

Физическое обоснование принципа Гюйгенса и теорема взаимности направленных антенн

Ф. Ф. Менде

Принцип Гюйгенса гласит, что каждый элемент волнового фронта можно рассматривать, как центр вторичного возмущения, порождающего вторичные сферические волны, а результирующее световое поле в каждой точке пространства будет определяться интерференцией этих волн. Этот принцип является основным постулатом геометрической оптики, однако он не раскрывает физической природы этого явления. В работе показано, что физическое объяснение этого принципа основано на законах параметрической самоиндукции, на основе которых может быть получено волновое уравнение в длинных линиях. Показано также, что теорема взаимности для направленных антенных систем может быть объяснена на основе принципа Гюйгенса, который предполагает поперечное саморасширение пучков электромагнитных волн.

§1. Законы самоиндукции

К законам самоиндукции следует отнести те законы, которые описывают реакцию таких элементов радиотехнических цепей, как ёмкость, индуктивность и сопротивление на гальваническое подключение к ним источников тока или напряжения. Эти законы являются основой теории электрических цепей. Результаты этой теории могут быть перенесены и на электродинамику материальных сред, т.к. такие среды могут быть представлены в виде эквивалентных схем с использованием таких элементов.

К самоиндукции отнесём также тот случай, когда при подключении источника питания к указанным цепям могут меняться их параметры. Такую самоиндукцию будем называть параметрической[1-3]. В дальнейшем будем использовать такие понятия, как генератор тока и генератор напряжения. Под идеальным генератором напряжения понимают такой источник, который обеспечивает заданное напряжение на любой нагрузке, внутреннее сопротивление у такого генератора равно нулю. Под идеальным генератором тока понимают такой

источник, который обеспечивает заданный ток в любой нагрузке, внутреннее сопротивление у такого генератора равно бесконечности. Идеальных генераторов тока и напряжения в природе не существует, поскольку и генераторы тока и генераторы напряжения имеют свое внутреннее сопротивление, которое и ограничивает их возможности.

Если имеется емкость C , и эта емкость заряжена до разности потенциалов U то заряд Q , накопленный в емкости, определяется соотношением:

$$Q_{C,U} = CU.$$

Величину заряда $Q_{C,U}$ будем называть ещё потоком электрической индукции.

Когда речь идет об изменении заряда, накопленного в ёмкости, то его величина может изменяться путем изменения разности потенциалов при постоянной емкости, или путём изменения самой емкости при постоянной разности потенциалов.

Если величина емкости или разности потенциалов на ней зависят от времени, то величина тока, текущего через ёмкость, определяется соотношением

$$I = \frac{dQ_{C,U}}{dt} = C \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial t}.$$

Это выражение определяет закон электрической самоиндукции. Таким образом, ток в цепи, содержащей ёмкость, можно получить двумя способами: изменяя напряжение на постоянной ёмкости или изменяя саму ёмкость при неизменном напряжении на ней, или производить изменение обоих параметров одновременно.

В случае, когда изменяется емкость при неизменном напряжении на ней, имеем:

$$I = U \frac{\partial C}{\partial t}. \quad (1.1)$$

Этот случай относится к параметрической электрической самоиндукции, поскольку наличие тока связано с изменением такого параметра как ёмкость.

Видно, что величина

$$R_c = \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)^{-1}$$

играет роль сопротивления [1-3], причём сопротивление может быть как положительным, так и отрицательным. При этом расходуемая мощность определяется из соотношения

$$P(t) = \frac{\partial C}{\partial t} U^2.$$

Видно, что в зависимости от знака производной расходуемая мощность может иметь разные знаки. Когда производная положительная, расходуемая мощность идёт на совершение внешней работы. Если производная отрицательная, то работу совершает внешний источник, заряжая ёмкость.

У конденсатора пластины притягиваются. Если эти пластины не закреплены, то при поддержании на конденсаторе постоянного напряжения, они начнут самопроизвольно сближаться. При этом ёмкость конденсатора начнёт увеличиваться и источник питания будет отдавать свою энергию, которая будет уходить на пополнение энергии в конденсаторе. Если же при помощи внешних сил начать раздвигать пластины, то совершать работу будет источник внешних сил, раздвигающий пластины.

Схема другого устройства, в котором реализуется указанный принцип, показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема плоского конденсатора, в который втягивается (извлекается) диэлектрическая пластина.

