Мощность

1. Перед тем, как начать разбираться с понятием реактивная мощность, разберём, что такое электрическая мощность вообще и какие составляющие в неё входят.

Перейдём к рассмотрению энергетических соотношений в цепи синусоидального тока.

1.1. Мгновенная мощность

Положим, что за элементарный промежуток времени dt через поперечное сечение провода в направлении принятом за положительное для тока I (рис.1.1), проходит электрический заряд dq.

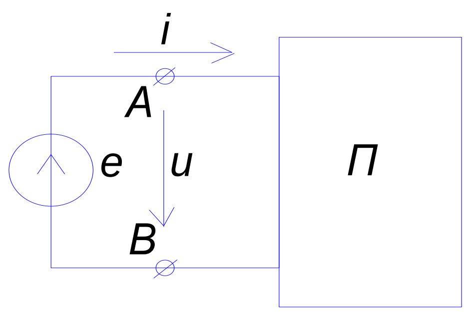


Рисунок 1.1

Перемещение заряда в положительном направлении э.д.с. источника сопровождается элементарной работой источника напряжения (э.д.с)

$$dA=edq \tag{1.1}$$

которая в виде электромагнитной энергии отдаётся источником во внешнюю цепь и затрачивается на работу по перемещению заряда dq в положительном направлении напряжения u через пассивный двухполюсник

$$dA=udq \tag{1.2}$$

Работа, совершаемая источником напряжения по переносу единичного заряда в данный момент времени характеризуется ***мгновенной мощностью*** производимой и отдаваемой источником напряжения и потребляемая двухполюсником. Она равна скорости совершения работы в данный момент времени.

$$p=dA/dt = ui \tag{1.3}$$

Напряжение и ток на входе пассивного двухполюсника в общем случае сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол φ и зависят от характера нагрузки (активной, реактивной).

Примем начальную фазу напряжения $\Psi u=0$, тогда следуя из определения, что под разностью фаз ϕ напряжения и тока всегда понимается разность начальных фаз напряжения Ψu и тока Ψi (а не наоборот)

$$\phi = \Psi u - \Psi i \qquad (1.4)$$

получим начальную фазу тока равную $\Psi i = -\phi$

При таком условии мгновенные значения напряжения и тока:

$$u = Um \times \sin\omega t \quad ; \quad i = Im \times (\sin\omega t - \phi) \qquad (1.5)$$

мгновенная мощность равна:

$$p = dA/dt = ui = Um \times Im \times \sin\omega t \times (\sin\omega t - \phi) = \frac{Um \times Im}{2} \times (\cos\phi - \cos(2\omega t - \phi)) =$$

$$= U \times I \times \cos\phi - U \times I \times \cos(2\omega t - \phi) \qquad (1.6)$$

Мгновенная мощность имеет постоянную составляющую $(U \times I \times \cos\phi)$ и гармоническую составляющую $(U \times I \times \cos(2\omega t - \phi))$, угловая частота которой в два раза больше угловой частоты напряжения и тока (рис. 1.2)

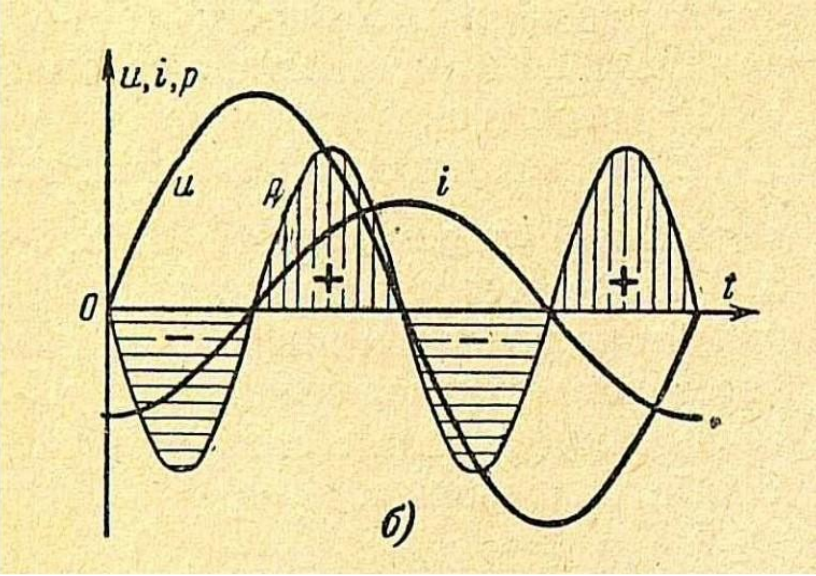


Рисунок 1.2

Мгновенная мощность равна нулю в те моменты времени, когда равны нулю u или i. Мгновенная мощность положительна, когда u и i одного знака, т.е. когда направления напряжения и тока в двухполюснике одинаковы и она отрицательна, когда u и i разных знаков, т.е. когда направление напряжения и тока в двухполюснике противоположны.

Когда мгновенная мощность отрицательна, энергия поступает не в двухполюсник, а возвращается из двухполюсника источнику напряжения.

