

Повышение эффективности резонансного электромагнитного ускорителя

К.И. Сухачев, Н.Д. Семкин, А.В. Пияков

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королева
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34

Приведены исследования, направленные на повышение эффективности резонансного электромагнитного ускорителя. Предложена модернизированная система ускорителя, отличающаяся наличием системы подзарядки накопителя. Предложенная система с применением выработанных рекомендаций имеет теоретическую эффективность преобразования энергии накопителя в кинетическую энергию метаемого тела, равную 70 %.

Ключевые слова: резонансный электромагнитный ускоритель, система подзарядки накопителя, энергия накопителя, кинетическая энергия, метаемое тело.

Введение

Резонансный электромагнитный ускоритель (РЭМУ) обладает высокой эффективностью по сравнению с другими типами ускорителей Гаусса, однако большая часть энергии накопителя расходуется нерационально. Теоретически эффективность РЭМУ можно довести до уровня электрических двигателей. В данной статье рассмотрены основные методы и направления повышения КПД резонансного ускорителя.

1. Влияние параметров ускорителя на эффективность

Резонансный метод ускорения основан на синхронизации переключения тяговых соленоидов с полупериодами колебательного переходного процесса. При таком режиме каждая ступень ускорителя отрабатывает максимально доступную на данный момент времени энергию накопителя. При движении метаемого тела по ускорительному тракту соленоиды коммутируются поочередно, и в каждом новом образовавшемся контуре происходит резонансный перезаряд накопителя с постоянно повышающейся частотой свободных колебаний. Накопитель является основной частью ускорителя, он входит в состав каждого контура, а его параметры влияют на эффективность и другие характеристики ускорителя. Конденсаторный источник энергии постепенно передает свою энергию ускоряемому объекту в пределах эффективности электро-

магнитного ускорителя, поэтому очевидно, что повысить выходную скорость объекта возможно за счет энергии накопителя. Но одинаковую энергию в конденсаторных накопителях можно получить, меняя два параметра: емкость конденсаторных батарей и напряжение. На рис. 1 представлено распределение эффективности электромагнитного резонансного ускорителя, настроенного на работу с массой ускоряемого объекта 5 г, для нескольких вариантов конструкции (таблица ниже).

Согласно приведенному графику рис. 1, можно сделать вывод, что нет прямой зависимости эффективности от емкости или напряжения конденсаторного накопителя. При двукратном увеличении напряжения или четырехкратном увеличении емкости накопителя, при сохранении его энергии постоянной эффективность падает. Это можно объяснить тем, что при большой емкости невозможно обеспечить малую длительность переходных процессов, так как период свободных колебаний возрастает, а при попытке уменьшить индуктивности соленоидов уменьшается величина магнитного поля, зависящая от количества витков, а увеличение силы тока, связанное со снижением сопротивления, не перекрывает этот процесс. Возросшая длительность процесса протекания тока вызывает повышение тепловых потерь, пропорциональных времени протекания тока. При слишком большом напряжении на накопителе возрастают потери на активном сопротивлении, пропорцио-

