

Резонанс для "чайников".



Автор: Gorlum

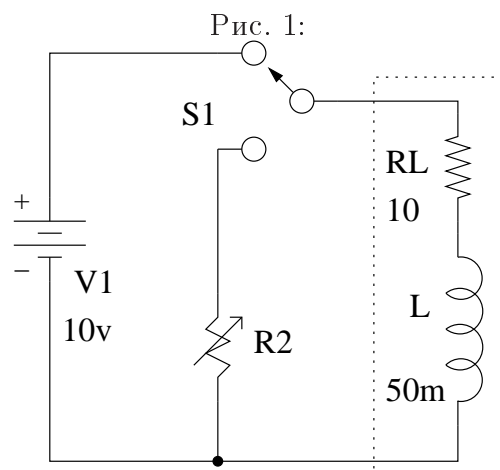
28 июня 2007 г.

Аннотация

Поскольку на "сверхединичных" форумах резонанс присутствует постоянно, а суть явления ясна далеко не всем, возникла необходимость разобраться с ним подробно. С позиций накопления и преобразования энергии. Причём не применяя ни одной формулы. То есть будем считать что читатель видел открытый учебник физики, но редко и издавека. А вот паяльник он иногда в руках держал и способен отличить катушку от конденсатора.

Колебательный контур состоит из элементов способных накапливать энергию. А посему разберёмся, какую энергию, как они её накапливают и как отдают.

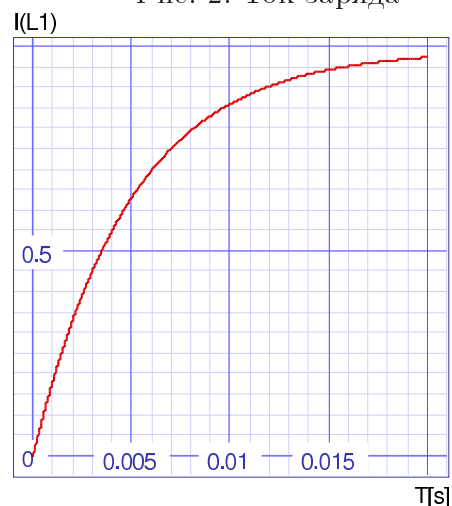
Сначала разберёмся с индуктивностью. Для чего замоделируем вот такую несложную схему. Индуктивность у нас реальная (почти) - имеет активное сопротивление.



Подаём напряжение. Ток в катушке нарастает, причём довольно медленно. Это её особенность номер один - индуктивность не позволяет току быстро нарастать. И это не обязательно миллисекунды. В катушке приличного размера (полметра на полметра) время нарастания тока может быть больше минуты! Сопротивление катушки в первый момент времени велико, но это "не настоящее" омическое сопротивление. Так проявляет себя ЭДС самоиндукции направленная против ЭДС вызывающей ток в катушке - по закону эквивалентности такая противонаправленная ЭДС равносильна сопротивлению.

Факт медленного нарастания тока (магнитного поля) может оказаться важным при изготовлении импульсных двигателей-генераторов (Адамса, бедины и т.п.) критичных ко всякого рода запаздываниям.

Рис. 2: Ток заряда



Разрядим нашу индуктивность на сопротивление. На графике видно, что, с одной стороны, величина напряжения на нагрузке весьма зависима от величины сопротивления оной (как у очень плохой батарейки), а с другой стороны при $R_2=20\text{ Ом}$ это напряжение в два раза превысило напряжение питания. Это превышение может быть и в тысячи раз (если разряжать на высокоомное сопротивление), оно зависит от параметра катушки называемого добротностью. А посему вывод: при заряде катушки важна величина тока и неважно, каким напряжением он создаётся. Можно сказать - мы заряжаем катушку током.

Посмотрим на ток через нагрузку. Он, в первый момент, не зависит от величины сопротивления и равен току до которого мы зарядили катушку. И это главное свойство индуктивности - ток через неё не может мгновенно изменить свою величину. Если мы попытаемся это сделать быстро повысив сопротивление цепи (например - разорвав цепь), индуктивность "выработает" высокое напряжение но сохранит ток неизменным (проскочит искра).

Есть и ещё одна "странность" - если обычная батарейка дольше работает на высокое сопротивление, то индуктивность наоборот - ток медленнее спадает при низком сопротивлении.

Рис. 3: Разряд.

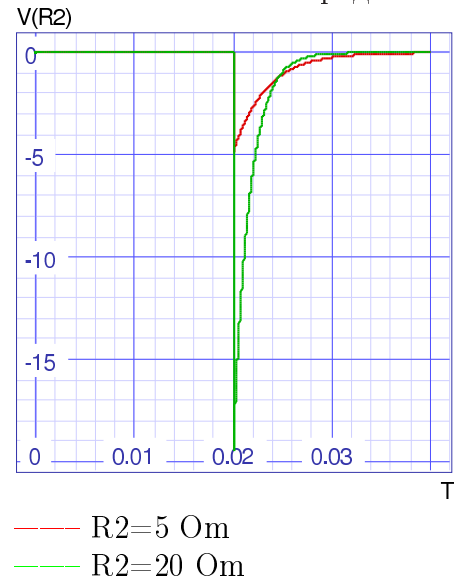
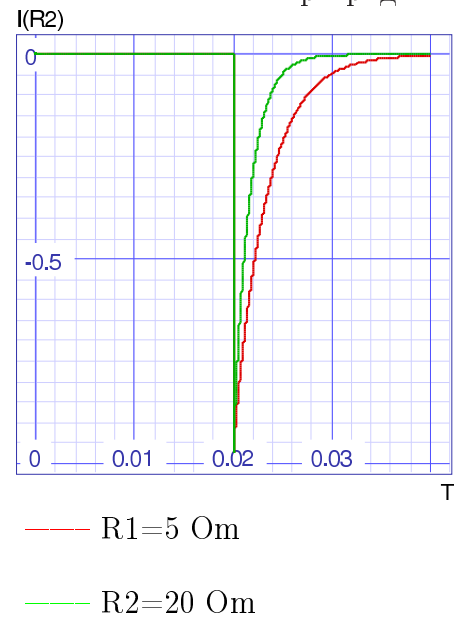


Рис. 4: Ток разряда



Однако если мы можем иметь от 10-и вольтовой батарейки хоть 100 вольт, а ток при этом не меняется, то возможно мы имеем прирост мощности и от этой батарейки можем зажечь 100 вольтовую лампочку? Может это уже сверхединичность?! :) Смотрим на график: действительно в нашем случае уже есть прирост мощности в два раза.

Тут надо разобраться с понятием мощности и энергии. Когда говорят мощность - то не имеют в виду время, в течении которого она существует, это просто некая мгновенная величина. Если же мощность существует некое время то речь идёт уже об энергии, и это время играет весьма важную роль в расчётах энергии.

Посмотрим, как с балансом энергии в нашем устройстве...

Мда- а-а... Затратили 0,15 получили 0,015. Вот тебе и сверхединичное устройство... У паравоза КПД выше. А можно ли улучшить это соотношение?

