразить через величину магнитного момента. Для этого введем допустимую плотность тока  $J_{\max}$  в проводе обмотки и его удельную электропроводность  $\sigma$ . Используя формулы (4.1) и (4.4), получим мощность нагрева обмотки:

$$P_o = \frac{P_1 J_{\max}}{\sigma \mu_c S_c} l_1 = \frac{\hat{A}_{\text{эф}} J_{\max}}{\sigma \mu_o \mu_c} l_1 \cdot l_c, \quad (4.5)$$

где  $l_1$  — средняя длина витка обмотки;  $l_c$  — длина сердечника;  $B_{\text{доп}}$  — допустимая магнитная индукция в материале сердечника;  $\sigma$  — удельная электропроводность провода (для меди  $\sigma = 57 \cdot 10^6$  См/м). Плотность тока  $J_{\max}$  в зависимости от условий охлаждения принимается равной  $(2 \div 5) \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>.

Минимизации потребляемой мощности в обмотке можно достичь как увеличением проницаемости сердечника  $\mu_c$ , так и уменьшением плотности тока в обмотке, что влечет увеличение ее габаритов.

*Мощность потерь в сердечнике*  $P_c$  может вычисляться несколькими методами: через удельную мощность потерь  $P_{\text{уд}}$  данного материала, через тангенс угла потерь  $\delta_c$  в материале сердечника, через добротность  $Q_c$  сердечника.

Удельная мощность потерь для электротехнических сталей

$$P_{\text{оа}} = \frac{B^2 \omega}{\mu_o \mu \gamma}, \quad (4.6)$$

где  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость материала;  $\gamma$  — массовая плотность материала [кг/м<sup>3</sup>].

Полная мощность потерь в сердечнике, выраженная через удельную мощность:

$$P_c = P_{\text{дл}} V_c \gamma. \quad (4.7)$$

Мощность потерь в сердечнике, выраженная через тангенс угла потерь  $\delta_c$  в материале сердечника, определяется исходя из соотношений активной и реактивной мощности. Магнитная энергия в объеме сердечника  $V_c$  равна  $BHV_c$ , реактивная мощность  $BEV_c\omega$ . Активная мощность потерь переменного перемагничивания сердечника:

$$P_c = BHV_c\omega \operatorname{tg} \delta_c. \quad (4.8)$$

Используя связь для  $B$  и  $H$ :  $B = \mu_0 \mu_c H$ , получим выражение мощности потерь в сердечнике через допустимую величину магнитной индукции  $B$ :

$$P_c = \frac{B^2 V_c \omega}{\mu_0 \mu_c} \operatorname{tg} \delta_c. \quad (4.9)$$

С учетом (4.9) выразим мощность потерь через заданное значение магнитного момента  $P_m$ :

$$P_{\text{п}} = \frac{P_1^2 \mu_1 \omega}{V_c \mu_c} \operatorname{tg} \delta_c = \frac{P_1^2 \mu_1 \omega}{\mu_c V_c Q_c}. \quad (4.10)$$

*Добротность сердечника*  $Q_c$  есть обратная величина тангенса угла потерь. (Значения этого показателя приводятся в справочниках по магнитным материалам.)

Излучающая катушка может быть включена в контур, настроенный в резонанс на рабочую частоту  $\omega$ . Конденсатор контура  $C_k$  обладает ограниченной добротностью ( $Q_k = 80 \div 100$ ). Мощность активных потерь в конденсаторе:

$$P_{\text{к}} = \frac{C_{\text{к}} U^2 \omega}{2Q_{\text{к}}}. \quad (4.11)$$

*Полная мощность*, потребляемая излучающим контуром на создание магнитного момента  $P_m$ , складывается из всех рассчитанных выше составляющих мощности и может быть определена через общую добротность  $Q$  излучающего контура:

$$P = \frac{P_1^2 \mu_1 \omega}{\mu_c V_c Q} = \frac{B^2 \omega V_c}{\mu_1 \mu_c Q}. \quad (4.12)$$

Общая добротность излучающего контура:

$$Q = Q_c \frac{P_c}{P_c + P_i + P_e}. \quad (4.13)$$

Уменьшение магнитной индукции  $B$  в сердечнике для обеспечения требуемой величины магнитного момента  $P_m$  ведет к увеличению объема сердечника и всего объема излучающей антенны. Форма сердечника должна максимизировать произведение  $\mu_c V_c$ .

*Эффективность излучателя магнитного типа* может быть оценена отношением, которое с учетом (4.5) и (4.13) имеет вид

$$\frac{P_i}{P} = \frac{\mu_c Q}{B \omega} \quad (4.14)$$

и должно быть максимальным. Максимизация  $\mu_c$  определяется оптимальной формой сердечника.

Максимальная добротность ограничивается полосой пропускания  $\Delta\omega$  излучающего контура ( $\Delta\omega = \omega Q^{-1}$ ) и должна учитывать нестабильность частоты генератора и частоты настройки резонансного контура. С учетом этого можно записать (4.14) следующим образом:

$$\frac{P_i}{P} = \frac{\mu_c}{B \Delta\omega}. \quad (4.15)$$

При минимизации  $\Delta\omega$  уменьшение магнитной индукции  $B$  приводит к увеличению габаритов излучателя. Поэтому следует максимизировать  $\mu_c$ , т.е. максимизировать проницаемость формы сердечника.

Также критерием эффективности излучателя может служить отношение

$$\frac{P_i^2}{P} = \frac{\mu_c V_c}{\mu_i \Delta\omega} = \frac{\mu_c V_c Q}{\mu_i \omega}.$$

Напряжение на передающей катушке  $U$  является одним из существенных ограничивающих параметров излучающего контура. Это ограничение определяет число витков

$$W = \frac{U}{B \omega S_c} = \frac{U l_c}{P_i \omega \mu_i}, \quad (4.16)$$

которое вычисляется через индукцию или магнитный момент. Увеличение длины сердечника  $l_c$ , как и уменьшение площади сечения  $S_c$ , снижает напряжение  $U$  на передающей катушке.