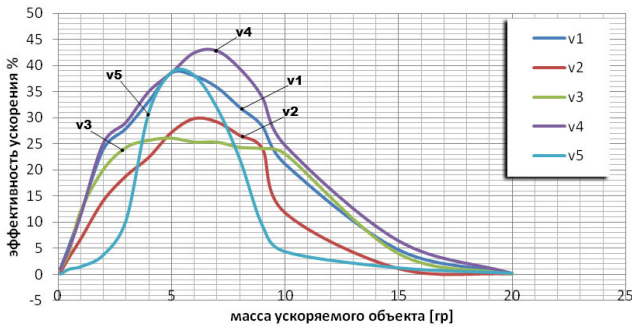


Рис. 1. Распределение эффективности ускорения от массы

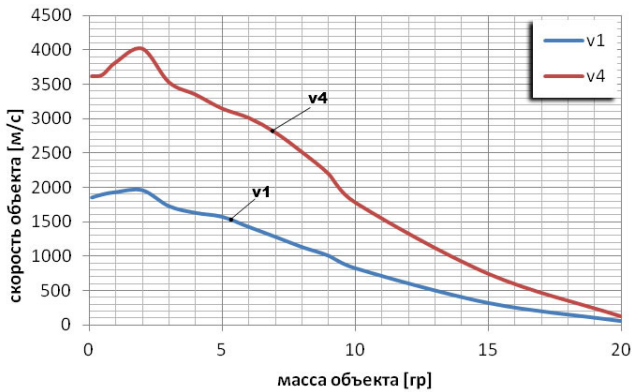


Рис. 3. Зависимость скорости от массы объекта

нальные квадрату тока. Именно эти конкурирующие процессы не дают сделать однозначный вывод о том, что в накопителе следует увеличивать емкость или максимальное допустимое напряжение для повышения эффективности. На основе полученных результатов можно построить график, отображающий оптимальные параметры накопителя. На рис. 2 представлена зависимость эффективности резонансного ускорителя от отношения напряжения накопителя к его емкости (В/мкФ).

Следует заметить, что вариант с большей емкостью имеет некоторые преимущества, обусловленные расширением диапазона ускоряемых масс, что связано с меньшей критичностью к точности моментов переключения соленоидов в силу плавного характера течения переходных процессов. В варианте с повышенным напряжением требования синхронизма выше и диапазон уже. Скорость метаемого тела однозначно зависит от энергии накопителя. На рис. 3 рассмотрены два случая распределения конечной скорости объекта от его массы для двух вариантов конструкции ускорителей, согласно таблице ниже.

График, приведенный на рис. 4, отражает зависимость эффективности резонансных ускорителей от массы ускоряемого объекта, а график на рис. 5 – зависимость скорости метаемого тела. Ускорители имеют идентичные параметры

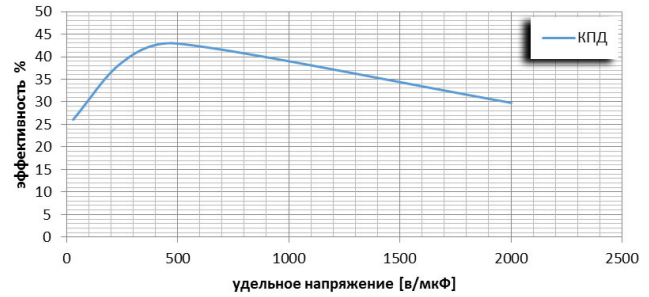


Рис. 2. Зависимость эффективности от параметров накопителя

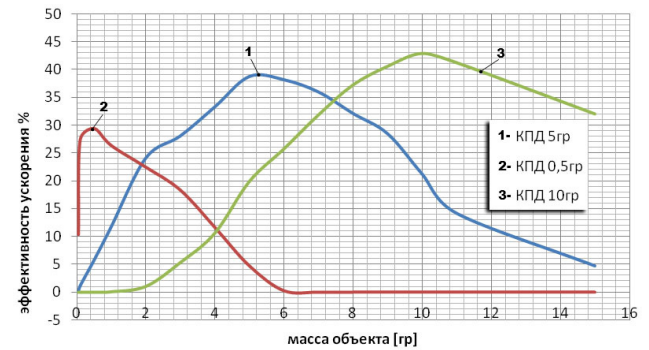


Рис. 4. Зависимость эффективности от массы ускорителей разных диапазонов масс

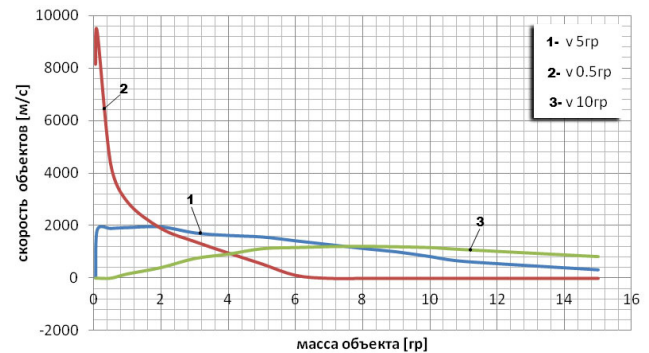


Рис. 5. Зависимость скорости объекта от массы для ускорителей разных диапазонов

(v1, согласно таблице), но каждый изначально рассчитан на работу с различными массами: 0,5, 5, 10 г.