Рис. 5: Мощность

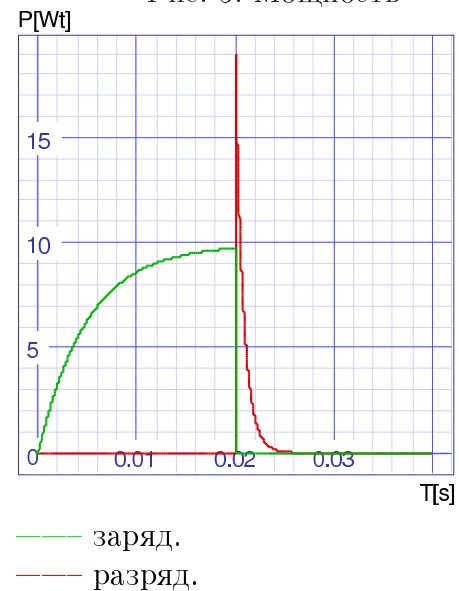


Рис. 6: Энергия



Можно, если заряжать индуктивность за более короткое время. Для этого нужно увеличить напряжение источника. Баланс мощностей в этом случае выглядит хуже чем в предыдущем...

...а вот баланс энергии гораздо лучше: затратили 0,027 получили 0,016.

Теперь разберёмся с зарядом/разрядом конденсатора. На сей раз конденсатор у нас будет идеальным, а источник близок к реальному - с внутренним сопротивлением 100 Ом, то есть он может выдать максимальный ток 100 мА.

Рис. 7: Мощность при заряде коротким импульсом
P[W]

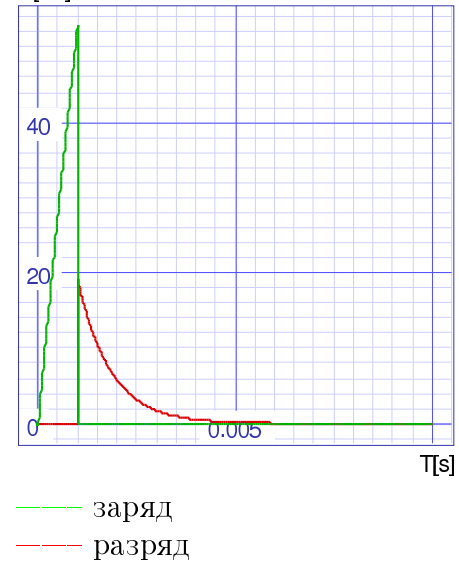


Рис. 8: Энергия при заряде коротким импульсом
A

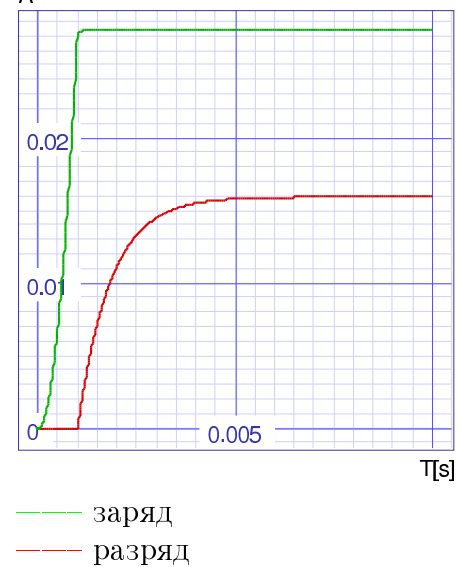
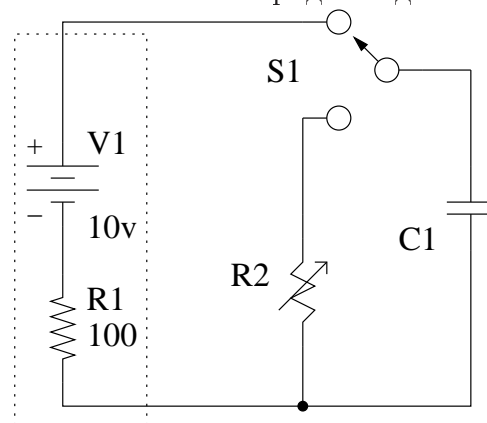


Рис. 9: Заряд гконденсатора



Характер тока от источника при заряде ёмкости противоположен таковому при работе на индуктивность - в первый момент бросок тока в максимум (какой только может дать батарейка), затем плавно достигает нуля при достижении на ёмкости напряжения нашего источника. То есть в первый момент времени сопротивление конденсатора минимально, затем плавно повышается до бесконечности. Как и в случае индуктивности это сопротивление "не настоящее" и связано с ростом напряжения (на конденсаторе) направленном против заряжающей ЭДС.

В отличие от индуктивности напряжение на нагрузке, в первый момент, не зависит от её сопротивления (конденсатор ведёт себя как очень хорошая батарейка), зато зависит скорость разряда. Главное свойство конденсатора - напряжение на нём не может измениться мгновенно.

Если попытаться резко изменить напряжение на конденсаторе, например замкнув его на малое сопротивление, то он, чтобы сохранить своё напряжение "выработает" большой ток. В нашем случае этот ток в 10 раз превышает ток, который способна дать наша батарейка. При заряде конденсатора не важно каким током он заряжается (при меньшем токе увеличивается только время заряда), но важно до какого напряжения он зарядится.

Рис. 10: Ток заряда

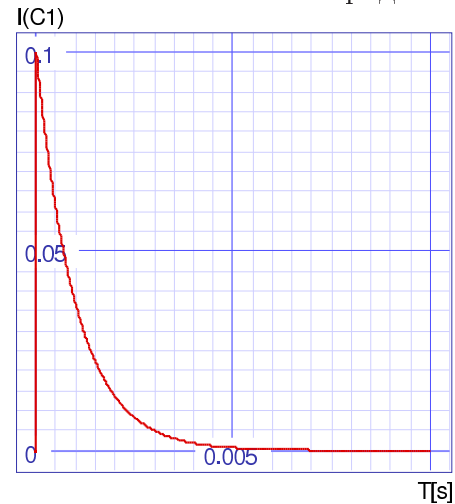


Рис. 11: Напряжение на нагрузке V(R2)