Сила тока в обмотке катушки:

$$I = \frac{P_i}{\mu_c S_c W} = \frac{Bl_c}{\mu_i \mu_c W} \quad \text{или} \quad I = \frac{P_i^2 \omega \mu_i}{\mu_c U V_c} = \frac{B^2 \omega V_c}{\mu_i \mu_c U}. \quad (4.17)$$

Зная силу тока  $I$  и принятую плотность тока  $J_{\max}$ , можно найти диаметр провода  $d$ , а также число слоев  $N$  в обмотке:

$$d = 2 \sqrt{\frac{I}{\pi J_{\max}}}; \quad N = \frac{W}{2l_i} \sqrt{\frac{\pi I}{J_{\max}}}. \quad (4.18)$$

### 4.3. Расчет приёмной катушки с сердечником

Приёмная катушка как магнитная антенна индукционного типа служит для приема низкочастотного электромагнитного поля. Она также представляет собой индукционную катушку с ферромагнитным сердечником конечной длины. По закону Фарадея ЭДС электромагнитной индукции в приёмной катушке

$$\varepsilon_{i0} = -\frac{\partial \hat{O}_{i0}}{\partial t} = -\mu_{\text{ан}} W_{i0} S_{i0} \frac{\partial H}{\partial t} = i \mu_{\text{ан}} W_{i0} S_{i0} \omega H, \quad (4.19)$$

где  $\mu_{\text{ас}} = \mu_0 \mu_c$  – абсолютная магнитная проницаемость сердечника с учетом проницаемостей его формы и материала;  $S_{\text{пр}}$  – площадь сечения сердечника ПрК;  $W_{\text{пр}}$  – число витков ПрК.

*Чувствительность приёмной катушки.* Преобразование напряженности  $H$  электромагнитного поля в электрический сигнал происходит с коэффициентом, определяющим чувствительность приёмной катушки. В режиме холостого хода чувствительность ПрК как отношение амплитуды ЭДС к амплитуде напряженности  $H$  определяется равенством

$$g_i = \mu_i \mu_c W S \omega. \quad (4.20)$$

Относительная магнитная проницаемость  $\mu_c$  разомкнутого ферромагнитного сердечника определяется с учетом проницаемости формы (4.2).

Формула (4.20) определяет чувствительность индукционной приёмной катушки при условии, что материал ферромагнитного сердечника не обладает электропроводностью. Реальные материалы, ферриты в том числе, имеют конечную удельную электрическую проводимость  $\sigma$ , следствием чего является наличие в сердечнике вихревых токов, магнитное поле которых снижает чувствительность приёмной катушки.

*ЭДС индукции с учетом электропроводности сердечника:*

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\sigma} W \zeta \frac{J_1(\zeta)}{J_0(\zeta)} \dot{I} , \quad (4.21)$$

где  $\zeta = a\sqrt{i\mu_a\sigma\omega}$ ;  $a$  – радиус сердечника;  $J_0(\zeta)$  и  $J_1(\zeta)$  – цилиндрические функции Бесселя нулевого и первого порядка от комплексного аргумента.

На низких частотах при  $\zeta \ll 1$  Функции Бесселя  $J_0(\zeta) \rightarrow 1$ ,  $J_1(\zeta) \rightarrow \zeta/2$ , тогда

$$\varepsilon_0 = \frac{\pi W \zeta^2}{\sigma} H = j\pi a^2 \mu_a \omega H . \quad (4.22)$$

Выражение совпадает с (4.19). Следовательно, на частотах  $\omega < (a^2 \mu_a \sigma)^{-1}$  при расчете чувствительности можно не учитывать влияние электропроводности материала сердечника. При этом ЭДС отличается по фазе от магнитной напряженности воспринимаемого поля на  $90^\circ$  и прямо пропорциональна частоте.

На высоких частотах при  $\zeta \gg 1$  отношение функций Бесселя в (4.21) стремится к  $-i$ , в этом случае ЭДС

$$\varepsilon = \frac{2\pi a W \sqrt{\mu_a \omega}}{\sigma} H e^{-i\frac{\pi}{4}} . \quad (4.23)$$

Таким образом, ЭДС пропорциональна частоте в степени 0,5 и отличается по фазе от магнитной напряженности воспринимаемого поля на  $45^\circ$ .

Отношение формул (4.21) и (4.23) показывает *снижение чувствительности приёмной антенны, обусловленное вихревыми токами в сердечнике*:

$$F_2(\zeta) = \frac{2J_1(\zeta)}{\zeta J_0(\zeta)} . \quad (4.24)$$

С увеличением частоты  $\omega$ , электропроводности  $\sigma$ , магнитной проницаемости  $\mu_a$  материала сердечника и его радиуса  $a$  чувствительность приёмных катушек существенно уменьшается, а фазовые сдвиги становятся меньше  $90^\circ$ .

*Импеданс приёмной катушки.* Вихревые токи в сердечнике катушки влияют также на собственный импеданс последней. Импеданс ПрК с реальным сердечником может быть рассчитан по формуле

$$Z_\omega = \frac{2\pi W^2 \zeta J_1(\zeta)}{\sigma l J_0(\zeta)} . \quad (4.25)$$

Формулы расчета чувствительности и импеданса справедливы на всех частотах ниже собственного резонанса катушки с ее межвитковой ёмкостью. Поскольку рабочая частота должна быть ниже частоты собственного резонанса катушки, то данное условие ограничивает ее индуктивность и число витков.

*Резонансная чувствительность* ПрК. По условию настройки приёмного контура в резонанс на рабочую частоту  $\omega$ , значительно меньшую собственной резонансной, получим формулу оценки чувствительности приёмной катушки (без учета вихревых токов в сердечнике):

$$g_0 = \sqrt{\frac{\mu_o \mu_c V_c}{C_{\hat{e}}}}, \quad (4.26)$$

где  $V_c$  – объем сердечника;  $C_k$  – полная ёмкость контура с учетом собственной межвитковой ёмкости обмотки.

Это и есть резонансная чувствительность приёмной катушки. Видим, что она не зависит от частоты. Отсюда следует, что оптимальная частота, найденная по критерию максимума магнитной напряженности на входе приёмника, также соответствует критерию максимума электрического сигнала на выходе приёмной индукционной катушки. При соотношении резонансной чувствительности с объемом сердечника значение первой больше при меньшем объеме. Минимальный объем сердечника определяет и минимальную чувствительность приёмной катушки. От частоты зависит лишь число её витков.

*Число витков* приёмной катушки

$$W = \frac{l_o}{\omega \sqrt{\mu_o \mu_c V_c C_{\hat{e}}}}, \quad (4.27)$$

где  $l_o$  – длина обмотки на сердечнике стержневой формы. Чем выше частота, тем меньше число витков. Это справедливо для любых магнитных антенн индукционного принципа действия.