Такой возврат энергии источнику питания происходит за счёт того, что энергия периодически запасается в магнитных и электрических полях элементов цепи, входящих в состав двухполюсника. Энергия отдаваемая источником и поступающая в двухполюсник в течении времени t *, равна* $\int_0^t p dt$

На графике (рис.1.1.) она соответствует площади кривой, ограниченной кривой p осью абцисс на интервале времени t. На рисунке знаками плюс и минус отмечены заштрихованные площадки, соответствующие энергии, поступающей в двухполюсник и возвращаемый источнику.

Если двухполюсник состоит только из активных сопротивлений, энергия накапливаться в нём не может. В этом случае нет сдвига фаз между напряжением и током ($\phi = 0$). Ток и напряжение всегда одного знака, $p \geq 0$ и нет таких моментов времени, когда энергия возвращалась бы из двухполюсника источнику питания (Рис. 1.3).

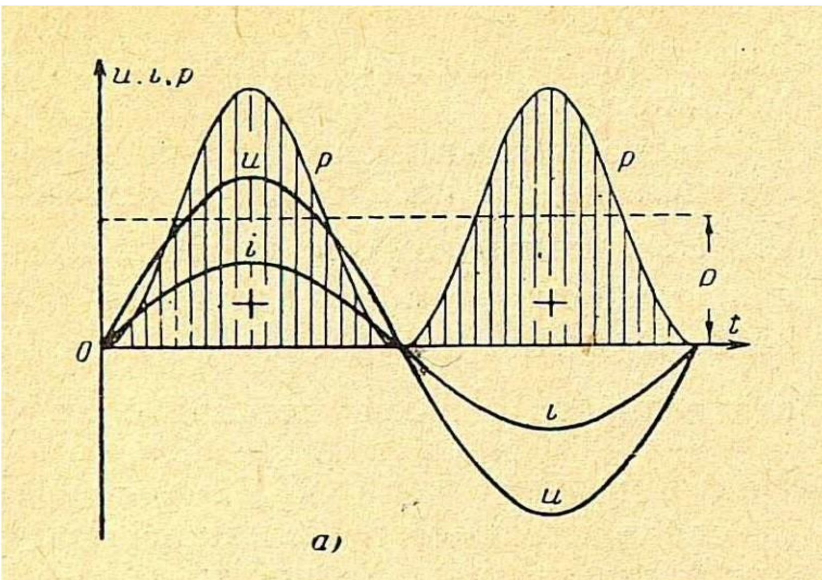


Рисунок 1.3

1.2.Активная мощность.

Среднее значение мгновенной мощности за период называется *активной мощностью* или иногда просто мощностью.

Активная мощность, потребляемая двухполюсником, не может быть отрицательной (иначе двухполюсник не потреблял бы энергию, а генерировал бы её), поэтому $cos\phi \geq 0$.

Активная мощность физически представляет собой энергию, которая выделяется в единицу времени в виде теплоты на участке цепи в сопротивлении R.

Если $u=Um\times sin\omega t$; $i=Im\times(sin\omega t-\phi)$ или

$u=Um\times(sin\omega t+\phi)$; $i=Im\times sin\omega t$ то

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T Im\ Um\ sin\omega t\ (sin\omega t+\phi)\ dt=\frac{Im \text{ x } Um}{2}\times cos\phi \qquad (1.7)$$

Предполагается, что в 1секунду укладывается целое число периодов T. Действительно, произведение $U\ cos\phi = IR$. Следовательно

$$P=U\times cos\phi\times I = I^2R \qquad (1.8)$$

Единица активной мощности – ватт (Вт)

1.3.Полная мощность

Электрические машины и аппараты конструируют для работы при определённых значениях напряжения и тока. Поэтому их характеризуют не активной мощностью, зависящей от сдвига фаз ϕ между напряжением и током, а ***полной мощностью*** представляющей собой произведением действующего значения напряжения и тока.

$$S=U\times I \qquad (1.9)$$

Очевидно, что полная мощность равна наибольшему значению активной мощности, которую можно получить при, заданных напряжении и токе. ***Здесь амплитуда гармонических составляющих мгновенной мощности численно равна полной мощности.***

Размерность полной и активной мощностей одинаковая, однако единицу измерения мощности в применении к полной мощности называют

- вольт- ампер *(ва)*

Это позволяет при численном выражении полной мощности кратко говорить мощность столько - то вольт- ампер, так как наименование единицы (вольт- ампер) сразу же указывает, что речь идёт о полной мощности.

Отношение активной мощности к полной, равное косинусу угла сдвига фаз между напряжением и током, называется *коэффициентом мощности:*

$$\frac{P}{S} = U\times I\times \cos\phi / U\times I = \cos\phi \qquad (1.10)$$

Для лучшего использования электрических машин и аппаратов желательно иметь возможно больший коэффициент мощности или возможно меньший сдвиг по фазе тока относительно напряжения, т.е.