Из последних двух графиков видно некоторое уменьшение эффективности с уменьшением массы объекта, несмотря на пересчет параметров ускорителя, это явление связано с уменьшением радиуса частицы, равного радиусу эквивалентного витка с током, что вызывает уменьшение ускоряющей силы.

Мгновенное значение силы, действующей на объект, находится по следующей формуле:

$$dF = \frac{4\pi^2 dB_{внеш} dB_{об} R_{об}^2}{\mu_0}, \quad (1)$$

где $B_{внеш}$ – магнитная индукция, создаваемая тяговым соленоидом в данный момент времени в области нахождения ускоряемого объекта;

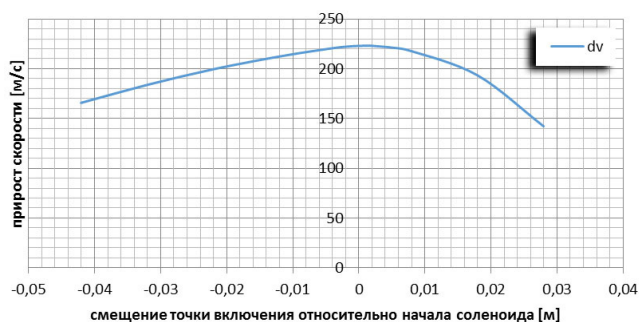


Рис. 6. Зависимость ускоряющей способности ступени от координаты срабатывания соленоида

$B_{об}$ – намагниченность ускоряемого объекта;
 $R_{об}$ – радиус ускоряемого объекта.

С уменьшением массы частицы увеличивается ускорение, действующее на нее, что компенсирует снижение эффективности и вызывает значительный прирост скорости ускоряемого объекта.

Синхронизация моментов включения влияет на диапазон масс, с которыми может работать ускоритель, и на его эффективность. При грубом несоблюдении режимов коммутации ускорение может вообще не происходить. Общепринятым положением считается, что выключение соленоида необходимо синхронизировать с моментом, когда объект находится в средней области катушки. Параметры момента включения остаются неясными, но логично предположить, что объект должен проходить область с максимальной плотностью линий магнитной индукции как можно больший интервал времени. Руководствуясь данным принципом, можно сделать вывод, что включение индуктора с опережением не рационально, так как у любой реальной катушки имеются краевые эффекты. Для обеспечения максимальной эффективности ускорения метаемое тело должно находиться внутри соленоида в момент протекания максимального тока. Обеспечивать синхронизм можно разными способами, но от выбранного способа в большей части зависит диапазон ускоряемых масс. Если возможности перестройки моментов включения соленоидов отсутствуют, то ускоритель работает в узком диапазоне. Точнее, максимально эффективен он только для одной заранее выбранной массы, но так как точные включение и выключение происходят в момент токов, близких к нулевому значению, то изменение скорости в данный момент происходит относительно медленно, это и позволяет слегка расширить диапазон ускоряемых масс. При использовании программируемых задержек включения индук-



Рис. 7. Приведенная ускоряющая способность от смещения точки включения соленоида

торов диапазон масс удаётся существенно расширить. Для выяснения наиболее удачных моментов включения рассмотрена одна ступень резонансного ускорителя. График, показанный на рис. 6, отображает зависимость изменения скорости объекта, вызванного действием рассматриваемой ступени, от координаты включения тягового соленоида.

График на рис. 7 аналогичен предыдущему, но построен в приведенных системах координат к размерам соленоида.

Из графика видно, что при задержке коммутации накопителя на соленоид, за которую объект пройдет 0,75 % длины катушки, будет достигаться максимальная эффективность ускорения для соленоида цилиндрической конструкции.

Основным способом повышения эффективности электромагнитных ускорителей является повышение числа ступеней. Но данный принцип в полной мере неприменим к резонансному электромагнитному ускорителю. Это связано с тем, что при работе каждой новой ступени напряжение накопителя постепенно уменьшается, а с уменьшением энергии накопителя уменьшается и эффективность ускорения. На рис. 8 представлен вклад каждой ступени в конечную скорость метаемого объекта. Из гистограммы видно, что четвертая ступень вносит всего 6,6 % в скорость объекта, и дальнейшее увеличение ступеней хотя и вызывает незначительное увеличение КПД, но не оправдывает увеличившейся сложности.