#### 4.4. Методика расчета индукционных линий связи

Анализ принципов функционирования индукционной линии связи, входных и выходных параметров, а также факторов, влияющих на её эффективность, позволяет заключить, что строгое решение системы уравнений, описывающих электромагнитные процессы в ИЛС и

окружающих её материальных объектах в настоящее время невозможно. Все существующие методы расчета допускают ряд упрощений и ограничений, которые неизбежно приводят к ошибкам. Поэтому процесс создания ИЛС носит итерационный характер и состоит из нескольких циклов последовательного приближения к оптимальным значениям параметров катушек, источников сигнала и нагрузки. Следует отметить, что для уточнения расчетных показателей необходимо провести ряд натурных экспериментов, результаты которых могут использоваться для улучшения математических моделей и повышения эффективности ИЛС.

Показателями эффективности ИЛС являются  $M$  – коэффициент взаимной индукции между ИК и ПК,  $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$  – коэффициент передачи напряжения, КПД – коэффициент полезного действия при передаче энергии.

$M$  – коэффициент взаимной индукции между ПК и ПрК. Этот коэффициент связывает ЭДС на выходе приёмной катушки с изменением тока в передающей катушке. Это интегральный коэффициент, он учитывает все конструктивные особенности катушек: габаритные размеры, материал сердечников и корпусов, количество витков в катушках, расстояние между ними и взаимную ориентацию. Кроме того он позволяет учесть влияние элементов конструкции заряжающего автомата и корпуса снаряда на работу ИЛС.

$K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$  – коэффициент передачи напряжения. Это типовой коэффициент, характеризующий работу практически всех радиоэлектронных устройств обработки сигналов. Он носит комплексный характер и показывает изменение амплитуды и фазы сигнала при прохождении через линию связи. Необходимо отметить, что  $K_U$ , так же как и  $M$ , зависит от частоты сигнала. С его помощью строится амплитудно-частотная характеристика ИЛС и определяется полоса пропускания линии связи. В свою очередь от полосы пропускания зависит информационная ёмкость канала.

КПД – коэффициент полезного действия при передаче энергии. Он позволяет оценить энергетическую эффективность и затраты энергии на обеспечение функционирования ИЛС.

Кроме общих показателей используются частные, которые характеризуют отдельные устройства, входящие в состав ИЛС. К ним относятся параметры передающей и приёмной катушек, рассмотренные выше, а также параметры усилителей тока и напряжения, обеспечивающих работу катушек. При создании ИЛС необходимо обеспечить согласование всех составных частей. К параметрам катушек относят-

ся их размеры, число витков, диаметр и активное сопротивление провода, индуктивность, межвитковая ёмкость.

Возможные конструктивные схемы ИЛС можно разделить на две группы: с соосным (рис. 4.2,*а*) и параллельным (рис. 4.2,*б*) размещением катушек.

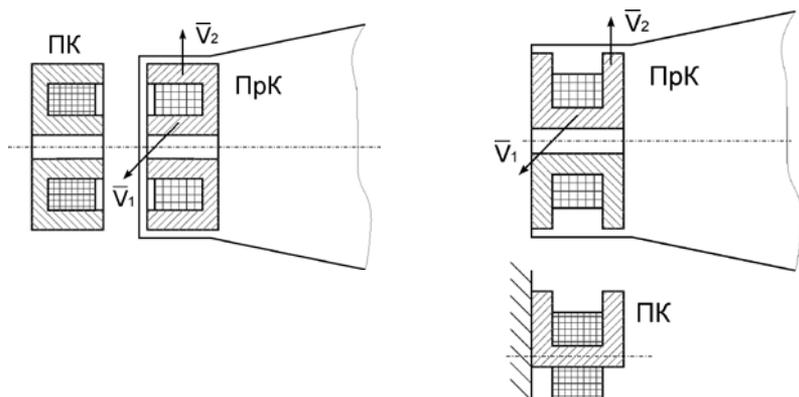


Рис. 4.2. Конструктивные схемы индукционной линии связи

Материальная среда вокруг катушек характеризуется абсолютной диэлектрической проницаемостью и абсолютной магнитной проницаемостью. Эти параметры могут существенно различаться у сердечников, на которых намотаны катушки, концентраторов магнитного поля, элементов конструкции орудия или пусковой установки, материала ствола и самого боеприпаса.

Большое практическое значение имеют частотные свойства ИЛС, т.е. зависимость показателей эффективности от частоты, так как именно полоса пропускания в первую очередь определяет объем передаваемой информации.

Анализ принципов функционирования ИЛС, входных и выходных параметров, а также факторов, влияющих на процессы в ИЛС, позволяет заключить, что процесс создания ИЛС носит итерационный характер и состоит из нескольких циклов последовательного приближения к оптимальным значениям параметров катушек, источников сигнала и нагрузки.

Методика расчета индуктивной линии связи.

1. Разработка требований и ограничений к индукционной линии связи и формирование массива исходных данных. К исходным требованиям можно отнести объем передаваемой информации, структуру информационного сигнала, вид и уровни напряжения (мощности) на

входе и выходе ИЛС. В качестве ограничений могут быть указаны предельные массогабариты, мощность источников питания, условия размещения элементов ИЛС.

К исходным данным относятся электрические и магнитные свойства материалов конструкций вокруг ПК и ПрК, их геометрические размеры и конфигурация.

2. Расчет параметров передающей катушки. Особенности и порядок расчета рассмотрены в подразд. 4.2.

3. Расчет магнитного поля передающей катушки. Целью расчета является определение магнитной индукции в любой точке пространства, окружающего магнитопровод. Это позволяет найти магнитный поток, пронизывающий приёмную катушку. Методика расчета будет рассмотрена в разд. 5.

4. Расчет магнитного потока в приёмной катушке. В зависимости от размещения приёмной катушки необходимо выделить область пространства, в пределах которой силовые линии магнитного поля пересекают поверхность, ограниченную её витками. Для нахождения магнитного потока требуется определить нормальную составляющую магнитной индукции к плоскости катушки и проинтегрировать по всей поверхности.

Ключевое значение имеет определение скорости изменения магнитного потока при передаче сигнала, так как от неё зависит ЭДС индукции на выходе приёмной катушки.

5. Расчет параметров приёмной катушки. Особенности и порядок расчета параметров рассмотрены в подразд. 4.3.