В данном случае на пластину действует сила F , и она будет втягиваться в конденсатор, увеличивая его ёмкость. И эта сила тем больше, чем больше диэлектрическая проницаемость пластины. Рост ёмкости конденсатора приведёт к тому, что от источника напряжения в пластины потечёт ток. Произведение этого тока и напряжения источника будет равно мощности, отбираемой конденсатором у источника напряжения. Если при помощи силы F_1 начать извлекать пластину из конденсатора, то ёмкость его начнёт уменьшаться и ток из конденсатора потечёт в источник напряжения, но его направление будет обратно предыдущему случаю. При этом источник силы F_1 будет расходовать энергию, которая будет выделяться в источнике напряжения.

Рассмотрим процессы, происходящие в индуктивности. Для этого введем понятие потока токовой самоиндукции

$$Q_{L,I} = LI.$$

Если поток зависит от времени, то выполняется следующее соотношение

$$U = \frac{dQ_{L,I}}{dt} = L \frac{\partial I}{\partial t} + I \frac{\partial L}{\partial t}.$$

Рассмотрим случай, когда ток I , текущий через индуктивность, постоянен, а сама индуктивность изменяется. В этом случае получаем соотношение

$$U = I \frac{\partial L}{\partial t}. \quad (1.2)$$

Таким образом, величина

$$R(t) = \frac{\partial L}{\partial t},$$

играет роль сопротивления. Как и в случае электрической самоиндукции, это сопротивление может быть, в зависимости от знака производной, как положительным, так и отрицательным. Это означает, что индуктивность может, как получать энергию извне, так и отдавать её во внешние цепи.

Расходуемая мощность при этом определится из соотношения

$$P = \frac{\partial L}{\partial t} I^2$$

Возьмём индуктивность, величина которой зависит от внешнего параметра. Это может быть, например, случай, когда в соленоид втягиваться, или выталкиваться ферромагнитный сердечник. В этом случае, при поддержании в индуктивности постоянного тока, не закреплённый сердечник начнёт самопроизвольно втягиваться в соленоид, а источник тока начнёт отдавать индуктивности энергию. При этом на клеммах источника тока появится напряжение. Мощность, отбираемая индуктивностью у источника тока будет равна произведению тока на напряжение. Схема такого устройства показана на рис. 2. Если начать извлекать сердечник из индуктивности, то она начнёт уменьшаться и на клеммах источника тока появится напряжение, обратное предыдущему случаю. Произведение тока и напряжения и будет той мощностью, которую будет отдавать источник силы, источнику тока.

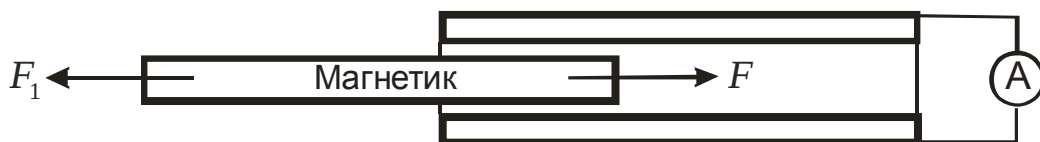


Рис. 2. Схема соленоида, в который втягивается (извлекается) ферромагнитный сердечник. .

Как в случае электрической, так и в случае токовой самоиндукции закономерность процессов одинакова. Система самопроизвольно выполняет такие действия, чтобы отбирать у источников питания дополнительную энергию.

§2. Новый способ получения волнового уравнения

Процессы, рассмотренные в предыдущем параграфе, касаются цепей с сосредоточенными параметрами, когда распределение разностей потенциалов и токов в рассмотренных элементах являются пространственно однородными. Однако имеются цепи, например длинные линии, в которых это условие не соблюдается. Такие процессы описываются волновыми уравнениями, при помощи телеграфных уравнений, но физика самого явления нам не ясна.

Воспользуемся результатами, полученными в предыдущем параграфе, для рассмотрения процессов, происходящих в длинных линиях, в которых емкость и индуктивность являются распределенными параметрами. Будем считать, что погонная (приходящаяся на единицу длины) емкость и индуктивность такой линии составляют C_0 и L_0 .

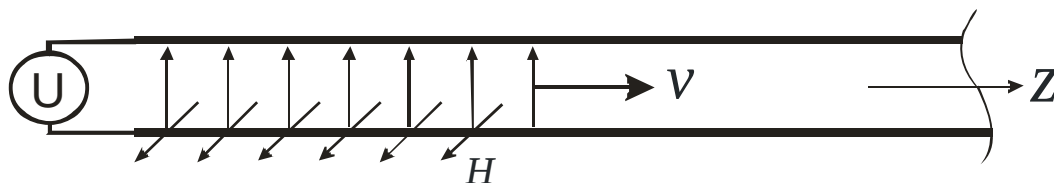


Рис. 3. Длинная линия, в которой распространяется фронт напряжения.

