

СДВИГ ПО ФАЗЕ

- А что это так шумит в распределительном щите?
- Это... косинус Фи...

Прежде чем читать дальше, назовите антоним к слову «параллельно»...

Математики обычно говорят «перпендикулярно», а физики – «последовательно».

Валидность теста никчёмная, но для начала разговора он подходит.

Знаете ли вы, что в школе Георг Ом мог учить один предмет или несколько сразу. Ему было параллельно. Напрягался он всё равно одинаково. Если вы поняли о чём речь, то, несомненно, знаете, что при альтернативном типе соединения элементов цепи – последовательном, общее напряжение всегда равно сумме напряжений на её отдельных участках. И это легко проверить на установке, вокруг которой уже собрались любознательные школьники.

Каждому нарисованному элементу схемы соответствует, укрепленный на планшете реальный прибор или устройство¹. Источником тока здесь является трансформатор, к которому параллельно подсоединены две ветви электрической цепи. Верхняя ветвь (1-2-3) состоит из двух, последовательно соединённых лампочек (резисторов). Щёлкнем ключом (K) и протестируем эту ветвь вольтметром². Действительно,

$$U_{13} = U_{12} + U_{23}!$$

А как же сократовское «Я знаю, что ничего не знаю...»? Сейчас устроим!

Обращаем ваше внимание на нижнюю ветвь (1-4-3). Она также состоит из последовательно соединённых элементов – катушки индуктивности и конденсатора.

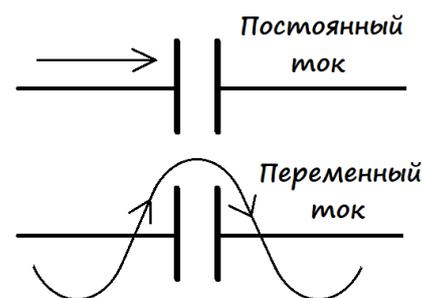
По случаю вспоминается диалог на уроке. Преподаватель спрашивает ученика: «Почему постоянный ток не проходит через конденсатор?» Ученик отвечает: «Ну, ток течёт-течёт по цепи, а на его пути стоит конденсатор, он упирается в его пластины и не проходит!» Преподаватель: «Допустим. А почему тогда переменный проходит?» Ученик: «Ну, так переменный ток имеет синусоидальную форму, он легко перехлёстывает через преграду и течёт дальше». Уверены, что вы бы ответили правильно...

Возьмёмся за вольтметр. Что покажет прибор на этот раз?..

Парадокс! Сумма напряжений на катушке индуктивности (U_L) и на конденсаторе (U_C) значительно больше, чем на всей цепи:

$$U_{13} \neq U_L + U_C !!!$$

Но почему при сложении получается белиберда, а не напряжение на трансформаторе?



¹ В установке использованы: трансформатор, понижающий сетевое напряжение до безопасных 12В; выключатель (K); лампочки накаливания на 6,3В и 3,5В.; дроссель для лампы дневного света индуктивностью $L=1Гн$ и активным сопротивлением 30(Ом); конденсатор ёмкостью $C=14мкФ$.

² Цифровым мультиметром, работающим в режиме вольтметра переменного тока.

Привычное школьное правило не срабатывает. «Ребёнок теряет веру в логику, когда на пасеке его кусает коза». Как такое возможно?

«А если соединить катушку и конденсатор параллельно и измерить токи?» – хватаются за спасительную соломинку зрители.

Но это предложение к «порядку на пасеке» не приведёт, запутает ещё более:

$$I \neq I_L + I_C !!!$$

«Если параллельно колбасе подключить кусок сала, то в целом длина бутерброда не увеличится», – заходит в тупик аналогий особо голодный до правды свидетель происшествия. (Не этот ли сдвиг был анонсирован в названии рассказа?)

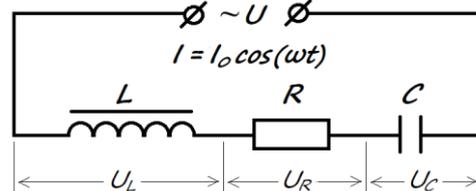
«Это открытие или мы чего-то не понимаем?» – требуют сатисфакции собравшиеся: «Достаточно ос и коз, шутки в сторону. Даёшь, физику!»