Так, например для питания приёмника мощностью 10 000 *квт* при $\cos\phi$=0,7 источник питания должен быть рассчитан на мощность 14 300 *ква* , а при $\cos\phi$=1 на 10 000 *ква.*

Высокий коэффициент мощности желателен также для уменьшения потерь при передаче энергии по линиям электропередач. При данной активной мощности P приёмника ток в линии тем меньше , чем больше значение cosϕ:

$$I = P/U\times \cos\phi: \qquad (1.11)$$

Графически связь между активной, полной мощностью и коэффициентом мощности можно выразить в виде прямоугольного треугольника (Рис.1.4) – треугольника мощности с катетами P,Q и гипотенузой S. Данный треугольник , стороны которого в произвольно выбранном масштабе равны мощностям S,P, Q называется- треугольником мощностей

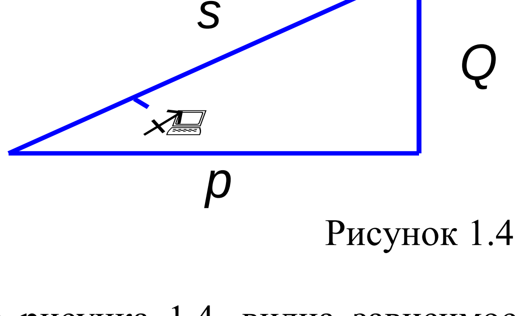


Рисунок 1.4

Из рисунка 1.4. видна зависимость и связь противолежащего катета обозначенного, как Q от угла ϕ характеризующего коэффициент мощности нагрузки.

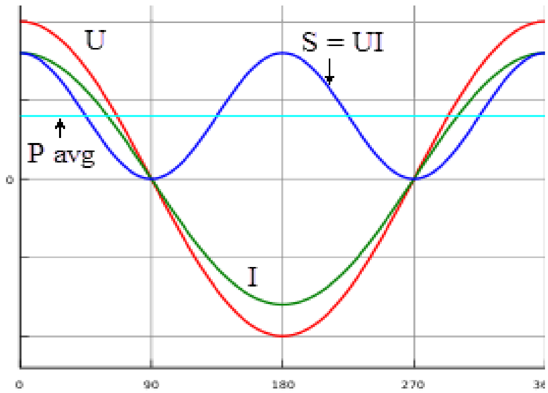
Величину Q принято называть ***реактивной мощностью***

Активная, реактивная и полная мощности связаны соотношениями:

$$S^2=P^2+Q^2; \quad S=\sqrt{P^2+Q^2} \tag{1.12}$$

1.3.1.Рассмотрим на графиках энергетические соотношения мощностей, при различного рода нагрузок в электрической цепи.

а) При отсутствии реактивных элементов и сдвига фаз в нагрузках, мгновенная мощность в полупериоде Um×Im будет максимальной, и в следующем полупериоде произведение отрицательного напряжения с отрицательным током дадут положительный результат – полезную мощность в нагрузке (Рис. 1.5)



φ = 0° sin90° = 0 cos90° = 1

Рисунок 1.5

В этом случае:

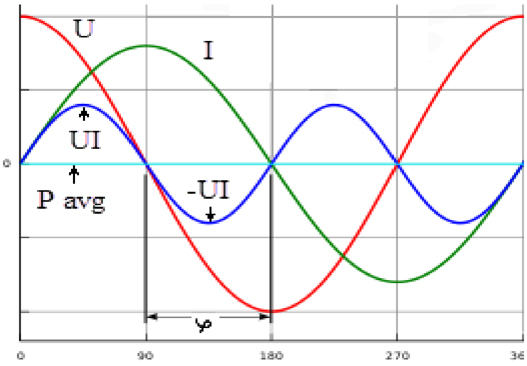
Реактивная мощность $Q = UIsin0 = 0$

Потребляемая мощность $P = UIcos0 = UI$

Полная мощность $S = UI = \sqrt{(P^2 + Q^2)}$ будет равна потребляемой мощности

Коэффициент мощности $P/S = 1$

б) При наличии реактивной нагрузки (на графике индуктивная нагрузка) появляется сдвиг фаз между напряжением и током на угол $\phi = 90^0$ (Рис.1.6)



φ = 90°   sin90° = 1   cos90° = 0

Рисунок 1.6

При отсутствии активной составляющей в нагрузке, сдвиг фаз между напряжением и током составит 90°.

В начале периода, когда напряжение максимально – ток будет равен нулю, следовательно, мгновенное значение мощности *UI* в это время будет равно нулю. В течении первой четверти периода, мощность можно видеть на графике, как произведение *UI*, которое станет равным нулю при максимуме тока и нулевом значении напряжения.

В следующую четверть периода на графике *UI* принимает отрицательное значение, следовательно, мощность возвращается обратно в источник питания. То же самое произойдёт и в отрицательном полупериоде тока. В результате средняя (активная) потребляемая мощность *P avg* за период будет равна нулю.