Если к такой линии (Рис. 3) подключить источник постоянного напряжения U , то его фронт будет распространяться в линии с какой-то скоростью v , и текущая координата этого фронта определится соотношением $z = vt$. При этом суммарная заряженная ёмкость и суммарная индуктивность, по которой течёт ток, будут изменяться по закону [1-5]:

$$C(t) = zC_0 = vt C_0,$$

$$L(t) = zL_0 = vt L_0.$$

Источник напряжения U будет при этом заряжать увеличивающуюся емкость линии, для чего от источника к заряжаемой линии в соответствии с соотношением (1.1) должен течь ток

$$I_1 = U \frac{\partial C(t)}{\partial t} = vUC_0. \quad (2.1)$$

Этот ток будет течь через проводники линии, обладающие индуктивностью, создавая в ней магнитное поле. Но, поскольку индуктивность линии, по которой течёт ток, тоже увеличивается, то в соответствии с соотношением (1.2), на ней будет наблюдаться падение напряжения

$$U_1 = I_1 \frac{\partial L(t)}{\partial t} = vI_1L_0 = v^2UC_0L_0.$$

Падение напряжения на проводниках линии равно напряжению, приложенному к её входу, поэтому в последнем выражении следует положить $U_1 = U$. С учетом этого сразу находим, что скорость движения фронта напряжения при заданных погонных параметрах должна составлять

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0C_0}}. \quad (2.2)$$

Это выражение соответствует скорости распространения фронта напряжения в линии. Следовательно, если к бесконечно длинной линии подключить источник напряжения, то в ней будет иметь место саморасширение электрических полей и токов, заполняющих линию энергией. Рассмотренное саморасширение полей и токов в линии аналогично самопроизвольному изменению параметров ёмкости и индуктивности рассмотренному в предыдущем параграфе. Только в первом случае этот процесс осуществляется за счёт механического изменения параметров, в данном же случае этот процесс обеспечивается за счёт саморасширения смых полей и токов в длинной линии.

Величину тока в линии можно получить, подставив значения скорости распространения фронта волны, определяемого соотношением (2.2), в соотношение (2.1). Сделав эту подстановку, получим

$$I = U \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} = U \frac{1}{Z},$$

где $Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ - волновое сопротивление линии.

§ 3. Физическое обоснование принципа Гюйгенса и теорема взаимности направленных антенн

Принцип Гюйгенса гласит, что каждый элемент волнового фронта можно рассматривать, как центр вторичного возмущения, порождающего вторичные сферические волны, а результирующее световое поле в каждой точке пространства будет определяться интерференцией этих волн. Этот принцип является основным постулатом геометрической оптики, однако он не раскрывает физической природы этого явления. Из геометрической оптики известно, что любой пучок света является расходящимся и что площадь его поперечного сечения в процессе распространения всё время увеличивается. Это явление подчиняется принципу Гюйгенса. При этом скорость расширения пучка нормальная к направлению распространения равна скорости его движения в направлении распространения. Однако физические причины такого явления до сих пор были не ясны. В длинной линии саморасширение поле происходит вдоль линии, и сама линия является тем элементом, который препятствует саморасширению полей в поперечном направлении. Если же убрать линию и выпустить волну в свободное пространство, например при помощи рупорной

антенны, то в свободном пространстве волна должна саморасширяться и в поперечном направлении, что и подтверждает принцип Гюйгенса.

Рассмотрим плоскую монохроматическую ТЕМ волну, проходящую через щель, ширина которой значительно больше длины волны (рис. 4).

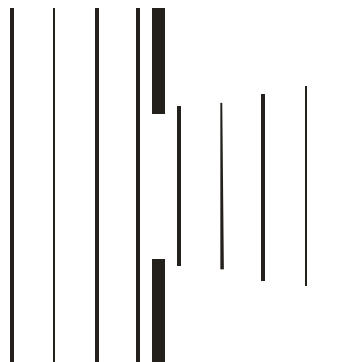


Рис. 4. Прохождение плоской волны через щель, которая значительно больше длины волны.