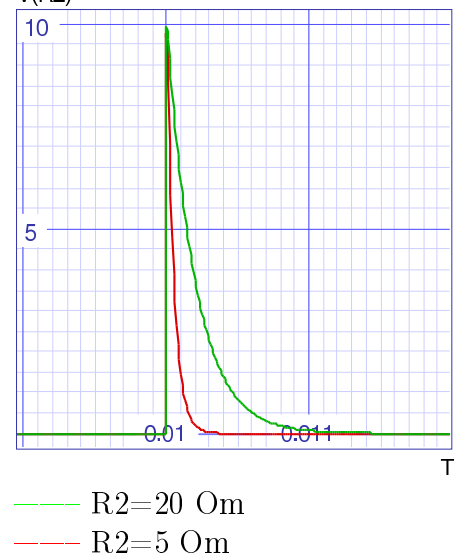
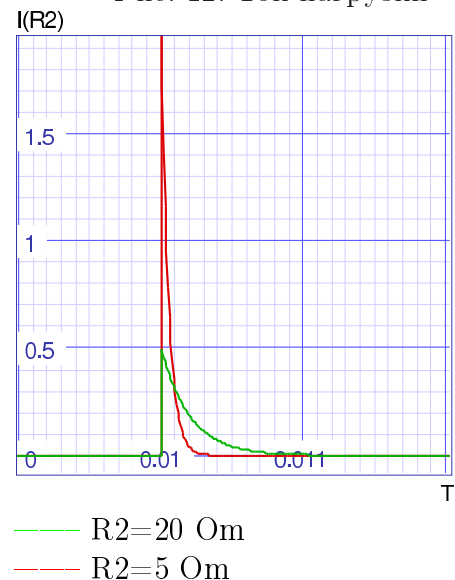
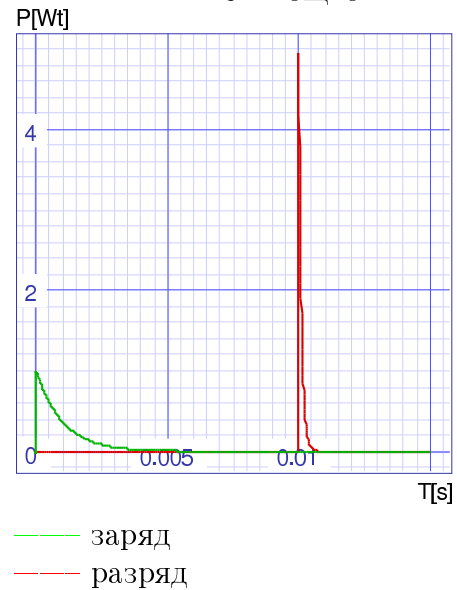


Рис. 12: Ток нагрузки I(R2)



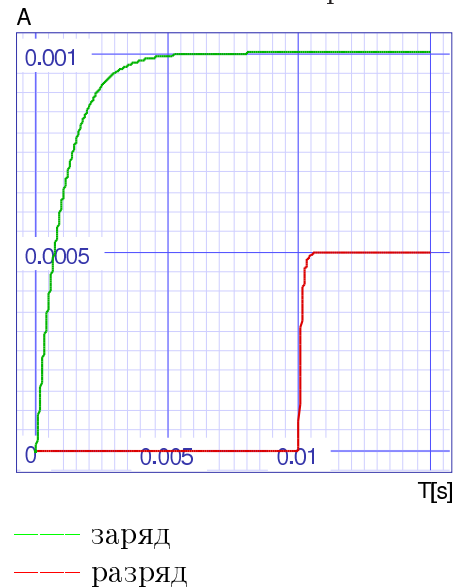
Мы опять имеем прирост мощности, только на сей раз за счёт увеличения тока. И можно зажечь лампочку с большим токовым потреблением, которая от нашей батарейки не загорится. Правда, на весьма короткое время... Но может на сей раз повезёт, и вот она, сверхединичность :)

Рис. 13: Мощность



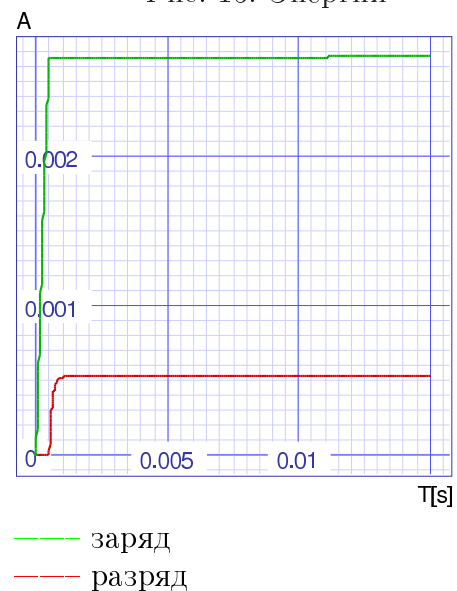
Увы... вкладываем 0,001 получаем 0,0005. А если попробовать как с индуктивностью улучшить баланс зарядив ёмкость коротким импульсом?

Рис. 14: Энергия

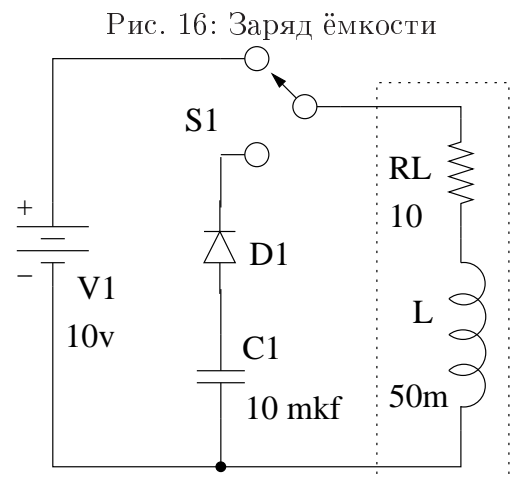


Ну вот... с быстрой зарядкой только хуже вышло. Вложили 0,0029 получили 0,0005. Получается, конденсатор энергетически выгоднее заряжать дольше.

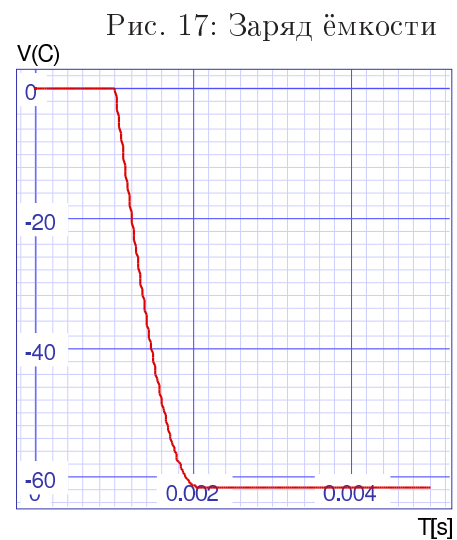
Рис. 15: Энергия



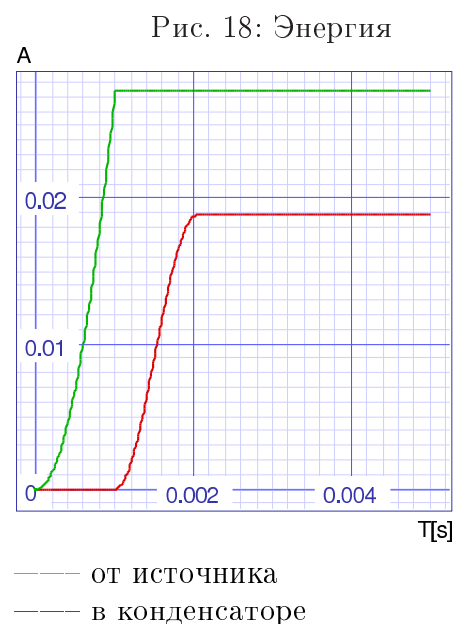
А если предложить конденсатор, как нагрузку при разряде индуктивности? Рост сопротивления конденсатора по мере заряда вынудит катушку создавать высокое напряжение, конденсатор же в свою очередь позволит затем отдать в нагрузку большой ток. Поскольку нас пока интересует только заряд поставим диод, что бы не допустить колебаний.



Действительно, нам удалось зарядить конденсатор до напряжения выше напряжения питания. Причём с обратной полярностью. А как с балансом энергии?



Увы, баланс опять не в нашу пользу. Хотя если сравнить с Рис.8 ситуация всё же лучше.