2. Модернизированная система резонансного электромагнитного ускорителя

Для устранения недостатка, связанного с невозможностью построения многоступенчатой системы «РЕМУ», предложена модернизированная

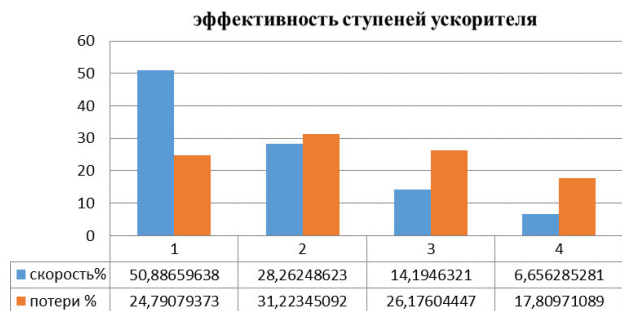


Рис. 8. Эффективность ступеней ускорителя

схема ускорителя (рис. 9). Отличие от прототипа [1] заключается в добавлении системы подзарядки накопителя.

После выключения каждой ступени есть время ожидания, необходимое для попадания ускоряемого объекта в зону максимальной эффективности следующего соленоида; на протяжении этого времени накопитель отключен от всех соленоидов и теряет незначительную часть энергии на своем внутреннем сопротивлении утечки. Время ожидания можно использовать для увеличения скорости выходного объекта. Резонансный ускоритель, как было показано выше, нецелесообразен с количеством ступеней более четырех, но если применить технологию подзарядки накопителя в момент ожидания, то количество ступеней можно существенно повысить, а вместе с этим и эффективность ускорения и скорость выходного объекта. Для реализации

этой идеи есть два пути: компенсация потраченной энергии в каждый момент ожидания и компенсация через один момент ожидания. В первом случае придется периодически изменять полярность источника питания, заряжающего накопитель в моменты ожидания, что несколько усложнит конструкцию. Во втором случае этого делать не придется, понадобится добавить к схеме резонансного ускорителя всего один коммутатор с драйвером и модернизировать программу системы управления.

Моделирование работы усовершенствованной схемы резонансного электромагнитного ускорителя показало существенное повышение эффективности, вплоть до 70 %. Причем такая эффективность достигается уже при шестиступенчатой системе. Дальнейшее увеличение числа разгонных контуров вызывает стабильный прирост скорости объекта, но без увеличения эффективности. В данном случае под эффективностью понимается отношение кинетической энергии объекта к суммарной энергии накопителя, которая увеличивается с каждой подзарядкой накопителя.

Моделирование проводилось для стального объекта сферической формы массой 5 г. Энергия накопителя составляет 16 кДж. На графиках (рис. 10–12) представлены результаты моделирования шестиступенчатого модернизирован-