В таком случае:

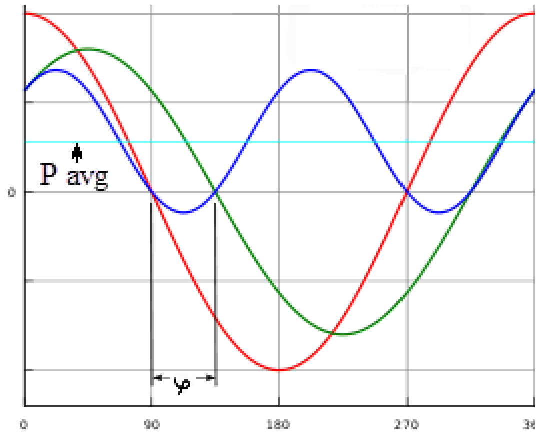
Реактивная мощность $Q = UI\sin 90° = UI$

Потребляемая мощность $P = UI\cos 90° = 0$

Полная мощность $S = UI = \sqrt{(P^2 + Q^2)}$ будет равна реактивной мощности

Коэффициент мощности $P/S = 0$

в) Ниже представлен рисунок графиков со сдвигом фаз 45°, для случая равенства активного и реактивного сопротивлений в нагрузке (Рис. 1.7)



φ = 45° sin45° = cos45° = √2/2 ≈ 0.71

Рисунок 1.7

Здесь:
Реактивная мощность $Q = UIsin45° = 0.71UI$
Потребляемая мощность $P = UIcos45° = 0.71UI$
Полная мощность $S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} = UI$
Коэффициент мощности $P/S = 0.71$

:

Отсюда видно, что для увеличения коэффициента мощности cosϕ нагрузки нужно очевидно, уменьшать её реактивную мощность

Единица мощности - В×А

На щитке любого источника электрической энергии переменного тока (генератора, трансформатора и т.д.) указывается значение S характеризующее ту мощность, которую этот источник может отдать потребителю, если последний работает при cosϕ=1 (т.е. если потребитель представляет собой чисто активное сопротивление).

1.4. Реактивная мощность

В то время как активная мощность определяет (в среднем) совершаемую работу или передаваемую энергию в единицу времени, полная и реактивная мощности не определяют ни совершаемой работы, ни передаваемой энергии в единицу времени. Однако по аналогии с понятием активной мощности в электроэнергетике реактивной мощности приписывают аналогичный смысл, а именно е рассматривают как мощность генерирования, потребления или передачи некоторой условной величины, которую называют реактивной энергией:

$$W_P = Qt \qquad (1.13)$$

Размерность реактивной энергии W_P одинакова с размерностью энергии, но единицу измерения реактивной энергии называют:

вольт- ампер-час (*вар×ч)*

При расчётах электрических цепей, для расчёта полной мощности с учётом приведённого на рисунке 1.4 треугольника мощностей применяется ***реактивная мощность.***

Под реактивной мощностью Q понимают произведение напряжения U на участке цепи на ток I по этому участку и на синус угла ϕ между напряжением U и током I:

$$Q = U \times I \times \sin\phi \qquad (1.14)$$

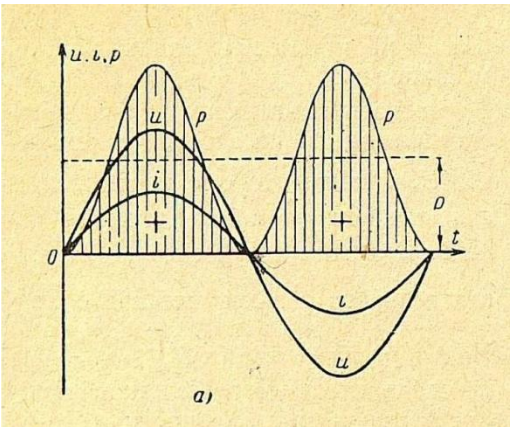
Если $\sin\phi > 0$, то $Q > 0$, если $\sin\phi < 0$, то $Q < 0$

2.1. Физический смысл реактивной мощности

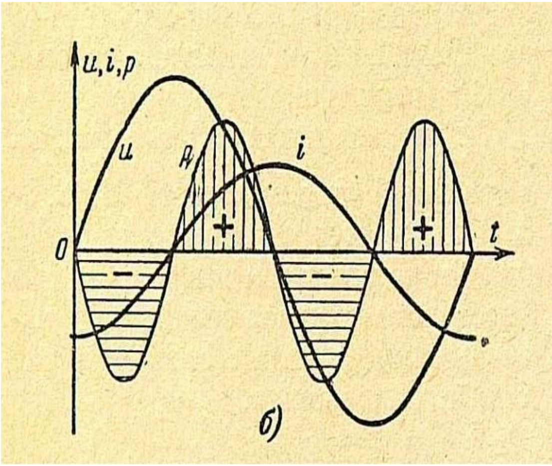
Из рассмотренного материала в первом разделе видно, что источник электрической энергии вырабатывает только активную мощность. Реактивной мощности при выработке электрической энергии у источника, не подключённого к нагрузке либо работающего чисто на активную нагрузку нет. Его активная мощность равна полной мощности.