А что если разрядить катушку на уже заряженный (в соответствующей полярности) конденсатор? Встречная ЭДС по закону эквивалентности будет воспринята катушкой как ещё большее сопротивление, и она ещё больше должна увеличить напряжение на конденсаторе.

Так и есть. Правда теперь катушка добавила меньше 60 вольт - сказывается низкая добротность. Но главное - катушка способна добавлять энергию в уже заряженный конденсатор.

Конденсатор и катушка "созданы друг для друга" - конденсатор способен создать приличный ток для катушки, катушка - создать большое напряжение на конденсаторе.

Разряжаем катушку на конденсатор. Собственно, классический колебательный процесс. Существует он благодаря тому, что индуктивность и ёмкость хранят энергию в разных формах, и в момент, когда ток в индуктивности максимален напряжение на конденсаторе равно нулю и, следовательно, его сопротивление минимально и не мешает току индуктивности. В свою очередь при максимальном напряжении на конденсаторе катушка имеет высокое сопротивление (в этот момент ток через неё равен нулю и она стремится сохранить это состояние, что равносильно высокому сопротивлению).

Рис. 19: Дозаряд ёмкости

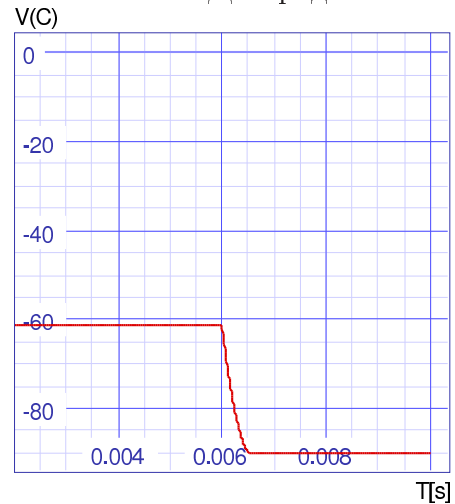


Рис. 20: Разряд на ёмкость

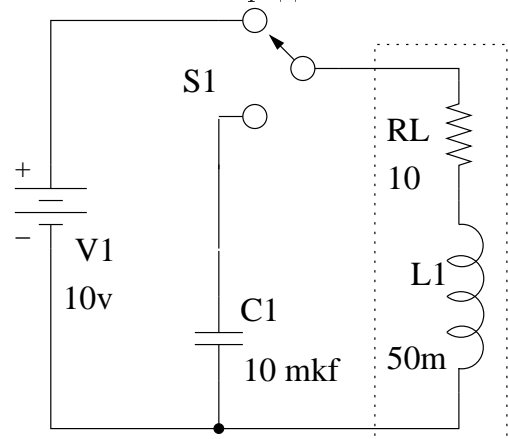
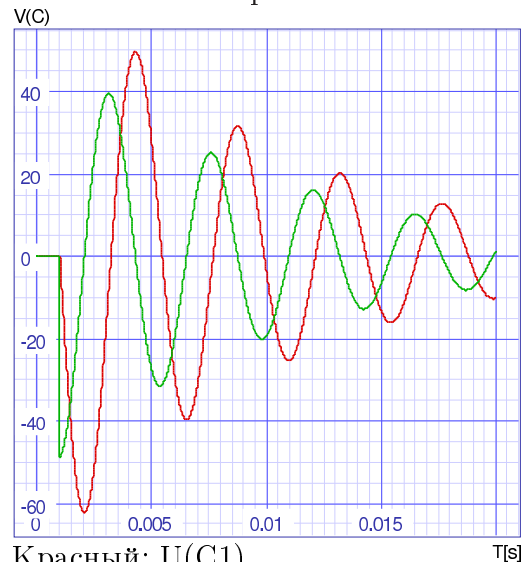


Рис. 21: Напряжение и ток



Красный: $U(C1)$

Зелёный: $I(L1)$

Поскольку энергия постоянно перебрасывается между ёмкостью и индуктивностью (на графике энергии хорошо виден этот процесс) ток в контуре не совпадает с напряжением на нём. И пока вся энергия находится в индуктивности конденсатор будет незаряжен и в этот момент можно кратковременно подключить к нему источник и зарядить его. Хотя в момент заряда параллельно ему включена индуктивность, она не будет мешать заряду конденсатора, поскольку за короткое время заряда ток через неё не успеет вырасти.

Рис. 22: Энергия в контуре

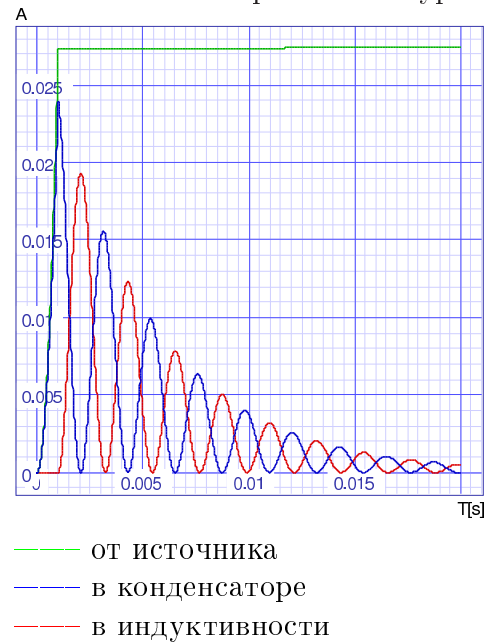
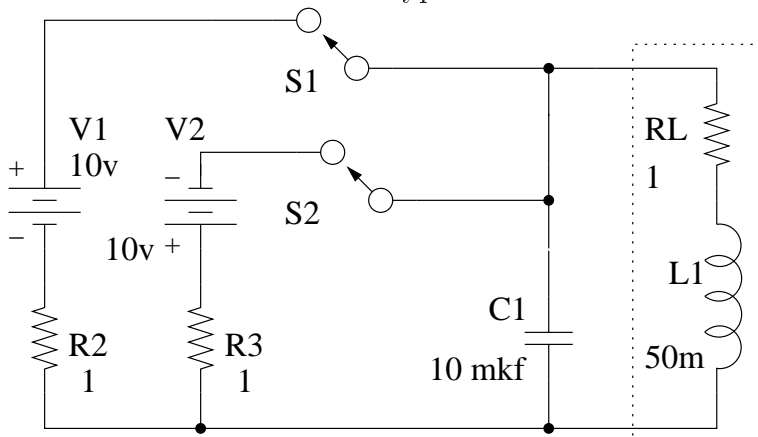


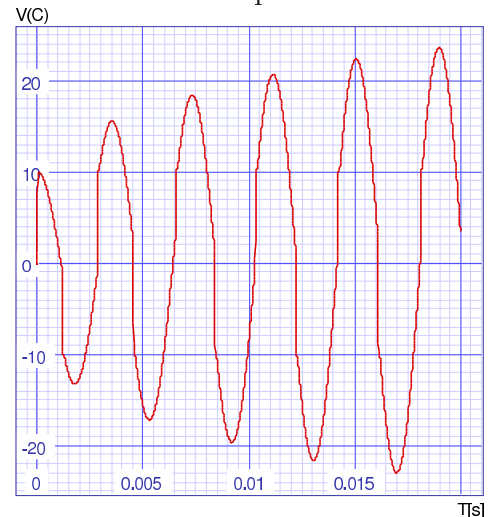
Рис. 23: Раскачка контура



Манипулируя ключами по очереди будем заряжать конденсатор в моменты, когда напряжение на нём равно нулю.