После прохождения через щель волна начинает расширяться в поперечном направлении, и это расширение подчиняется принципу Гюйгенса. При этом в расширяющейся волне концы линий постоянной фазы в процессе их движения двигаются со скоростью света ещё и в поперечном направлении. Но поскольку при таком расширении увеличивается и сечение пучка, то начинает уменьшаться вектор Пойнтинга, что означает уменьшение электрического и магнитного поля на линиях постоянной фазы. Этот процесс саморасширения электрических векторов на линиях постоянной фазы подобен процессу саморасширения электротоковой волны в длинной линии. Отличием является лишь то, что в линии распространяется волна поперечного электрического поля, и саморасширение происходит в направлении распространения. В данном же случае происходит движение вектора электрического поля ещё и в поперечном направлении. В длинной линии такого расширения нет, поскольку волну в поперечном направлении ограничивают проводники линии. Поперечная трансформация волны сопровождается тем, что, начиная от центра линии постоянной фазы вдоль неё

начинает течь ток смещения. Этот процесс очень похож на расширение сжатой резинки, когда все её участки начинают равномерно расширяться. При этом плотность энергии электромагнитной волны на линии постоянной фазы начинает уменьшаться, равномерно распределяясь в возрастающем объёме, занимаемом расширяющейся волной.

Это простое рассмотрение, указывает на физические причины постулата Гюйгенса и по сути дела является новым физическим законом.

С этим явлением связана так называемая теорема взаимности для антенных систем, которая до настоящего времени не имеет своего физического обоснования. Эта теорема гласит, что коэффициент усиления направленных антенн одинаков как при излучении, так и при приёме сигнала. Странность этой теоремы заключается в том, что направленная антенна может формировать узконаправленный луч, когда излучаемая энергия концентрируется в каком-то одном направлении. Это означает, что плотность энергии концентрируется в пространстве ограниченном с боковых сторон. Это хорошо видно на примере лазерного луча. Приёмная же направленная антенна расположена в полях передатчика, которые равномерно распределены в пространстве, и чтобы увеличить свой коэффициент усиления направленной приёмной антенне необходимо уметь собирать энергию с бокового пространства. Это действительно так, но как это она делает до сих пор остаётся загадкой. Вопрос заключается в том, можно ли найти какие-то физические причины такого странного поведения направленных приёмных антенн.

Известно, что законы геометрической оптики, когда луч можно считать практически прямолинейным, работают в том случае, когда ширина луча значительно больше длины волны. В этом случае работает принцип Гюйгенса. Поэтому, если ограничить ширину пучка при помощи щели, то его расходимость начнёт расти, и когда ширина щели станет соизмеримой с длиной волны, за

щелью мы получим сильно расходящийся луч, а когда щель станет меньше длины волны, то после щели получим радиально расходящиеся волны.

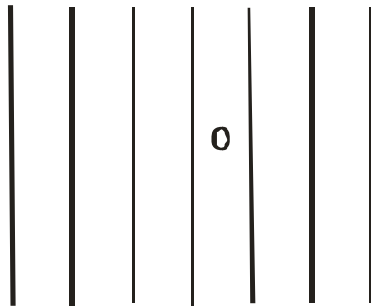


Рис. 5. Огибание волнами преграды, размеры которой значительно меньше длины волны.

Что же будет, если на пути поперечной волны поставить преграду? Рассмотрим два случая. На рис. 5 изображен случай, когда ширина преграды значительно меньше длины волны. При огибании такой преграды волны практически её не чувствуют.

Совсем другую картинку мы видим, когда преграда значительно больше длины волны (Рис.6)

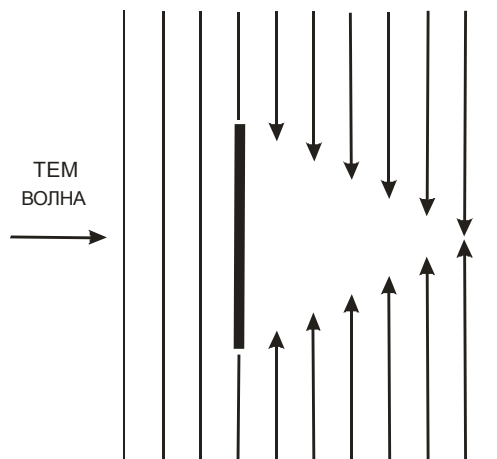


Рис. 6. Случай, когда на пути волн расположена преграда, размеры которой значительно больше длины волны.