Реактивная мощность появляется в электрической цепи при появлении сдвига фаз, между напряжением U и током I.на угол ϕ

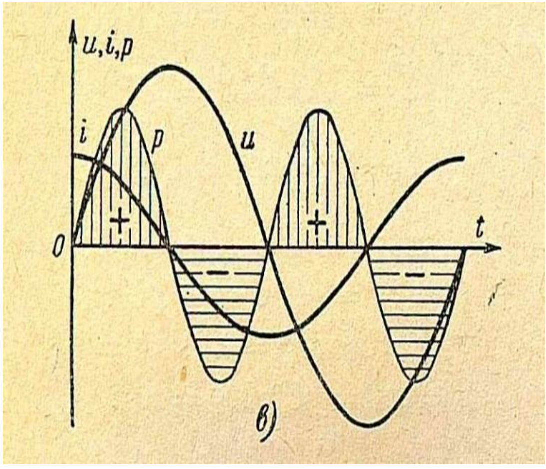
Сдвиг фаз между напряжением U и током I.на угол ϕ происходит при появлении в электрической цепи реактивной нагрузки (индуктивной L либо ёмкостной C). На рисунках 2.1 изображены графики показывающие связь между соотношениями начальных фаз напряжения U и тока I и полной мощностью при активном, индуктивном и ёмкостном сопротивлении в электрической цепи.



а). Активная нагрузка



б) Индуктивная нагрузка



в) Ёмкостная нагрузка

Рисунок 2.1

Рассмотрим, что физически представляет собой реактивная мощность. С этой целью возьмём участок цепи состоящего из генератора электрической энергии с последовательно соединёнными нагрузками , имеющими *R*, *L* и С. (Рис.2.2)

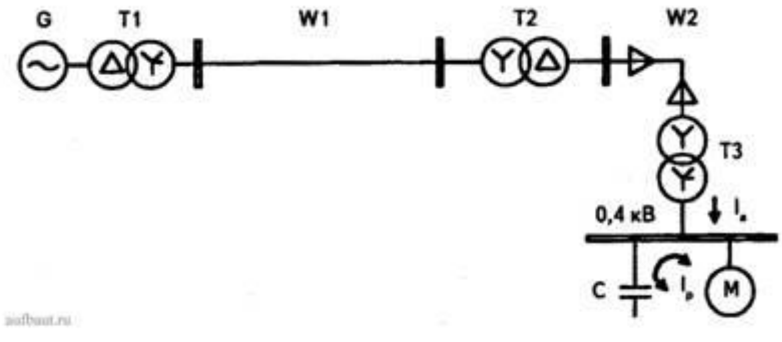


Рисунок 2.2

Пусть по нему протекает ток $i = Im \times \sin\omega t$. Ток, протекая по участку цепи, создаёт переменное электромагнитное поле, которое состоит из изменяющихся во времени и взаимно обуславливающих друг друга электрического и магнитного полей, обладающих энергией электрического и магнитного полей.

Электромагнитное поле оказывает силовое воздействие на электрические заряды, в результате направленного движения которых и протекает наш ток. Силовое воздействие на заряды напрямую зависит от характера сопротивления в цепи нагрузки (активной, реактивной либо комплексной) и описывается уравнениями Максвелла и теоремой Умова-Пойнтинга.

Рассмотрим, чему будет равно мгновенное значение суммы энергий электромагнитного поля:

$$W_{мэ} = W_м + W_э = Li^2 / 2 + Cu^2_c / 2 = LI^2_m / 2 \times \sin^2\omega t + CI^2m / 2(\omega C)^2 \times \cos^2\omega t =$$

$$= LI^2 / 2 \times (1 - \cos 2\omega t) + I^2 / 2\omega^2 C \times (1 + \cos 2\omega t) \qquad (2.1)$$

Из полученного выражения видно, что $W_{мэ}$ имеет постоянную составляющую $W_{мэ0}$, неизменную во времени, и переменную составляющую $w_{мэ}$, изменяющуюся с двойной угловой частотой:

$$W_{мэ} = W_{мэ0} - w_{мэ} \qquad (2.2)$$

где

$$W_{мэ0} = LI^2 / 2 + I^2 / 2\omega^2 C \quad \text{и} \quad w_{мэ} = (LI^2 / 2 + I^2 / 2\omega^2 C)\cos 2\omega t$$

На создание постоянной составляющей $W_{мэ0}$ была затрачена энергия (активная мощность, имеющая положительное значение, показанное в энергетических соотношениях мощностей на рис. 2.1.) в процессе становления данного периодического режима. В дальнейшем при периодическом процессе энергия $W_{мэ0}$ остаётся неизменной и, следовательно, от источника питания не требуется энергия на её создание.