Собственно, классический рост напряжения в резонансном контуре. Каждый импульс заряжает ёмкость до 10 вольт, индуктивность добавляет остальное.
А баланс энергии?

Рис. 24: Напряжение на C1



С балансом совсем нехорошо. Причём с каждой закачкой потери увеличиваются. Положение наверху можно улучшить подобрав элементы и длительность импульса накачки. Однако уже ясно, что резонансным процессом, на который делают ставку во многих проектах свободной энергии, можно не только улучшить но и начисто уничтожить сверхединичность - если ввести в схему колебательный контур с неподходящими величинами элементов, ведь одну и ту же резонансную частоту можно получить с разными номиналами L и C .

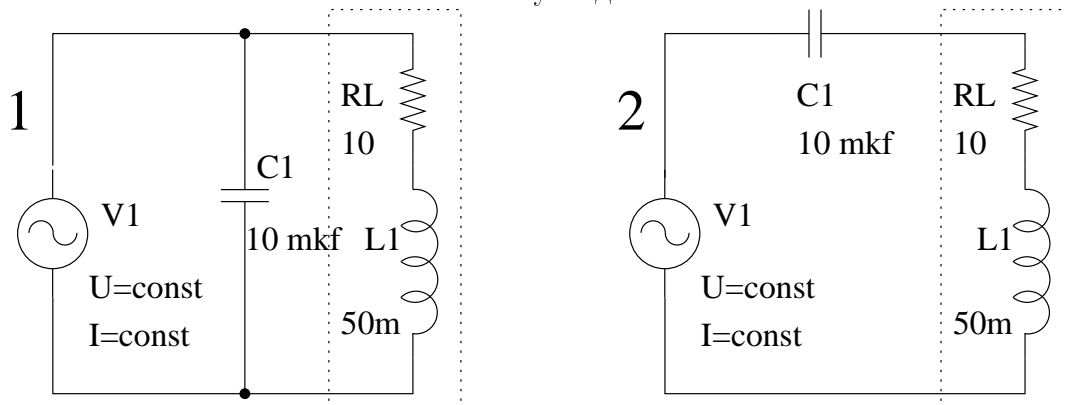
Рис. 25: Энергия в контуре



В случаях, которые мы рассмотрели, источник подключается к контуру на короткое время и его влияние процесс резонанса минимально. А что если источник синусоидальный и включен в цепь контура? Своим сопротивлением он будет влиять на него (активное сопротивление включенное последовательно или параллельно с контуром вызывает потери и снижает резонанс), а ЭДС в элементах контура будут восприниматься источником как сопротивление, большее или меньшее - в зависимости от включения.

Разберёмся. В электротехнике принято различать два типа источников - источник напряжения (внутреннее сопротивление равно нулю, напряжение на его выводах не зависит от нагрузки, ток зависит от нагрузки и может быть любой величины), и источник тока (внутреннее сопротивление бесконечно велико, его ток не зависит от нагрузки, напряжение на его выводах зависит от нагрузки и может быть любой величины). В свою очередь источник может включаться параллельно элементам контура (параллельный резонанс) или последовательно с ними (последовательный резонанс). Рассмотрим все варианты.

Рис. 26: Питание от синусоидального источника.



1 - параллельный резонанс, 2 - последовательный резонанс

Посмотрим как будет выглядеть зависимость тока от источника и напряжение, скажем, на конденсаторе от частоты для всех случаев.

Параллельный резонанс от источника напряжения.

Рис. 27: Напряжение на C1
 $V(C1)$

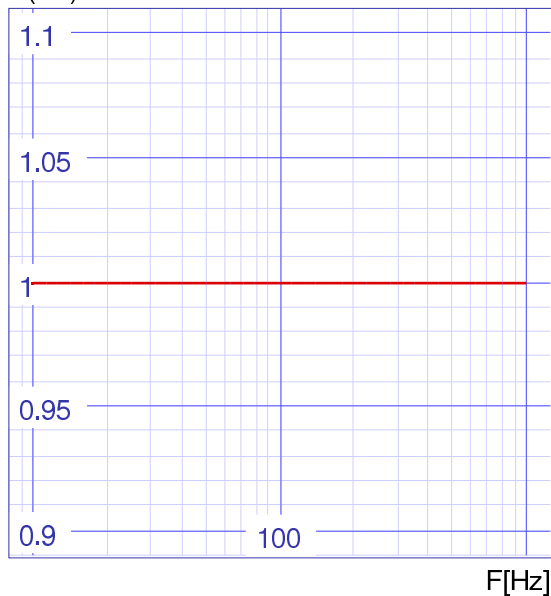
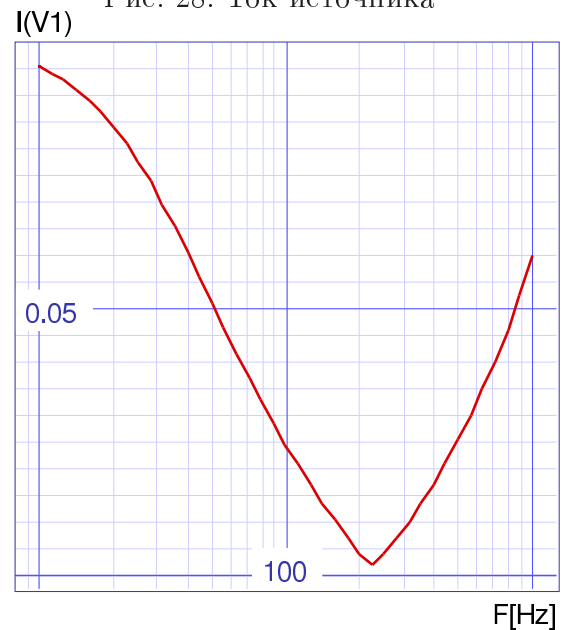


Рис. 28: Ток источника
 $I(V1)$



Ни напряжение на C1 при работе от источника напряжения ни ток при работе от источника тока не имеют, естественно, признаков резонанса, поскольку зафиксированы самими источниками. При параллельном резонансе источнику противостоят встречно направленные ЭДС индуктивности и напряжение на конденсаторе, к тому же одинаковые по величине и по направлению, что воспринимается им как постоянное большое активное сопротивление. В результате ток потребляемый от источника падает, хотя между элементами контура может достигать большой величины (ведь там циркулирует приличная запасённая энергия). Но острый резонансный пик отсутствует, сказывается низкое сопротивление источника, которое шунтирует контур.

Параллельный резонанс от источника тока.