6. Расчет показателей эффективности ИЛС. Коэффициент взаимной индукции  $M$  определяется как коэффициент пропорциональности между током в передающей катушке и потокосцеплением приёмной катушки. Он может быть определен по результатам расчета магнитного потока в приёмной катушке. Расчеты необходимо провести для разных токов намагничивания в передающей катушке.

Коэффициент передачи напряжения  $K_U$  рассчитывается как отношение амплитуды ЭДС индукции на выходе ПрК к амплитуде сигнала на входе ПК. Это отношение определяется для разных частот входного сигнала. По результатам расчета строится амплитудно-частотная характеристика ИЛС и определяется полоса пропускания.

Коэффициент полезного действия ИЛС определяется как отношение всей потребляемой мощности в передающей катушке (см. подразд. 4.2) к мощности потребляемой активной составляющей сопротивления нагрузки приёмной катушки.

7. Уточнение исходных данных и требований к ИЛС, переход к следующему итерационному циклу.

## 5. ИНДУКЦИОННЫЙ ВВОД ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Разрабатываемые средства поражения, в частности артиллерийские системы, должны удовлетворять требованиям к высокоточному оружию (ВТО). Эти требования предполагают не только высокую точность наведения боеприпаса на цель, но и высокую точность времени срабатывания.

Для иллюстрации последнего требования можно привести пример стрельбы из малокалиберной пушки по цели. Для достижения максимальной вероятности поражения необходимо подорвать снаряд на таком расстоянии, чтобы цель попала в конус разлета осколков, причем плотность осколков должна быть не меньше допустимой. С другой стороны, если цель имеет противоосколочную броню, снаряд нужно подорвать внутри цели. Отсюда вытекают требования к точности информации о времени подрыва: размеры области пространства, в которой может взорваться боеприпас с учетом ошибок в указании момента срабатывания, должны быть меньше размеров цели.

Поскольку типы целей и расстояния до них постоянно изменяются в ходе боя, возникает необходимость ввода информации в боеприпас о времени и режиме срабатывания непосредственно во время стрельбы, причем способ ввода информации не должен ограничивать скорострельность.

Этому требованию удовлетворяет индукционный способ ввода информации во взрыватель. В данном разделе анализируются способы кодирования информации и их возможности. При анализе предполагается, что вопросы обнаружения целей, определения их координат, расчет момента порыва и т.д. решены. Кроме того, поскольку индукционный ввод информации связан с индукционным вводом энергии, используются результаты, полученные в разд. 2,4.

Индукционный ввод информации основан на воздействии переменного магнитного поля на приёмную катушку. Переменное магнитное поле создается при помощи передающей катушки. В предыдущих разделах показано, что возможен индукционный ввод энергии во взрыватель при помощи источника постоянного магнитного поля (ИМП), в качестве которого может использоваться постоянный магнит или катушка с постоянным током. Показано также, что ИМП целесообразно размещать вблизи дульного среза ствола. Передающая катушка для ввода информации должна располагаться на некотором расстоянии от

ИМП для ввода энергии, а именно – в дульной насадке. Приёмная катушка находится во взрывателе или в кольцевом пазу боеприпаса.

Данный вариант размещения передающей информационной катушки имеет следующие достоинства: 1) ствол не экранирует магнитное поле передающей катушки (значит, можно уменьшить интенсивность формируемого магнитного поля, снизить энергопотребление, массогабариты и стоимость информационного узла); 2) дульная насадка в известной мере экранирует катушку ввода информации от внешних полей, следовательно, повышается помехозащищенность системы ввода.

При создании устройства индукционного ввода информации необходимо обосновать способ её кодирования и вид информационных сигналов.

Для расчетов примем, что средняя скорость выстрела боеприпаса равна 1000 м/с, диаметр ствола 80 мм.

Функционирование устройства включает следующие этапы:

1. Ввод энергии.
2. Включение электронной схемы боеприпаса (взрывателя) и завершение переходных процессов.
3. Определение фактической скорости боеприпаса, подготовка и кодирование информации для ввода в боеприпас.
4. Формирование информационных сигналов, обеспечивающих требуемое изменение параметров магнитного поля передающей информационной катушки.
5. Прием, аналого-цифровое преобразование и сохранение информационного сигнала в боеприпасе.
6. Обработка принятого сигнала и восстановление переданного информационного кода.

*1-й этап.* Анализ возможностей и особенности ввода энергии индукционным способом рассмотрены ранее.

*2-й этап.* Для включения схемы и завершения переходных процессов требуется не более 5 мс.

*3-й этап.* Определение фактической скорости боеприпаса может быть осуществлено двумя способами. Первый способ основан на том, что при пролете боеприпаса мимо катушки для ввода энергии магнитное поле искажается. Это приводит к появлению в катушке ЭДС самоиндукции, под влиянием которой изменяется ток, создающий магнитное поле. Это отклонение тока от постоянного значения фиксируется при помощи усилителя постоянного тока. Интервал времени, в течение которого происходит искажение тока, прямо пропорционален длине снаряда (известная величина  $L_{сн}$ ) и обратно пропорцио-

нален скорости  $v_{\text{сн}}$  снаряда. Таким образом, измерив интервал времени  $T_{\text{откл}}$ , в течение которого ток в катушке ввода энергии отклоняется от постоянного значения, можно определить скорость каждого снаряда при выстреле:  $v_{\text{сн}} = L_{\text{сн}} / T_{\text{откл}}$ .

Для реализации второго способа необходимо на дульной насадке разместить две дополнительные катушки на заданном расстоянии  $\Delta L$ . Через эти катушки должен протекать переменный ток. При пролете снаряда мимо катушек сопротивление магнитопровода уменьшается и амплитуда переменного тока в катушках по очереди возрастает. Измерив время  $\Delta T$  между максимумами этих всплесков тока, можно найти скорость снаряда:  $v_{\text{сн}} = \Delta L / \Delta T$ .

Следует отметить, что скорость снаряда определяется при помощи аппаратуры орудия, в которую поступают сведения о дальности до цели, полученные станциями разведки целей. По известной дальности до цели и измеренной скорости снаряда специализированный вычислитель орудия рассчитывает время подрыва боеприпаса и кодирует его. Далее этот код (при цифровой обработке обычно это бинарный код, включающий два значения: «0» и «1») необходимо преобразовать в информационный сигнал, который обеспечивает формирование изменяющегося магнитного поля передающей катушки.