Если преграда на пути волн выполнена так, что она полностью поглощает энергию падающих на неё волн, то картинка волнового процесса выглядит так, как показано на рис. 6. Видно, что с правой стороны от поглощающей преграды существует область тени, где волны отсутствуют. Но миновав преграду, оборванные концы волн в соответствии с принципом Гюйгенса опять начинают сближаться, принося дополнительную энергию в пространство тени из бокового пространства, находящегося за пределами возможного расположения следующих элементов направленной антенны. Это явление носит название дифракции. И оно характерно для любых волновых процессов, в том числе и для электромагнитных волн. Но такой процесс имеет одну особенность, которая очевидна. Поскольку поглощающая преграда поглотила часть волновой энергии, то амплитуда волн справа от тени, будет несколько меньше, чем амплитуда волн слева от поглощающего препятствия. Это связано с тем, что отрезки волн справа от препятствия, расширяясь, перераспределяют свою энергию на теневой участок пространства за преградой. Направление движения энергии в расширяющемся участке волны показаны стрелками. Это означает, что для того, чтобы ликвидировать тень и восстановить нормальный волновой процесс, энергия волн начинает перекачиваться из боковых участков отдалённых от области тени, расширяя участки волн оборванные преградой. При этом суммарная амплитуда волны за преградой уменьшится.

Вернёмся к приёмной направленной антенне типа волновой канал и предположим, что второй директор мы расположили вне тени в том месте, куда пришли электрические поля, принеся дополнительную энергию из боковых областей. Ситуация в этом случае повторится, опять за таким директором образуется тень. Третий директор мы также можем расположить за пределами тени второго директора и т.д. И каждый раз каждый новый директор будет оказываться в свежих электрических полях, забирая у них положенную ему энергию.

Но ситуация с реальной направленной антенной типа волновой канал несколько другая. Во-первых, длина директора равна половине длины волны, и за ним практически нет тени и оборванные куски волны практически сразу смыкаются за директором, но при этом перекачка энергии из боковых участков в область расположения следующего директора всё равно происходит.

Рассмотрим, как ведёт себя такая антенна в поле плоской ТЕМ волны (рис. 7) Предположим, что пронумерованная волна последовательно занимает положения 1, 2, 3 и 4. Долетев до первого директора, она возбуждает в нём токи, делая его излучателем, но при этом теряет часть своей энергии. При этом первый директор переизлучает полученную от волны энергию в окружающее пространство в соответствии со своей диаграммой направленности. Поэтому волна после прохождения первого директора непосредственно в области за ним имеет меньшую амплитуду электрического поля, чем до его прохождения.

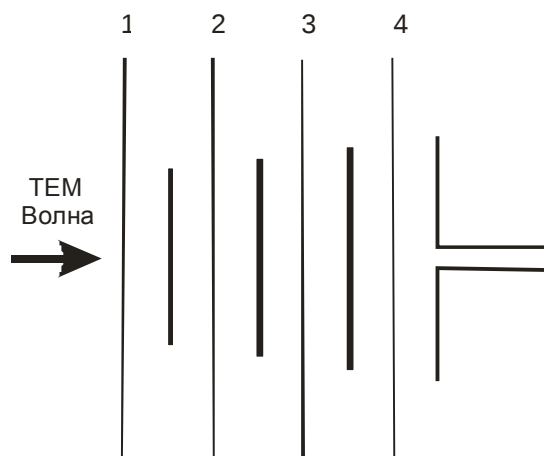


Рис. 7. Антенна типа волновой канал в поле плоской ТЕМ волны

Чтобы восполнить указанные потери энергия с боковых участков, лежащих за пределами антенного поля, начнёт перекачиваться в сторону оси антенны. После

прохождения второго директора произойдёт то же самое. Таким образом, явление дифракции приведёт к тому, что энергия волны с участков за пределами антенного поля начнёт перекачиваться в область нахождения директоров. Токи же, наведённые в директорах, будут делать из них активные вибраторы, которые будут путём переизлучения увеличивать токи в каждом последующем директоре и дойдя до приёмного вибратора, эти поля будут значительно превышать поля самой волны в положении 1. С этим и связано то обстоятельство, что направленная приёмная антенна обладает большей эффективностью, чем одиночный вибратор. Хотя, конечно, утверждать, что коэффициенты усиления, как в режиме передачи, так и в режиме приёма будут одинаковыми, нельзя. Поэтому теорема взаимности хоть и выполняется, но, скорее всего, не в полном объёме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Менде Ф.Ф. Новая электродинамика. Революция в современной физике. Харьков, НТМТ, 2012, 172 с.
2. Менде Ф.Ф. Проблемы современной физики и пути их решения. Palmarium academic publishing, 2013, 272 с.
3. Mende F.F. New ideas in classical electrodynamics and physics of the plasma. LAMBERT academic publishing, 2013, 76 p.