Из этого можно сделать вывод, что при сбалансированном распределении в цепи ёмкостной и индуктивной нагрузок, индуктивная нагрузка потребляет реактивную энергию, а емкостная нагрузка отдаёт запасённую реактивную энергию обратно в электрическую цепь. При этом средняя активная мощность источника активной энергии становится максимальной. Здесь:

$$S = P \qquad \text{и коэффициент мощности } \frac{P}{S} = 1 \text{ (максимален)}$$

Если, же в цепи нагрузки, будет преобладать либо емкостная нагрузка, либо индуктивная, то выработанная реактивная энергия, дважды за период (с двойной угловой частотой, переменная составляющая $w_{мэ}$ (2.2), будет отдаваться источнику активной мощности (энергии) и обратно поступать в источник реактивной энергии (мощности), а для поддержания постоянной составляющей $W_{мэ0}$ от источника активной мощности (энергии), требуется дополнительная энергия, которую будет получать реактивная нагрузка в цепи один раз в период. (Рис.2.1, б, в, положительные значения активной мощности)

При этом источнику активной мощности, потребуется дополнительная мощность, для поддержания постоянной составляющей $W_{мэ0}$ реактивной нагрузки.

Коэффициент мощности источника активной мощности будет зависеть от соотношения в цепи емкостной и индуктивной нагрузок.

2.2. Вывод

Из рассмотренных энергетических соотношений в цепи синусоидального тока мы видим:

- для работы двухполюсника (потребителя электрической энергии), требуется только положительное значение активной мощности P (мощности);

- максимальный коэффициент мощности источника электрической энергии, достигается при отсутствии в двухполюснике (потребителя электрической энергии) нагрузки создающей сдвиг фаз ϕ между напряжением U и током I, либо, при сбалансированной индуктивной и емкостной нагрузок;

- при появлении в электрической цепи несбалансированной реактивной нагрузки , среднее значение активной мощности P уменьшается пропорционально увеличению сдвига фаз ϕ напряжением U и током I;

- когда значение активной мощности принимает отрицательное значение, энергия поступает не в двухполюсник (нагрузку), а возвращается из двухполюсника источнику активной энергии от реактивного источника энергии и обратно в нагрузку с двойной угловой частотой;

- отрицательное значение активной мощности не выполняет никакой полезной работы, а только снижает коэффициент мощности источника электрической энергии;

- в цепи синусоидального тока появляются гармонические составляющие мощности, которые влияют на качество передаваемой электрической энергии;

Энергетические соотношения в электромагнитном поле. Теорема Пойнтинга

Наряду основных свойств электромагнитного поля стоит его энергия. Этот вопрос впервые был проанализирован Максвеллом, который выявил, что вся энергия поля, заключённого внутри объема **V**, сформировывается из энергии электрического поля

$$W_{\partial} = \int_{v} \frac{ED}{2} dV$$

и энергии магнитного поля

$$W_{м} = \int_{v} \frac{HB}{2} dV$$

Подынтегральные выражения в выше изложенных формулах могут рассматриваться, таким образом, как плотности энергии электрического поля

$$W_{\partial} = ED / 2$$

и магнитного поля

$$W_{м} = HB / 2$$

Также из их определений нередко вытекают в электротехнике известные формулы для запасенной в конденсаторе энергии:

$$W_{c} = CU^{2} / 2$$

и в катушке индуктивности

$$W_{L} = LI^{2} / 2$$

Вообще говоря, энергия электромагнитного поля, заключённого внутри объема V, не может быть постоянной.

Следует отнести к числу факторов, ниже описанные явления, которые определяют изменение во времени энергии поля:

- обращение части энергии электромагнитного поля в энергию других типов, к примеру, в механическую энергию, связанную с тепловым движением частиц вещества, определённым протеканием токов проводимости;
- действия других источников, которые могут как уменьшать запас энергии поля, так и увеличивать его в зависимости от заданных условий;
- передача энергии между выделенным объемом, а также окружающими его областями пространства за счёт характерного процесса, свойственного электромагнитному полю и обладающему названием процесса излучения.

В электродинамике, как правило, принято характеризовать интенсивность процесса излучения, обусловливая особую векторную величину в каждой точке пространства, имеющую название вектора Пойнтинга **П**.

Смысл вектора Пойнтинга в физике заключается в том, что его направление и модуль характеризуют размер и направленность в каждой точке пространства потока энергии излучения. Вектор Пойнтинга в системе единиц СИ имеет размерность

$$Дж / с \cdot м^2$$

то есть,

$$Вт / м^2$$

При этом безукоризненный спад энергии, заключенного внутри воображаемого объема **V** с поверхностью **S** электромагнитного поля, определенный излучением и отнесенный к единице времени, равна

$$\oint_S \Pi dS$$

В основе изложенного крайний интеграл должен быть рассмотрен как величина мгновенной мощности излучения, проистекающего по направлению из анализируемого объема в окружающее пространство. Если же знак представленного интеграла отрицателен, то это объясняется тем, что поток энергии излучения устремлён не из объема **V**, а внутрь него. Согласующиеся как с уравнениями Максвелла, так и с законом сохранения энергии, физически правильные результаты выявляются в том случае, если вектор Пойнтинга выразить через мгновенные значения полей