*4-й этап.* Известны различные способы кодирования при передаче цифровых сигналов. Их можно разделить на импульсные и непрерывные. При использовании импульсов в процессе передачи изменяются (принимают два значения) параметры импульсной последовательности: амплитуда и длительность импульсов, период повторения. При передаче радиоимпульсов могут изменяться также несущая частота, начальная фаза и закон внутриимпульсной модуляции. Непрерывные способы предполагают скачкообразное изменение амплитуды, частоты или фазы непрерывного гармонического сигнала.

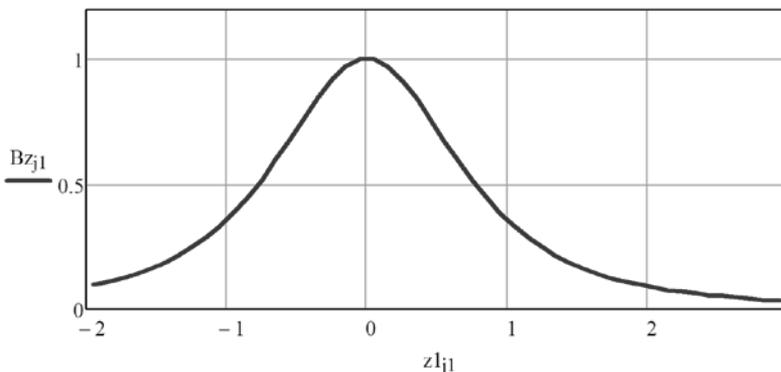
Общим для перечисленных выше способов является необходимость синхронизации, т.е. точное указание начала кода. В противном случае дешифрация кода становится невозможной. Для этого выделяется несколько импульсов с заданной временной расстановкой (с заданным набором параметров), которые образуют синхрогруппу, или в непрерывном сигнале выделяется участок с известной структурой. Это требует определенных временных затрат. Однако при индукционном способе ввода информации в боеприпас запас времени практически отсутствует. Покажем это для заданных выше условий.

Определим временной интервал, в пределах которого можно передавать информацию. На рис. 5.1 приведен нормированный график изменения продольной составляющей магнитной индукции катушки с

током вдоль оси  $Z$  (ось показана на рис. 2.16). По оси  $Z$  отложено расстояние в радиусах катушки. Точка  $Z = 0$  соответствует плоскости катушки. Как видно, магнитная индукция, а соответственно, и магнитный поток через приёмную катушку уменьшаются в два раза на расстоянии  $0,7$  радиуса витка по оси  $Z$ . Можно принять интервал взаимодействия приёмной катушки с магнитным полем передающей катушки равным  $1,4$  радиуса витка  $R$ , или, что то же самое,  $1,4$  радиуса ствола.

Рис. 5.1. Изменение продольной составляющей магнитной индукции катушки с током вдоль оси  $Z$

При скорости снаряда  $1000$  м/с и радиусе ствола  $40$  мм время взаимодействия, т.е. время передачи информационного сигнала, равно  $68$  мкс. Предположим, что информация передается импульсным кодом со скважностью  $2$ . Минимальная длительность импульса  $\tau_{\text{и}}$  ограничена шириной полосы пропускания линии связи  $\Delta f$  и равна  $\tau_{\text{и}} = 1/\Delta f$ . Расчёты показывают, что полоса пропускания ИЛС равна  $200$  кГц. Следова-



тельно, длительность импульса не может быть меньше  $5$  мкс, а период следования импульсов не может быть меньше  $10$  мкс.

Таким образом, за время взаимодействия можно передать не более  $7$  импульсов. С учетом того, что в группу синхронизации обычно входят  $3...5$  импульсов, на кодирование собственно информации возможностей не остается. Можно увеличить длину катушки для ввода информации (см. рис. 1.4), однако слишком большие размеры дульной насадки нецелесообразны.

Предлагается для формирования информационного сигнала использовать ортогональные преобразования, в частности преобразование Фурье.

Ортогональными называются функции из множества  $\{U_n(t)\}$ , если

$$\int_{t_0}^{t_0+T} U_n(t) U_m(t) dt = \begin{cases} C, & \text{если } n = m, \\ 0, & \text{если } n \neq m, \end{cases} \quad (5.1)$$

где  $m$  и  $n$  – номера функций. Когда постоянная  $C = 1$ , функции  $\{U_n(t)\}$  называют ортонормированными.

Принцип разложения произвольной функции в ряд, слагаемые которого входят во множество ортогональных функций  $\{U_n(t)\}$ , заключается в следующем.

Пусть действительный сигнал  $x(t)$  определен в интервале  $\Delta t = (t_0, t_0+T)$  и может быть представлен в виде ряда:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot U_n(t), \quad (5.2)$$

где  $a_n$  – коэффициенты разложения, которые нужно определить. Для этого умножим обе части (5.2) на функции  $U_m(t)$  и проинтегрируем на интервале  $\Delta t$ :

$$\int_{t_0}^{t_0+T} x(t) U_m(t) dt = \int_{t_0}^{t_0+T} \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot U_n(t) \cdot U_m(t) dt = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \int_{t_0}^{t_0+T} U_n(t) \cdot U_m(t) dt.$$

С учетом свойства (5.1) от суммы ряда останется только одно слагаемое, когда  $n = m$ . Следовательно,

$$\int_{t_0}^{t_0+T} x(t) U_m(t) dt = a_m \cdot C, \quad (5.3)$$

откуда

$$a_m = \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) U_m(t) dt, \quad \text{где } m = 0, 1, \dots \quad (5.4)$$

Таким образом, при известных (заданных) ортогональных функциях множества  $\{U_n(t)\}$  можно с произвольным сигналом  $x(t)$  сопоставить бесконечное, но счетное множество чисел  $\{a_0, a_1, a_2, \dots\}$ .

Более того, известно, что реальный сигнал при полном множестве  $\{U_n(t)\}$  можно представить с любой точностью конечным множеством чисел  $\{a_0, a_1, a_2, \dots, a_{N-1}\}$ .

Реальным называется сигнал с конечной энергией

$$\int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt < \infty.$$

Условия полного множества ортогональных (базисных) функций:  
 а) энергия всех функций конечна, т.е. для любого  $n$  справедливо

$$\int_{t_0}^{t_0+T} U_n^2(t) dt < \infty,$$

б) нет базисной функции, для которой  $\int_{t_0}^{t_0+T} x(t) U_n(t) dt = 0$ .