Рис. 29: Напряжение на C1
 $V(C1)$

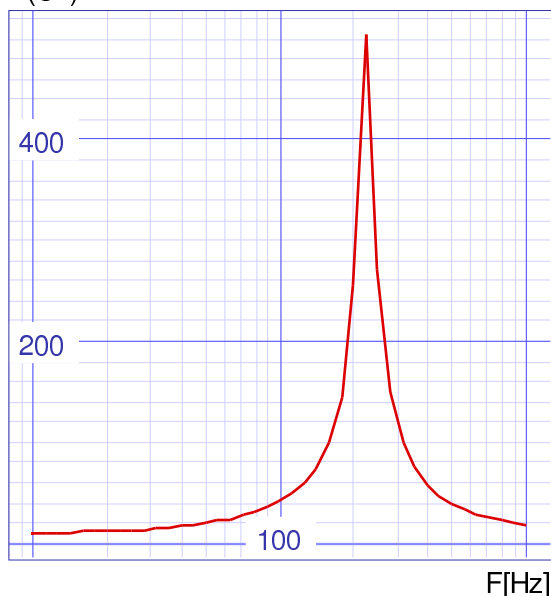
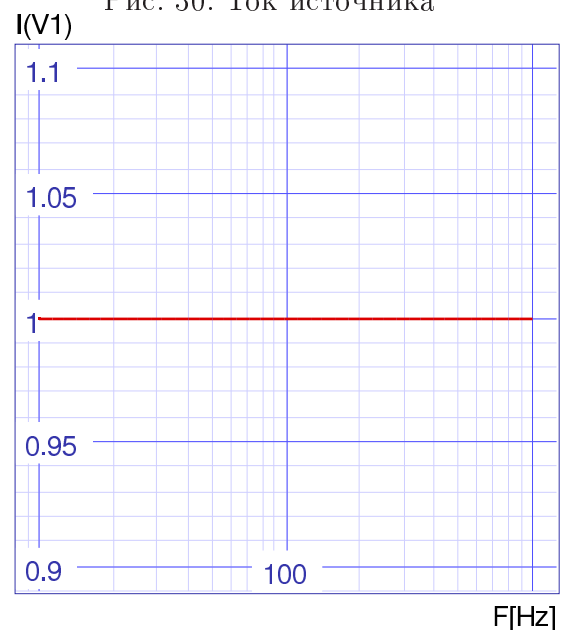


Рис. 30: Ток источника
 $I(V1)$



Высокое эквивалентное сопротивление контура "заставляет" источник тока выдать высокое напряжение, а высокое сопротивление источника не мешает контуру. Результат - отличная резонансная кривая.

Последовательный резонанс от источника напряжения.

Рис. 31: Напряжение на C1
V(C1)

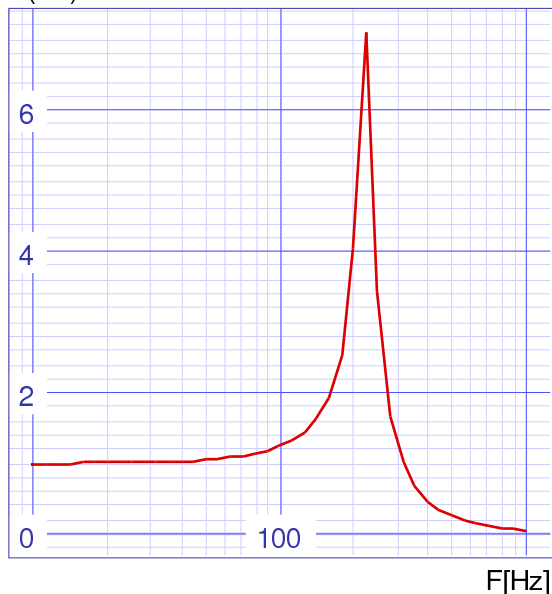
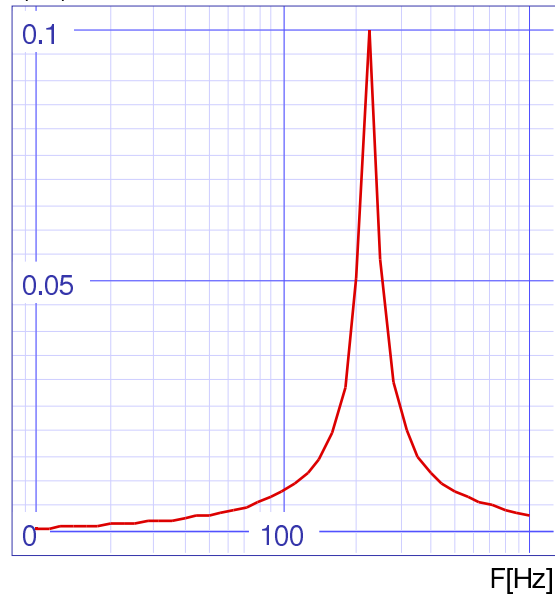


Рис. 32: Ток источника
I(V1)



Здесь источник включён последовательно и можно считать что его внутреннее сопротивление суммируется с собственным сопротивлением индуктивности. Но поскольку внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю, резонансу ничего не мешает работать и прилично увеличить напряжение на C1:) В свою очередь источнику "противостоят" ЭДС элементов контура, но направленные встречно, а поскольку при резонансе они равны, они "взаимоуничтожаются". Ток увеличивается.

Последовательный резонанс от источника тока.

Рис. 33: Напряжение на C1
V(C1)

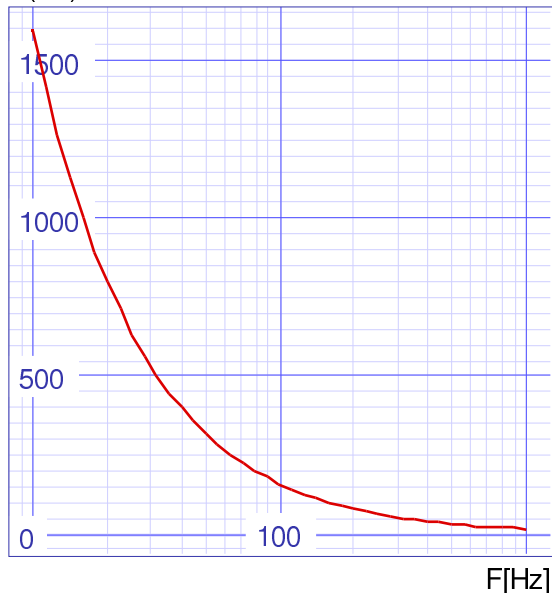
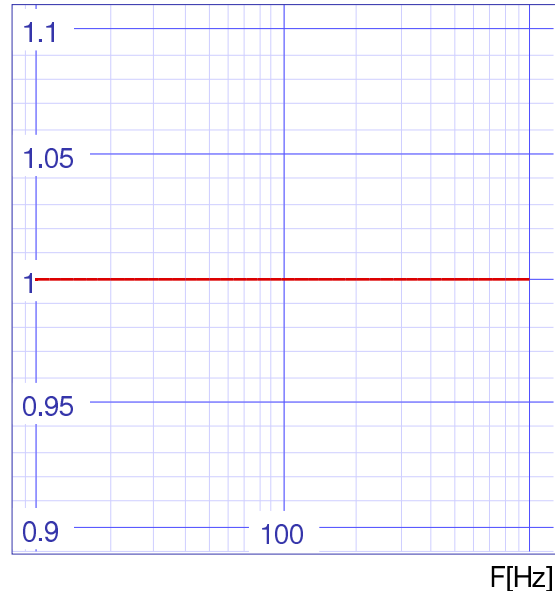


Рис. 34: Ток источника
I(V1)