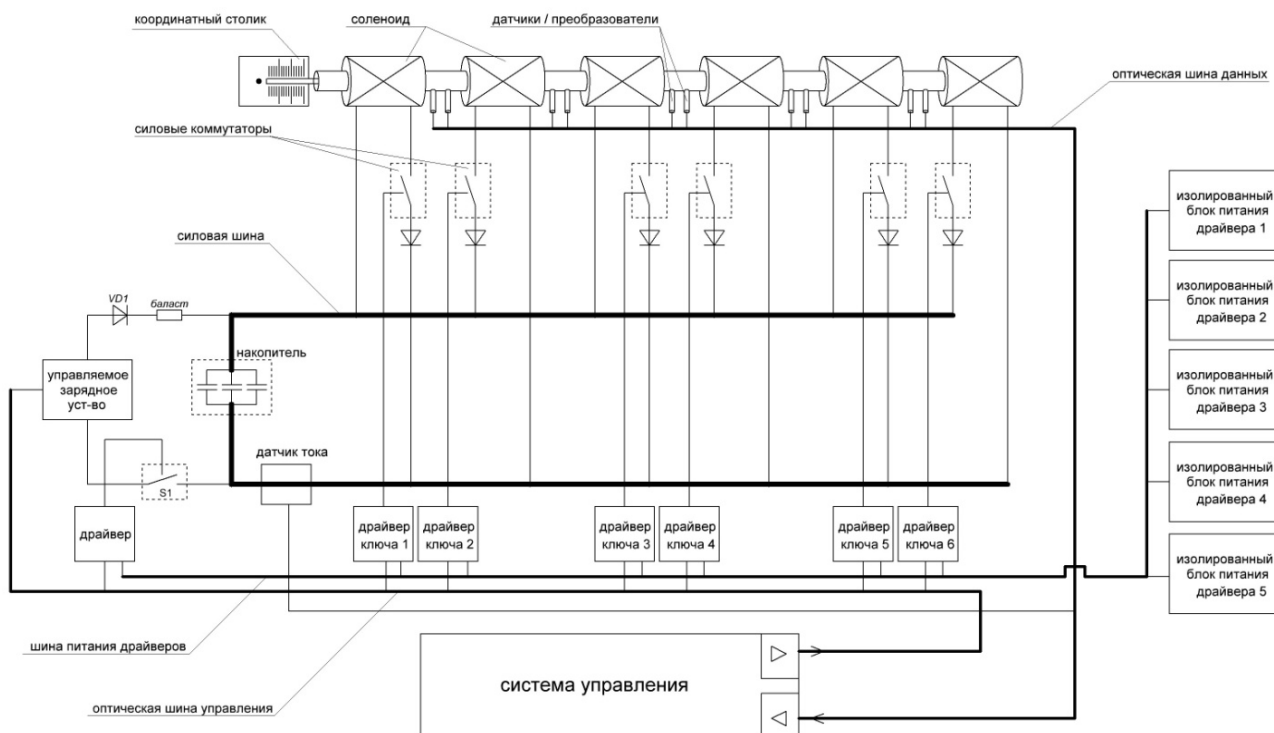


Рис. 9. Схема резонансного электромагнитного ускорителя частиц с неполной компенсацией

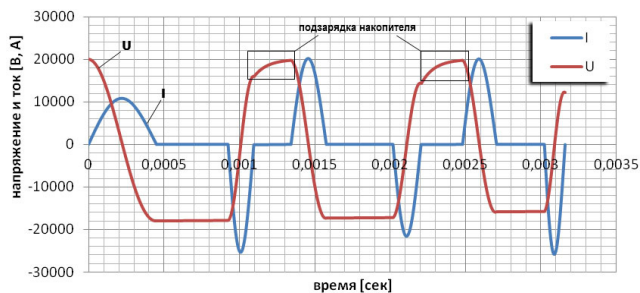


Рис. 10. Электрические процессы резонансного ускорителя с неполной компенсацией

ного резонансного ускорителя: электрические процессы, величина магнитной индукции и кинетические процессы соответственно.

На графике электрических процессов виден момент подзарядки накопителя, подзарядка происходит только при положительном напряжении накопителя. По результатам моделирования конечная скорость объекта составила 2330 м/с, что соответствует эффективности ускорителя, равной 71 % (следует заметить, что при оценке эффективности ускорителя в качестве затраченной считается только энергия, запасенная накопителем, без учета потребления энергии, необходимой на работу всей системы).

Заключение

Выработаны принципы, направленные на повышение эффективности «РЕМУ», основным из которых является применение системы подзарядки накопителя. С применением всех предложенных рекомендаций эффективность модерни-

Таблица

Варианты конструкций ускорителей

Вар.	Емкость, мкФ	Напряжение, кВ	Энергия, кДж	Примечание
v1	80	20	16	Есть корректировка времени включения соленоидов
v2	20	40	16	
v3	320	10	16	
v4	80	40	64	
v5	80	20	16	Отсутствует корректировка моментов включения

Список литературы

1. Сухачев К.И., Семкин Н.Д., Пияков А.В. Патент России № 2466340 С1 опубликовано 10.11.2012. Резонансный электромагнитный ускоритель.