Для реального сигнала и полного множества при любом, сколь угодно малом  $\varepsilon$  есть конечное число  $N$  слагаемых ряда, сумма которых  $\hat{x}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \cdot U_n(t)$  представляет сигнал  $x(t)$  и расхождение между ними:  $\int_{t_0}^{t_0+T} |x(t) - \hat{x}(t)|^2 dt < \varepsilon$ .

Физический смысл разложения можно понять, если возвести в квадрат обе части (5.2) и проинтегрировать:

$$\int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt = \sum_{n=0}^{\infty} a_n^2 \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} U_n^2(t) dt = C \cdot \sum_{n=0}^{\infty} a_n^2. \quad (5.5)$$

Левая часть (5.5) представляет энергию сигнала, а в правой части – величина, пропорциональная сумме коэффициентов разложения. Таким образом, при разложении в ряд (5.2) энергия сигнала распределяется по ортогональным (базисным) функциям, а каждый коэффициент разложения  $a_n$  показывает долю энергии сигнала, приходящуюся на свою базисную функцию  $U_n(t)$ .

Обычно ортогональные преобразования используются для фильтрации сигналов, т.е. очистки передаваемой информации от помех. Для этого принимаемый сигнал с помехой раскладывается в ряд по ортогональным функциям, а затем слагаемые ряда, которые содержат энергию помехи, устраняются. После обратного преобразования, т.е. после суммирования оставшихся членов ряда, восстанавливается очищенный от помех сигнал. Естественно, что для этих целей необходимо подбирать такой базис, чтобы энергия помех и энергия полезных сигналов распределялась по разным базисным функциям.

Использование ортогональных функций для передачи кодированного сообщения в боеприпас отличается от традиционного решения задачи фильтрации сигналов. Для кодирования информации можно использовать основное свойство ортогональных функций (5.1), суть которого заключается в следующем. Если передаваемый сигнал  $x(t)$  сам является базисной функцией, то при его преобразовании в базисе  $\{U_n(t)\}$  вся энергия сигнала гарантированно соберется в одном слагаемом ряда (5.2), а все остальные члены ряда будут равны нулю. Следовательно, если специально создать сигнал, представляющий собой сумму нескольких, например  $N$ , базисных функций, то при разложении в этом базисе получится точно  $N$  слагаемых ряда, не равных нулю, так как энергия базисных функций не распределяется по другим коэффициентам разложения. Если слагаемые сигнала имеют одинаковую энергию, то все коэффициенты разложения, не равные нулю, будут одинаковы. Отсюда следует, что массив коэффициентов разложения, полученный после преобразования информационного сигнала, по сути, представляет собой код переданного сообщения. Элементы массива, не равные нулю, соответствуют единице в передаваемом коде.

Таким образом, передаваемый информационный сигнал может представлять собой один импульс, образованный путем суммирования базисных функций. Длительность этого импульса должна быть больше времени взаимодействия передающей и приёмной катушек. С каждой базисной функцией можно сопоставить элемент передаваемого кода. Наличие функции в передаваемом сигнале соответствует единице, а её отсутствие – нулю. Например, 16 базисных функций могут обеспечить формирование сигнала, который содержит 16-разрядный двоичный код.

После приема этого импульса при пролете снаряда мимо передающей катушки производится его преобразование в известном базисе, т.е. определяются коэффициенты разложения, которые образуют массив чисел. Каждый член массива соответствует своей базисной функции.

В идеальном случае (т.е. при неискаженном сигнале без помех) элементы массива, которые соответствуют отсутствующим в импульсе базисным функциям, должны быть равны нулю. Элементы массива, соответствующие имеющимся в сигнале базисным функциям, должны иметь одинаковые значения, т.е. коэффициенты разложения должны быть равны. Однако искажения сигнала и шумы в приемном тракте могут привести к тому, что все элементы массива не будут равны нулю, а коэффициенты разложения будут разными. Следовательно, необходимо по каждой базисной функции принимать решение о её наличии в принимаемом сигнале, т.е. решать задачу обнаружения, которая сводится к сравнению

с порогом коэффициентов разложения, полученных в результате ортогонального преобразования.

Рассмотрим требования к базисным функциям и проанализируем, какие из них могут использоваться для передачи кодированного сообщения в боеприпас.

В настоящее время множество наборов базисных функций можно разделить на три группы: гармонические (преобразования Фурье, Хартли), негармонические (преобразования Уолша, Хаара) и вейвлет-преобразования.

Основные требования к базисным функциям – простота формирования, простота обработки, т.е. простота вычисления коэффициентов разложения, помехозащищенность.

При создании и эксплуатации радиоэлектронных устройств наиболее распространены преобразование Фурье и спектральный анализ. С одной стороны, математический аппарат такого преобразования удобен и хорошо отработан, а с другой стороны, аналоговая аппаратура обработки характеризуется частотными свойствами, которые хорошо согласуются со спектральным представлением сигналов.

В последнее время широкое распространение получили негармонические преобразования на основе функций Уолша. Эти функции принимают только два значения: +1 и -1. Поэтому при вычислении коэффициентов разложения (5.4) операция умножения (самая трудоемкая и продолжительная в цифровой технике) не нужна, а расчет (5.4) сводится к суммированию прямых и инверсных значений преобразуемого сигнала. Простота обработки – основное достоинство преобразований в базисе Уолша, однако для формирования таких функций нужны специальные генераторы. Для передачи информации формирование базисных функций необходимо.

Все большее применение находят также вейвлет-преобразования. Однако вейвлеты представляют собой ограниченные во времени знакопеременные функции, и поэтому, кроме сложностей их формирования, возникнут сложности синхронизации.

Наиболее предпочтительным является преобразование Фурье, которое обладает следующими достоинствами.

1. Базисными являются гармонические функции, которые не ограничены во времени. Следовательно, информационный сигнал, представляющий собой сумму гармоник, также может иметь произвольную длину. В рассматриваемом случае его продолжительность должна превышать время взаимодействия приёмной катушки с магнитным полем передающей катушки. Преобразование Фурье позво-

лит при этом обязательно выявить частотный состав сигнала независимо от времени начала анализа. Таким образом, синхронизация работы приёмной катушки во времени не нужна.

2. Использование гармонических функций облегчает расчет передающей и приёмной части системы ввода информации.

3. Существует множество отработанных схем генераторов гармонических сигналов и цифровых узлов быстрого преобразования Фурье, которые могут быть использованы в индукционной системе ввода информации.

Устройство кодирования (рис. 5.2) работает следующим образом. Набор генераторов вырабатывает гармонические сигналы, образующие набор заданного количества базисных функций. Количество генераторов равно количеству разрядов передаваемого кода.