$E(t)$ и $H(t)$

следующим образом:

$$\Pi = \left[EH \right]$$

В самом деле, по теореме Остроградского – Гаусса для рассматриваемой замкнутой поверхности **S** будем иметь

$$\oint_s \Pi dS = \int_v div\Pi dV = \int_v \left(HrotE - ErotH \right) dV$$

Здесь было использовано известное тождество векторного анализа

$$div\left[EH \right] = HrotE - ErotH$$

С учётом уравнений Максвелла

$$rotH = \frac{\partial D}{\partial t} + \sigma E + J_{ст}$$

$$rotE = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\oint_s \Pi dS = \int_v div\Pi dV = \int_v \left(HrotE - ErotH \right) dV$$

приобретает следующий вид

$$\oint_s \Pi dS = -\sigma \int_v \left(EE \right) dV - \int_v \left(J_{ст} E \right) dV - \int_v \left(\frac{\partial D}{\partial t} E + \right.$$

Интеграл вида

$$P_{пот} = \sigma \int_v \left(EE \right) dV$$

может быть именуем мгновенной мощностью потерь, будучи внутри объема **V** за счёт протекания токов проводимости. Иное слагаемое

$$P_{стт} = \int\limits_v \left(J_{ст} E \right) dV$$

обуславливает мгновенную мощность, которая может либо отводиться из рассматриваемого объема сторонними токами, либо вноситься в него в зависимости от взаимной ориентации векторов **J$_{\mathbf{CT}}$** и **E**. Можно сказать, используя электротехнические термины, что источники стороннего тока могут выступать как в образе нагрузок, так и в образе генераторов. Однако если допустить, что в соответствии с материальными уравнениями между векторами поля существует линейная связь

$$D = \varepsilon_a E$$
$$B = \mu_a H$$

то крайний интеграл в правой части формулы

$$\oint\limits_s \Pi dS = -\sigma \int\limits_v (EE) dV - \int\limits_v \left(J_{ст} E \right) dV - \int\limits_v \left(\frac{\partial D}{\partial t} E + \frac{\partial B}{\partial t} H \right) dV$$

обретёт вид

$$\frac{\partial}{\partial t} \int\limits_v \left(\frac{[ED]}{2} + \frac{HB}{2} \right) dV = \frac{\partial}{\partial t} \int\limits_v \left(\omega_\partial + \omega_м \right) dV$$

Тут мы приходим на основании вышеизложенного к интегральному соотношению вида

$$\oint\limits_s \Pi dS = -P_{пот} - P_{стт} - \frac{\partial}{\partial t} \int\limits_v \left(\omega_\partial + \omega_м \right) dV$$

приходящемуся математическим выражением теоремы Пойнтинга. Данная теорема определяет внутри произвольной области, в которой есть электромагнитное поле, факт баланса энергий. Вектор Пойнтинга для значимого в практическом отношении частного случая, в котором поле по гармоническому закону изменяется во времени, может быть выявлен через комплексные амплитуды полей **E** и **H**, поскольку

$$E = \mathrm{Re}\left(\dot{E}e^{j\omega t}\right) = \frac{1}{2}\left(\dot{E}e^{j\omega t} + \overset{*}{E}e^{-j\omega t}\right)$$

$$H = \mathrm{Re}\left(\dot{H}e^{j\omega t}\right) = \frac{1}{2}\left(\dot{H}e^{j\omega t} + \overset{*}{H}e^{-j\omega t}\right)$$

где $*$ - комплексно-сопряжённые величины,

подставив их в формулу

$$\Pi = [EH]$$

получим

$$\Pi = \frac{1}{4}\{[\dot{E}\overset{*}{H}] + [\overset{*}{E}\dot{H}] + [\dot{E}\dot{H}]e^{j2\omega t} +$$

$$[\overset{*}{E}\overset{*}{H}]e^{-j2\omega t}\} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}[\dot{E}\overset{*}{H}] + \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left([\dot{E}\dot{H}]e^{j2\omega t}\right)$$

Слагаемое первое, в части формулы справа, во времени неизменно, в отличие от второго слагаемого, которое изменяется во времени с удвоенной частотой.

Тем самым в электромагнитном поле, изменяющемся во времени по гармоническому закону, ход переноса энергии характеризуется, с одной стороны вещественным вектором, равным средней за период плотности мощности излучении,

$$\Pi_{cp} = \frac{1}{T}\int_0^T \Pi dt = \frac{1}{2}\mathrm{Re}[\dot{E}\overset{*}{H}]$$

и вещественным вектором, который указывает на присутствие колеблющейся составляющей вектора Пойнтинга

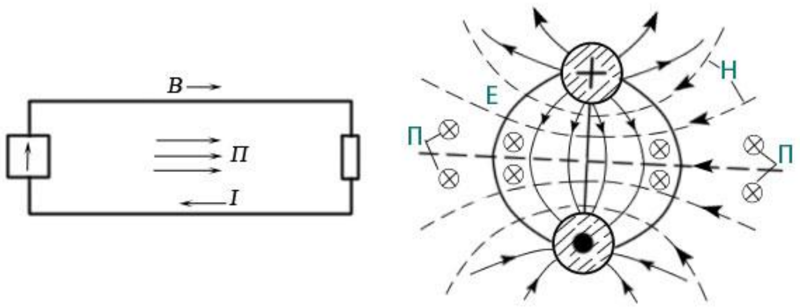
$$\Pi_{кол} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left([\dot{E}\dot{H}]e^{j2\omega t}\right)$$

Необходимо не упускать из виду то, что среднее за период значение вектора $\Pi_{кол}$ равно нулю.