Свойство сложных проблем таково, что они имеют лёгкие для понимания неправильные ответы. Пояснения, представленные ниже, весьма конспективны и требуют осмысления.

Начнём с предварительных замечаний.

В цепи 1-4-3 мы имеем не два, а три последовательно соединённых элемента. Дело в том, что провод, которым намотана катушка, обладает не только индуктивностью, но и сопротивлением. Наш «невидимка» – резистор!

Если напряжение на элементах изменяется по гармоническому закону (\sin , \cos), то так же изменяется и ток. Согласно закону сохранения заряда, в любой момент времени на любом участке мгновенные значения токов будут одинаковы $I_R = I_L = I_C = I_0 \cos(\omega t)$. Здесь I_0 – амплитуда силы тока, $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота, ν – частота переменного тока, t – время.

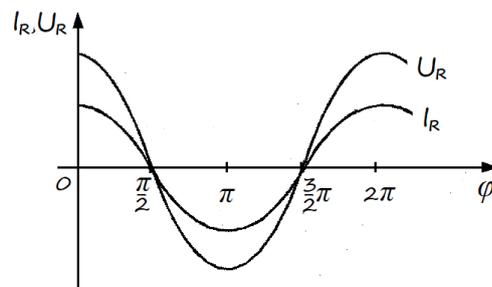


По второму правилу Кирхгофа, напряжение источника будет равно сумме падений напряжений на элементах цепи: $U = U_R + U_L + U_C$.

Откроем папку с досье на героев нашей электротехнической истории.

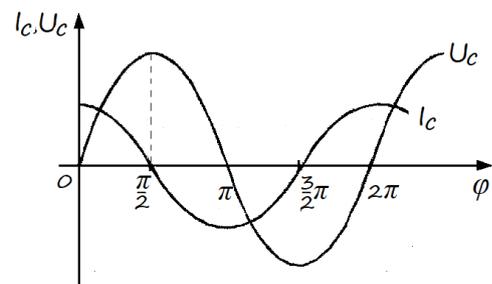
Её сиятельство Лампочка.

Оказывает любому току (и постоянному и переменному) активное сопротивление: электроэнергия в ней преобразуется лишь в тепловую энергию. Значение R определяется исключительно свойствами проводника, оно не зависит ни от тока, ни от момента времени, поэтому ток на нём совпадает по фазе с напряжением (они одновременно достигают своих максимальных значений). $U_R = I_0 R \cos(\omega t)$, где $U_0 = I_0 R$ – амплитуда напряжения.



Его накопительство Конденсатор.

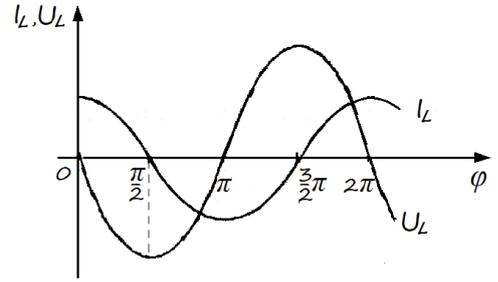
Электроэнергия в нём преобразуется в энергию электрического поля. При подаче переменного напряжения на пластины конденсатора, заряд на них непрерывно меняется (этим можно объяснить кажущееся прохождение через него переменного тока). Ток через конденсатор возникает сразу, а напряжение отстаёт от него по фазе на $\pi/2$ (напряжение достигает своего максимума позже тока на четверть периода). $U_C = I_0 R_C \cos(\omega t - \pi/2)$. Наблюдается, так называемый, сдвиг фаз (ϕ). Это «чудо» происходит от того, что конденсатор в цепи пе-



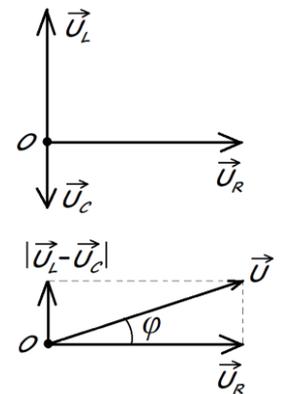
ременного тока обладает реактивным³ «емкостным» сопротивлением $R_C = 1/\omega C$.