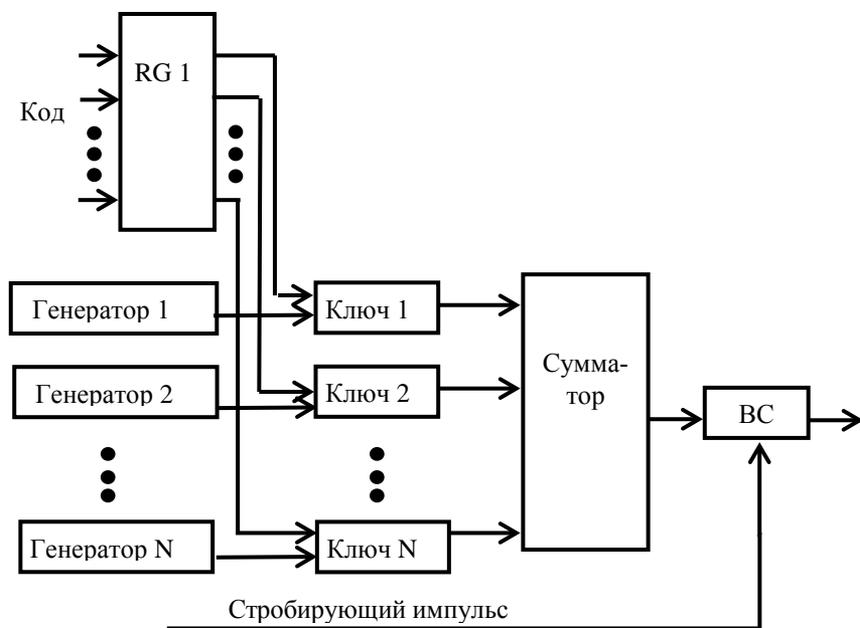


Рис. 5.2. Структурная схема устройства кодирования

Во входной регистр RG 1 записывается код, который необходимо передать. Выходы регистра подключены к управляющим входам электронных ключей. Единицы, записанные в регистр, замыкают соответствующие ключи, и напряжения с выхода генераторов проходят на сумматор. На выходе сумматора формируется сумма базисных функций, соответствующих записанному в регистр коду.

На временной селектор ВС поступает импульс строба, который разрешает прохождение суммарного сигнала только на интервале взаимодействия передающей и приёмной катушек. Выходной информационный сигнал поступает далее на формирователь тока передающей катушки.

*5-й этап.* Приём и обработка информационного сигнала. Переменное магнитное поле передающей катушки наводит в приёмной катушке боеприпаса ЭДС электромагнитной индукции. Закон изменения ЭДС во времени соответствует информационному сигналу. На выходе приёмной катушки формируется сигнал, который поступает в устройство декодирования информации (рис. 5.3).

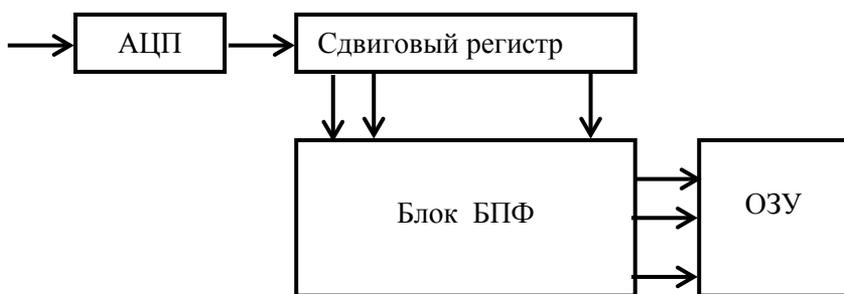


Рис. 5.3. Структурная схема устройства декодирования

Напряжение с выхода приёмной катушки после усиления подается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). С выхода АЦП цифровые коды поступают на сдвиговый регистр и продвигаются по нему каждый такт работы. После вылета снаряда из ствола сдвиговый регистр будет заполнен. Блок быстрого преобразования Фурье (БПФ) вычисляет коэффициенты разложения и записывает их массив в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ). Затем специализированный процессор обрабатывает элементы массива коэффициентов разложения, обнаруживает базисные функции, содержащиеся в принятом сигнале, и заполняет выделенную ячейку памяти ОЗУ восстановленным кодом сообщения (на рис. 5.3 спецпроцессор не показан).

С целью проверить возможность использования гармонического базиса Фурье для кодирования информации проведено математическое моделирование работы индукционной системы ввода информации.

На рис. 5.4 приведен график гармонической функции, которая является пятой функцией в ортогональном базисе Фурье, на рис. 5.5 –

результат быстрого преобразования Фурье такого сигнала. Как видно, только один (пятый) коэффициент разложения не равен нулю.

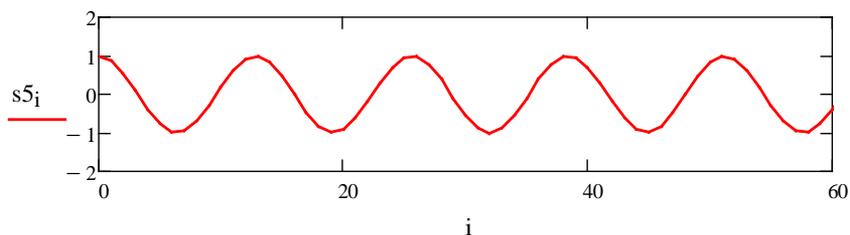


Рис. 5.4. Пятая гармоническая базисная функция

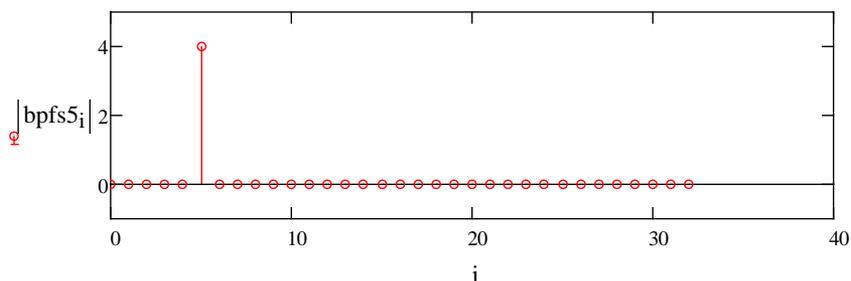


Рис. 5.5. Результат быстрого преобразования Фурье функции  $s_5$

На рис. 5.6 приведены временные графики девяти базисных функций (гармоник) и график суммарного сигнала  $y$ , поступающего на усилитель тока передающей катушки. Как видно, слагаемыми являются функции с номерами

2, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13.