На основе уравнений Максвелла теоретическое рассмотрение и физический опыт позволяют утверждать, что термин «излучение» в узком смысле слова применим лишь к переменным во времени процессам в силу волнового характера распространения электромагнитного поля. С процессом переноса от источника электромагнитной энергии, к примеру, антенны, к любым другим (неважно к скольким) удаленным точкам пространства ассоциация вектора Пойнтинга верна не всегда. Однако правильно описать процесс в системах с неизменными во времени полями передачи электромагнитной энергии нам позволяет введенный вектор Пойнтинга.

В силу примера ниже изображен эскиз двухпроводной линии передачи, в которой от источника постоянной э.д.с. передается энергия к резистивной нагрузке. Также мы можем видеть изображенный характер силовых линий полей **E** и **H**. Далее из рисунка следует, что построен может быть в каждой точке пространства отличный от нуля вектор Пойнтинга П, ориентированный вдоль оси линии от генератора к нагрузке.

Передача энергии электромагнитного поля
от генератора к нагрузке



Принципиальная схема

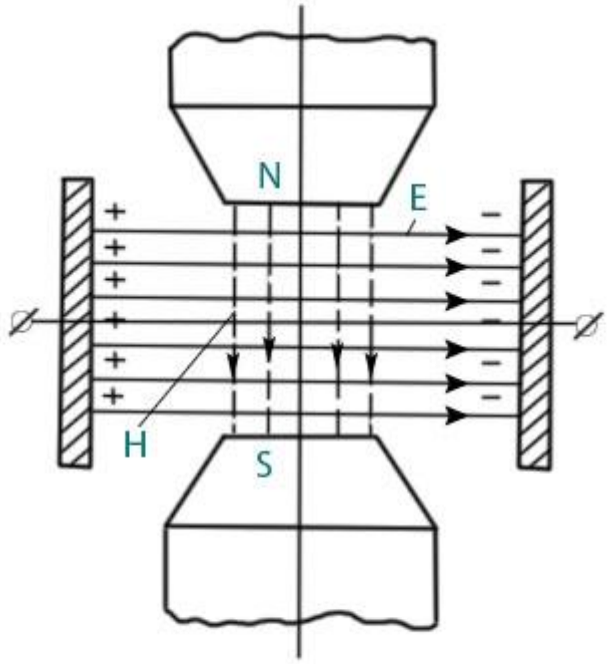
Конфигурация силовых линий поля
в поперечном сечении

Если же по поперечной плоскости в бесконечных пределах проинтегрировать вектор Пойнтинга, то в конечном итоге будет получена величина переносимой мощности, выражаемая как произведение напряжения на нагрузке и протекающего тока в электротехнических терминах.

Заключение возможно будет казаться несколько неожиданным: энергия в данной системе с точки зрения электродинамики переносится не токами, протекающими в проводниках, а в окружающем пространстве электромагнитным полем. Наличие токов и проводников выступает в них как необходимое условие существования полей нужной конфигурации.

Рассмотрим с целью другого интересного примера систему, состоящую из заряженного конденсатора и постоянного магнита, сориентированных сравнительно друг друга так, как показано на изображении:

Система из заряженного конденсатора и постоянного магнита



Поля **E** и **H** тут не параллельны друг другу, это позволит ввести отличный от нуля вектор Пойнтинга **П=[ЕН]** в каждой точке пространства. От того, что рассматриваемые поля статические и токи проводимости не протекают в системе, в соответствии с уравнениями Максвелла

$$rot H = 0$$

$$rot E = 0$$

Откуда

$$div \Pi = 0$$

Тем самым в предоставленной физической задаче векторное поле **П** не обладает источниками; его поток через любую замкнутую поверхность равен нулю, это говорит о постоянстве полной энергии электромагнитного поля во времени, внутри произвольной замкнутой поверхности.

В конце надлежит указать, что иногда вводится комплексный вектор Пойнтинга

$$\dot{\Pi} = \frac{1}{2}\left[\dot{E}\overset{*}{\dot{H}}\right]$$

при анализе гармонически изменяющихся во времени электромагнитных волновых полей обладающий тем свойством, что

$$\Pi_{ср} = \mathrm{Re}\,\dot{\Pi}$$

Видна аналогия между мощностью гармонического колебательного процесса известной из электротехники и комплексным вектором Пойнтинга. Как правило, мнимый вектор Пойнтинга обычно связывают с реактивной энергией электромагнитного поля.