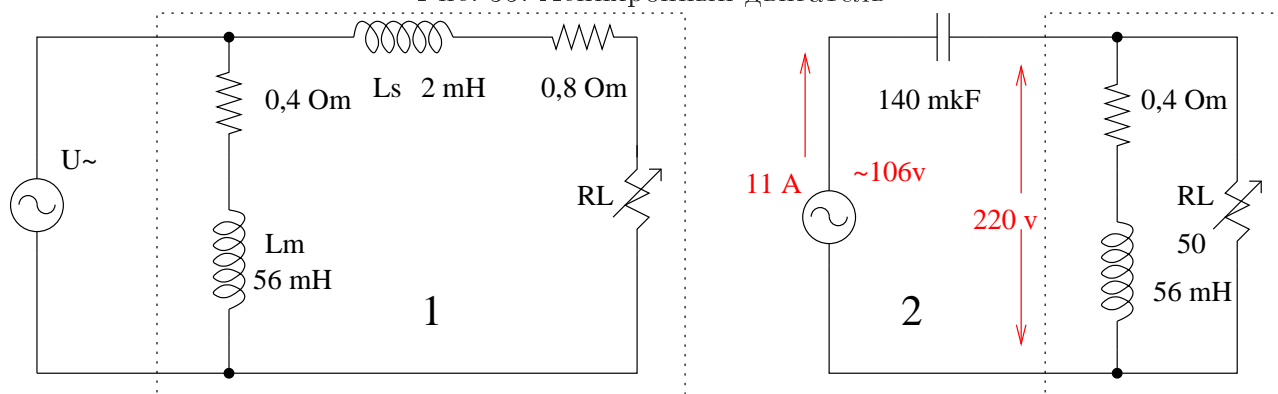
Высокое сопротивление источника тока включенное последовательно с элементами контура делает своё дело - резонанс отсутствует.

В реальности, конечно нет 100% источников тока и напряжения, и, что ещё хуже, бывает весьма трудно определить сопротивление источника, которое к тому же само может иметь индуктивный или ёмкостной характер, а посему непонятно, какую схему лучше применить в конкретной ситуации. Результат - то резонанс не идёт "где надо", то идёт "где не надо"...

Хорошо, конечно, загнать энергию в контур, но надо её оттуда ещё и достать. Разберёмся, как это можно осуществить для случая последовательного резонанса. Лучше всего это проделать рассмотрев старую, но весьма живучую схему - "резонансный двигатель Мельниченко".

Для тех, кто не в курсе: асинхронный двигатель с последовательно включенным конденсатором в резонансе. Согласно легенде после приличного падения напряжения в сети так был включен двигатель циркулярной пилы, которая прекрасно заработала. Пришедший электрик был сильно удивлён, поскольку измерения показали, что от сети отбирается мощность, значительно меньше потребляемой двигателем. Впоследствии Мельниченко удивлял японцев демонстрируя вентилятор, довольно быстро вращающийся от маленькой батарейки.

Рис. 35: Асинхронный двигатель



Вот так выглядит схема замещения некоего асинхронного двигателя (1). Здесь L_m - индуктивность намагничивания, именно она входит в резонансный контур, L_s - индуктивность рассеяния, R_L - нагрузка на двигатель.

Если пренебречь, за малостью, индуктивностью рассеяния и включить резонансный конденсатор, получится схема (2). Сразу видно, что от нагрузки на двигатель возникает два неприятных момента:

- изменение нагрузки изменяет резонансную частоту;
- уменьшается сам резонанс как таковой.

Причём последнее весьма неприятно, поскольку если в резонанс можно подстраивать, то после номинальной нагрузки на двигатель от резонанса вообще ничего не остаётся :(И это общее правило - полезная нагрузка, подключенная (в любом виде) к электрическому устройству эквивалентна включению в схему этого устройства активного сопротивления. Что, увы, всегда пагубно скажется на резонансе, и может свести на нет любую "резонансную идею".

Ну хорошо, двигатель можно и не нагружать на номинал, и получить вполне приличный резонанс. Например, циркулярной пиле не подавать доски быстро. В этом случае напряжение на двигателе действительно возрастает, доски пилятся, а подошедший электрик намеряет своим тестером то, что показано на (2) красным цветом (действующее значение). И будет сильно удивлён, поскольку потребляемая мощность $10,6 \text{ A} \times 106 \text{ V} = 1166 \text{ Вт}$, а на двигателе $10,6 \text{ A} \times 220 \text{ V} = 2420 \text{ Вт}$...

Пока электрик разбирается с вопросом при помощи пива притащим осциллограф и посмотрим как там ток с напряжением... Ага, их фазы сдвинуты между собой, а значит просто перемножать их действующие значения нельзя, это всё равно, что умножать ток который есть "сегодня" на напряжение, которое было "вчера". Тестер, увы, не показывает фазу измеряемого, и мы просто перемножив действующие значения вместе с энергией идущей на полезную работу посчитали и энергию накопленную в контуре и циркулирующей между его элементами. Такая общая мощность называется "полной". Её часть, идущая на полезную (или бесполезную :) работу называется "активной или полезной мощностью", а та часть, которая запасается в реактивных элементах (индуктивность, ёмкость) и не куда не расходуется (у нас она просто "бегает" между L и C) называется "реактивной мощностью". На нашей схеме полезная нагрузка представлена активным сопротивлением и можно посчитать полезную мощность: 968 Вт. Таким образом КПД составляет 83%.

Рис. 36: Ток и напряжение



"Сверхединичного двигателя" у нас не получилось, но потребляемый ток без конденсатора будет 5,4 А (при 106 В), и это в основном реактивный ток, периодически запасаемый индуктивностью двигателя и возвращаемый в сеть, полезная мощность на нагрузке 225 Вт и КПД=39%. Таким образом добавление конденсатора действительно позволяет поднять полезную мощность и КПД, но только при малой нагрузке на двигатель и при этом увеличивается потребление тока от источника. Собственно, в примерах с Мельниченко, так оно и происходило: циркулярной пиле доски можно подавать медленно, а вентиляторная нагрузка нелинейна - до определённого числа оборотов она двигатель почти не нагружает. В обычной практике конденсаторы ставят параллельно двигателю, добиваясь тем самым увеличения КПД за счёт снижения потребляемого тока - это называется "компенсация реактивной мощности", при этом двигатель по прежнему потребляет большой ток, но теперь это ток между конденсатором и двигателем (то есть обмен запасаемой энергией теперь не с сетью, а с конденсатором).

Рассматривая всё это я совсем не хочу "убить" саму идею резонансного мотора. Конечно процессы в реальном двигателе куда сложнее, чем в простейшей модели. Но это означает, что если сверхединичность там и возможна, то только за счёт неких совсем уж малоизученных процессов. Резонанс, как таковой, если и нужен, то только как вспомогательный процесс, а сама "сверхединичная идея" должна быть в чём то другом. И это касается не только двигателей. Весьма распространённое в "сверхединичных форумах" бездумное пихание резонанса куда только можно наносит больше вреда и отвлекает мысль от изучения глубинных процессов в сторону прямолинейных и неэффективных решений.