Примем, что первая базисная функция соответствует самому старшему разряду кода, который формируется из 16 гармоник. Тогда суммарный информационный сигнал  $y$  содержит код

0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 0

Рис. 5.6. Формирование информационного сигнала

На рис. 5.7 показан результат ортогонального преобразования такого сигнала в базисе Фурье. Из рисунка явствует, что коэффициенты разложения, не равные нулю, соответствуют номерам слагаемых гармоник, а массив коэффициентов соответствует переданному коду. При одинаковой амплитуде слагаемых гармоник коэффициенты Фурье также совпадают.

Проведенные расчеты показали, что массив коэффициентов разложения (амплитудный спектр) не зависит от временного сдвига гармоник и их начальных фаз. Это подтверждает вывод о том, что данный способ передачи информации не требует синхронизации во времени.

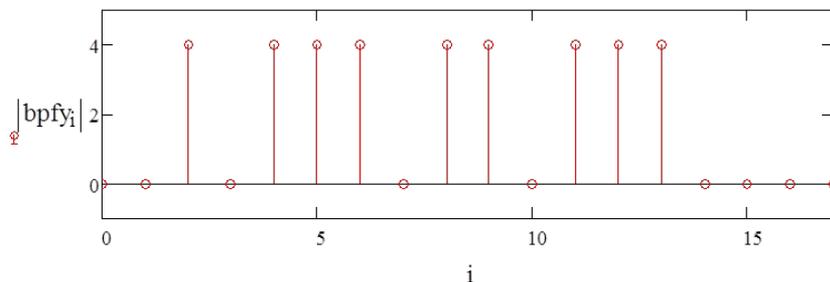


Рис. 5.7. Восстановление переданного кода

Основным достоинством индукционного ввода информации во взрыватель при выстреле является то, что он не ограничивает скорострельность орудия, позволяет измерить фактическую скорость боеприпаса и использовать её при определении момента подрыва.

Узкая полоса пропускания индукционной линии связи ограничивает объём передаваемой информации в процессе выстрела. Возможен способ кодирования и передачи информации с использованием ортогональных функций. Использование ортогонального базиса Фурье не требует синхронизации во времени для восстановления кода и позволяет передавать больше информации, чем при импульсном кодировании.

### **Библиографический список**

1. *Барбаиов Г.В.*, Смирнов А.П. Системы управления взрывом. Основы анализа и синтеза / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2000.
2. *Прикладная электродинамика* / Л.С. Егоренков [и др.]; ред. Л.С. Егоренков, Н.А. Платонов. М.: Физматлит, 2004. 267 с.
3. *Платонов Н.А.*, Рогожников К.И. Техническая физика. Т.1. СПб.: Наука, 2009. 448 с.
4. *Киселёв В.И.* Электродинамика индукционной связи / В.И. Киселёв, И.А. Оськин, К.И. Рогожников. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 490 с.
5. *Шапиро Д.Н.* Электромагнитное экранирование. Долгопрудный: Изд.: дом «Интеллект», 2010. 120 с.
6. *Буль О.Б.* Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. М.: Изд. Академия, 2005. 336 с.
7. *Муромцев Д.Ю.* Электродинамика и распространение радиоволн: учебное пособие. 2-е изд. СПб.: Лань 2014. 448с.
8. *Современная электродинамика. Ч.2* Теория электромагнитных явлений в веществе: учебное пособие в 2 ч / В.В. Батыгин, И.Н. Топтыгин. М. Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2005. 847 с.
9. *Федотов А.В.* Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 176 с.
10. *Электротехнический справочник. В 3т. Т.1.* Электротехнические материалы /Под общ. ред. В. Г. Герасимова. 7-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985. 488 с.
11. *Корн Г.*, Корн Т. Справочник по математике: пер. с англ. 4-е изд. М.: Наука, 2007. 830 с.
12. *Ахмед Н.*, Рао К.Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов: пер. с англ. / Под ред. И.Б. Фоменко. М.: Связь, 1980.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ В АВТОНОМНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕ- МАХ .....	4
1.1. Применение индукционных линий связи в процессе выстрела .....	4
1.2. Принципы функционирования индукционных устройств .....	13
1.3. Обзор методов расчета индукционных устройств .....	14
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ИНДУК- ЦИОННОЙ ЛИНИИ ВВОДА ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ .....	26
2.1. Расчет магнитного поля передающей катушки .....	26
2.2. Расчет магнитного потока через приёмную катушку .....	42
2.3. Расчет ЭДС, наводимой в приёмной катушке .....	45
2.4. Расчет процесса заряда конденсатора .....	46
3. ПОРЯДОК РАСЧЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА FEMM .....	62
3.1. Состав и назначение элементов пакета FEMM .....	62
3.2. Предварительная подготовка модели .....	63
3.3. Запуск программы, определение типа задачи .....	63
3.4. Построение контуров модели .....	64
3.5. Ввод электрических и магнитных свойств частей модели .....	64
3.6. Изменение свойств материалов .....	66
3.7. Ввод граничных условий .....	71
3.8. Построение сетки конечных элементов и расчет модели .....	73
3.9. Представление результатов расчёта магнитного поля .....	74
3.10. Построение графиков, обработка результатов .....	79
4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНДУКЦИОННОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ .....	84
4.1. Определение входных и выходных параметров ИЛС .....	84
4.2. Расчет передающей катушки .....	84
4.3. Расчет приемной катушки с сердечником .....	89
4.4. Методика расчета индукционных линий связи .....	91
5. ИНДУКЦИОННЫЙ ВВОД ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ОРТОГО- НАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ .....	95
<i>Библиографический список</i> .....	107

*Митюшов Александр Иванович, Егоренков Леонид Семёнович,  
Карпов Сергей Анатольевич*

**Индукционный способ ввода энергии и информации  
во взрыватель в процессе артиллерийского выстрела**

Редактор *Г.М. Звягина*

Корректор *Л.А. Петрова*

Компьютерная верстка: *С.В. Кащуба*

Подписано в печать 25.11.2019. Формат бумаги 60x84/16. Бумага документная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 6,35. Тираж 100 экз. Заказ № 176.

Балтийский государственный технический университет

Типография БГТУ

190005, С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1