Её неспешная изменчивость Катушка Индуктивная.

Преобразует электроэнергию в энергию магнитного поля. При замыкании ключа в цепи, напряжение на катушке появляется практически мгновенно, а ток (из-за самоиндукции) запаздывает (индуктивность аналогична инертной массе в механике). $U_L = I_0 R_L \cos(\omega t + \pi/2)$. Колебания напряжения на катушке опережают по фазе колебания силы тока на $\pi/2$ (напряжение достигают своего максимума раньше тока на четверть периода). Причина в реактивном характере катушки – её «индуктивном» сопротивлении $R_C = \omega L$.



Для лучшего понимания и наглядности представления процессов, изменяющихся по гармоническим законам, физики придумали метод векторных диаграмм. Воспользуемся им для графического изображения величин U_R , U_C , U_L с помощью вращающихся векторов амплитуды колебаний⁴. Ощетиним диаграмму тремя стрелками! Все они вращаются в одном направлении с одинаковой циклической частотой (ω), поэтому их взаимное расположение неизменно. Сдвиг по фазе между напряжениями на индуктивности и ёмкости равен π , они находятся в противофазе. Позволим шутку: «Противофаза – это когда жарить блины на кухне, бегаешь в комнату смотреть фильм, и каждый раз нарываешься на рекламу».



Наше следствие выходит на заключительный этап. Отвечайте быстро: «Пять плюс семь будет Адиннадцать или Одиннадцать?..» Сложение «привычных» скалярных величин даёт двенадцать (не наш случай). Нам же для нахождения амплитуды общего напряжения необходимо векторное сложение...

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$$

Осуществите это действие, и вам станет понятно, почему в опыте вольтметр показал разность напряжений $U_{13} \approx U_L - U_C$! Заметим, что равенство выполнялось приблизительно из-за наличия у катушки небольшого активного сопротивления⁵.

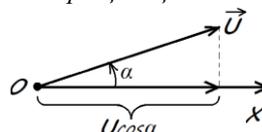
Результат опыта объясняется выполнением закона Ома для цепи переменного тока: $I_0 = U_0/Z$, где $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$ – полное (комплексное) сопротивление. Не будем лишать вас возможности сделать открытие: попробуйте самостоятельно получить эту формулу, произведя векторное сложение, расписав напряжения и «причесав» результат.

Зададимся вопросом, что произойдёт, если реактивные сопротивления катушки и конденсатора сравняются...

Закон предсказывает, что полное сопротивление цепи уменьшится до минимума (R), а амплитуда силы тока станет максимальной. Возникнет, так называемый, резонанс

³ Не активным.

⁴ Если вектор \vec{U} привести во вращение относительно точки O против часовой стрелки с циклической частотой ω , то проекция этого вектора на ось Ox будет изменяться по закону: $U = |\vec{U}| \cos \alpha = |\vec{U}| \cos(\omega t)$. Таким образом, достигается эквивалентность вращающегося вектора и гармонического закона.



⁵ Рассчитайте значения реактивных сопротивлений и сравните их с активным сопротивлением катушки.

напряжений⁶! Нечто подобное (резонанс токов) наблюдается, например, когда параллельно электродвигателю подсоединяют конденсатор определённой ёмкости... Один реактивный элемент компенсирует действие другого и... эффективность работы устройства повышается.

«Так о чём же шумит в распределительном щите косинус фи?» – вспоминается эпиграф. Косинус фи желает сообщить нам о том, что:

- без него не обходится ни один сдвиг по фазе;
- он связан с активным и реактивным сопротивлением нагрузки соотношением⁷
 $\cos\varphi = R/Z$;
- его второе имя – «коэффициент мощности», ведь от него зависят активная мощность в цепях переменного тока $P = IU\cos\varphi$ и КПД потребителей.

Согласитесь, что первичное знакомство требует дальнейшего основательного продолжения. У (греческих) электриков один закон – или на щите, или под щитом. Пусть эти слова послужат девизом для тех, кто пойдёт дальше.

10.05.19

⁶ Получите формулу для резонансной частоты.

⁷ Получите его, воспользовавшись геометрическими построениями метода векторных диаграмм.