Рис. 37: КПД

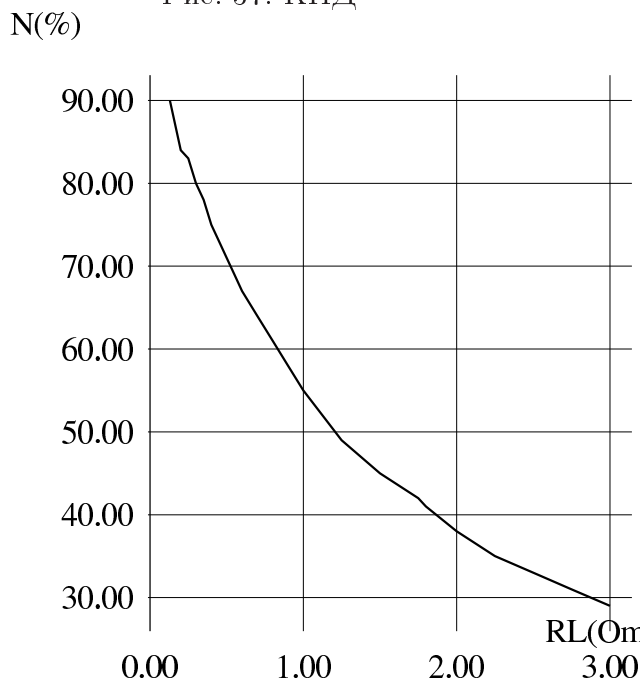
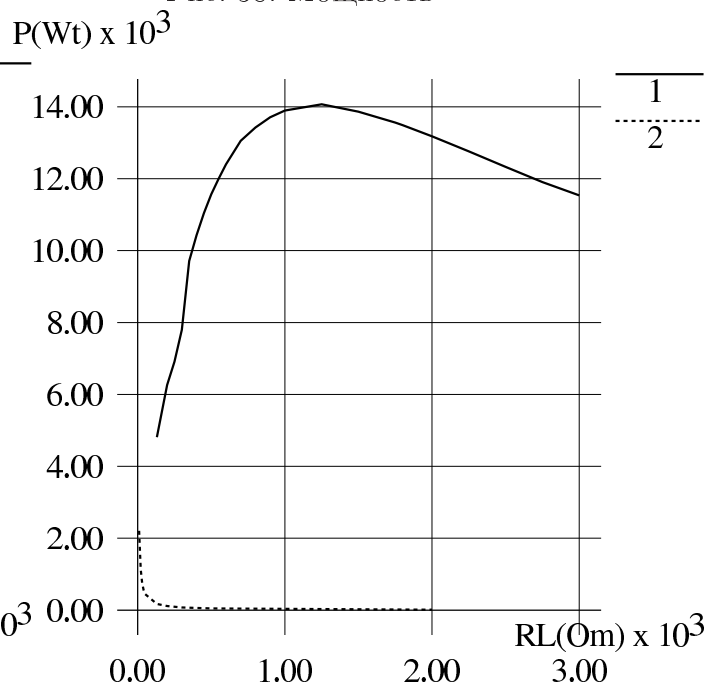


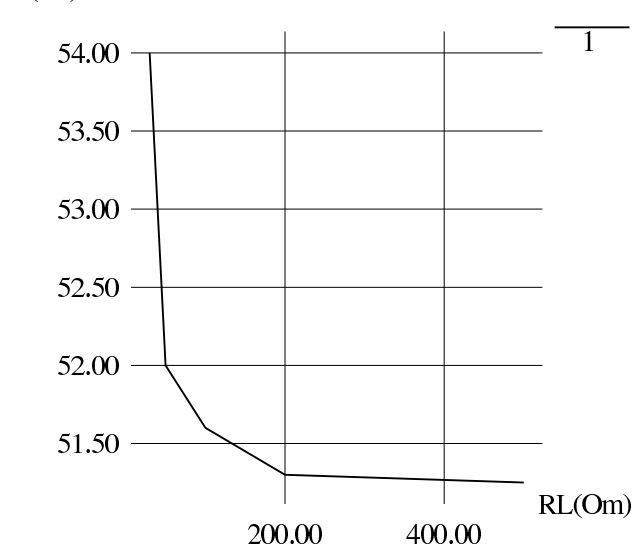
Рис. 38: Мощность



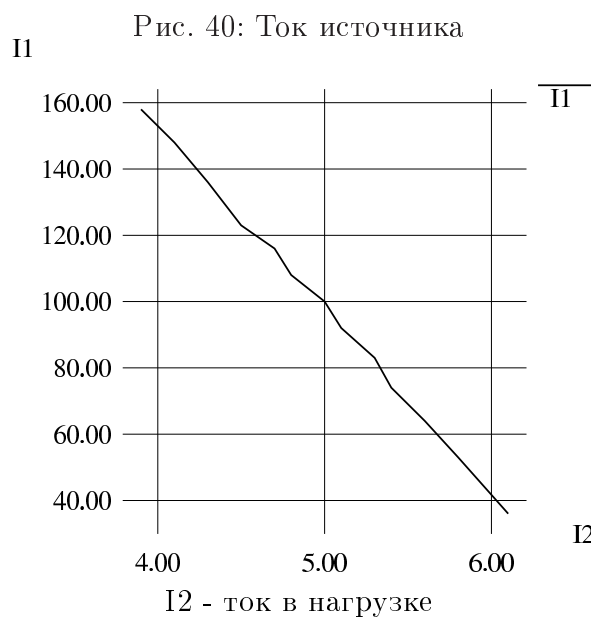
А как зависит КПД и мощность выделяемая на нагрузке в нашем случае (последовательный резонанс и нагрузка параллельно индуктивности)? На Рис.38: 1 - мощность в нагрузке при резонансе, 2 - мощность выделяемая в той же нагрузке, если она напрямую подключена к источнику питания. Мощность ведёт себя непривычно - с увеличением сопротивления она не падает, а растёт (поскольку рост сопротивления приводит к увеличению добротности контура, и, следовательно к росту напряжения на нагрузке), причём есть некое оптимальное сопротивление. К сожалению этот рост сопровождается падением КПД (с увеличением добротности сопротивление контура падает и ток от источника растёт), и при максимальной мощности КПД всего 50% (однако для резонансного двигателя это КПД значительно выше, чем для обычного двигателя в таких же условиях). Поэтому резонансные двигатели могут работать в небольшом нагрузочном диапазоне: при большой нагрузке на валу резонанс пропадает, при малой напряжении на двигателе достигает недопустимой величины.

Влияние же сопротивления нагрузки на резонансную частоту (которое обычно считают главным препятствием при работе с резонансом) весьма неравномерно и серьёзно сказывается только при малом сопротивлении.

Рис. 39: $F_{res}[Hz]$



Влияние сопротивления нагрузки на добротность контура приводит к ещё одному необычному эффекту - при увеличении тока нагрузки ток от источника уменьшается (на некотором участке).



За бортом остались весьма интересные вещи:

- А можно ли раскачать контур нерезонансной и не кратной ей частотой?
- А бывают контура с двумя частотами?
- А если элементы контура меняют свои величина в такт с резонансом?
- А что такое феррорезонанс?
- А можно собрать инверторный сварочный аппарат на параметрическом резонансе?
- А если параметрический, то обязательно резонанс?
- А стохастический резонанс способен аккумулировать энергию?