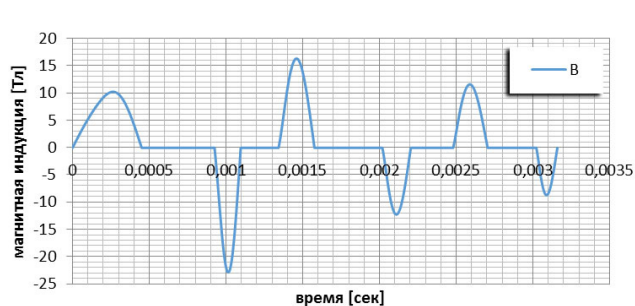


Рис. 11. Магнитное поле ускорителя с неполной компенсацией

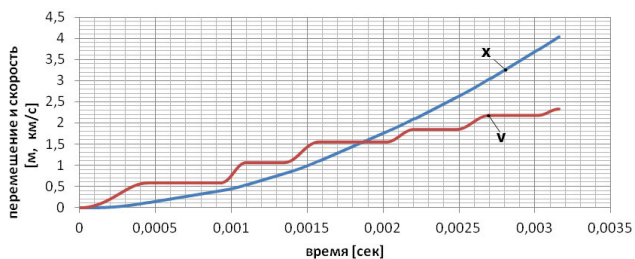


Рис. 12. Кинетические процессы ускорения тела в резонансном ускорителе с неполной компенсацией

зированной системы резонансного электромагнитного ускорителя может достигать 70 %, что выше существующих аналогов. Следует заметить, что есть интерес для дальнейшего исследования в данном направлении: необходимо изучить влияние системы с подзарядкой в каждом цикле на эффективность и другие параметры ускорителя, исследовать более полно влияние параметров метаемого тела на процесс ускорения, а также возможность создания циклического ускорителя, основанного на резонансном принципе.

2. Резонансный метод ускорения немагнитных материалов / Н.Д. Семкин [и др.] // Вестник СГАУ. 2012. № 2(33). С. 126.

3. Bresie D.A., Ingram S.K. Coilgun technology at the center for electromechanics, the University of Texas at Austin //

- IEEE Transactions on Magnetics. 1993. Vol. 29. № 1. P. 649–654.
4. Kim S.-W., Jung H.-K., Hahn S.-Y. An optimal design of capacitor-driven coilgun // IEEE Transactions on Magnetics. 1994. Vol. 30. № 2. P. 207–211.
5. Ingram S.K. Theoretical analysis of a collapsing field accelerator // 6-th EML symposium. 28–30 April 1992. Austin, TX.
6. Васильев Е.В. Патент РФ № 2324249 С1. Многоступенчатый ускоритель с бегущим переключением соленоидов. Опубл. от 10.05.2008. Бюл. 13.
7. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: АСТ, 2006. С. 555–558.
8. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. Изд. 2-е, стереотип. М.: Высшая школа, 1991. 288 с.

Increase of efficiency of the resonant electromagnetic accelerator

K.I. Sukhachev, N.D. Semkin, A.V. Piyakov

Researches directed on increase of efficiency of the resonant electromagnetic accelerator are resulted. The modernized system of the accelerator, different is offered by presence of system of additional charge of the store. The offered system with application of the developed recommendations has theoretical efficiency of transformation of energy of the store in kinetic energy of a flying body of equal 70 %.

Keywords: resonant electromagnetic accelerator, charge storage system, energy storage, the kinetic energy, flying body.

Неганов, В.А.

Современная теория и практические применения антенн: монография / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой; предисловие академика Ю.В. Гуляева; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.

ISBN 978-5-88070-222-0

УДК 621.396.67
ББК 32.845



Рассмотрены основные разделы теории и техники антенн. Освещены вопросы расчета и построения различных типов антенн (от вибраторных до рупорных и антенных решеток, включая фазированные). Основное внимание уделено антеннам СВЧ и расчетам их электромагнитных полей в ближней зоне, т. е. вопросам электромагнитной совместимости.

Принципиальное отличие книги от известных заключается в последовательном применении метода физической регуляризации (самосогласованного метода) к расчету электромагнитного поля антенн, позволяющего осуществлять непрерывный переход с излучающей поверхности антенны к пространству вне ее. С помощью самосогласованного метода получены новые результаты по теории антенн: установлены связь между поверхностной плотностью тока на вибраторной антенне и напряженностью электромагнитного поля, однонаправленный режим излучения для кольцевой (рамочной антенны), режимы стоячих и бегущих волн в цилиндрической спиральной антенне, входное сопротивление практически для всех типов антенн. Теоретический материал подкреплен примерами применения многолучевых антенн.

Предназначено для разработчиков антенно-фидерных устройств, аспирантов и докторантов, занимающихся вопросами проектирования антенных систем различного назначения, студентов радиотехнических специальностей высших учебных заведений.