

Трансформатор со встречными обмотками

Для исследования были использованы двойные катушки, намотанные в навал из эмалированного провода, сечением провода 0,5 мм, с сердечником от ТВС. Длина каждой катушки примерно 5...7 метров. Как шунт для измерения тока использовалось переменное сопротивление типа **ППБ-25**, номиналом 15 Ом, где выставлялось значение 1...2 Ом, где намотка на бочонок компенсирует индуктивность нихрома на ВЧ, что правильно отображает ток в импульсах, т.к. не создает дополнительной индуктивности измерительного (токового) шунта. На рис.1 показаны используемые элементы в схеме. Мультиметр для измерения напряжения (V) использовался самый обычный, популярной и бюджетной 830 модели.

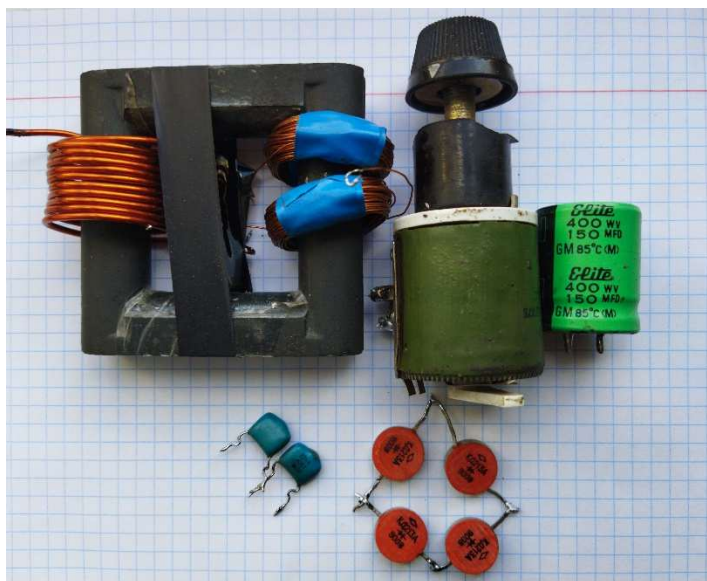


Рис.1.

Осциллограф использовался **Hantek DSO5102P** (с полосой пропускания до 100 МГц), без заземления корпуса (был обрыв сделан земляного провода в питающей розетке), чтобы минимально влиять емкостью корпуса осциллографа на схему. Он обозначен на схемах прямоугольными значками. Второй осциллограф был использован портативный **ZEEWEI DSO2512G**, где нет никакой связи с землей, т.к. он работает на аккумуляторе, с полосой пропускания 50 МГц. Он обозначен круглыми значками на схемах, когда используется.

Для питания схемы использовал источник не стабилизированного питания, где на выходе трансформатора **ТС-80-4** стоит мостовой выпрямитель (на схемах не показаны), после которого установлен сглаживающий конденсатор **Сф= 100 мкФ** (на схеме показан). Напряжение холостого хода (XX) блока питания **Упит= 10,14 В** (под нагрузкой оно просаживается). Напряжение может меняться в зависимости от напряжения сети.

Подавал питание в трансформатор через силовой ВЧ МОП- транзистор, работающий в ключевом режиме (VT1- транзистор **IRFPG30**), управляемый от генератора на схеме **TL494** (типовая схема на TL494+ драйвер для МОП транзистора **IR4427**, не инвертирующий).

Принципиальная схема показана на рис.2. **Одноименные выводы обмоток во всех опытах показаны плюсами.**

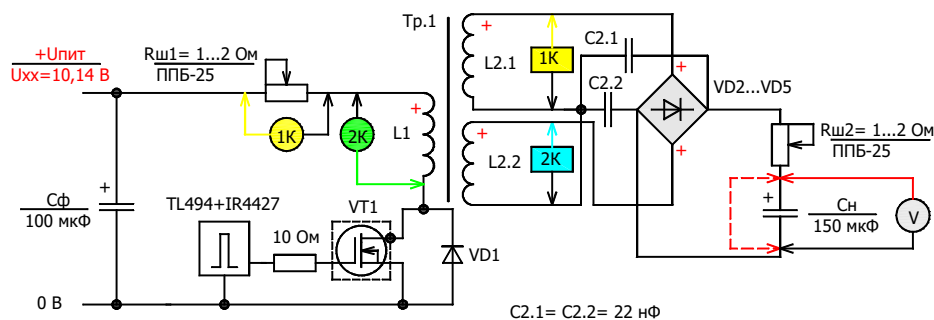


Рис.2.

Импульсы специально между собой разнесены по времени, чтобы наблюдать процессы и их затухание. Притом **зарядка Cн происходит только при наличии емкости C2.1 и C2.2** (достаточно одной емкости, любой из двух), **без них зарядка не происходит совсем**.

Источник был настроен по длине импульса по времени, чтобы в **резонанс** работать с частотой контуров L2.1C2.1 и L2.2C2.2. Это было определено экспериментальным образом, по току в первичной обмотке, где наблюдается сначала синус. Сначала показаны графики для закороченной емкости Cн (перемычка красная пунктирная линия подключена).

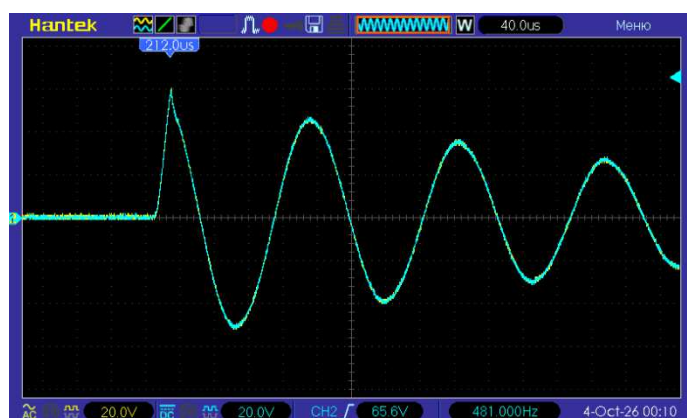


Рис.3.

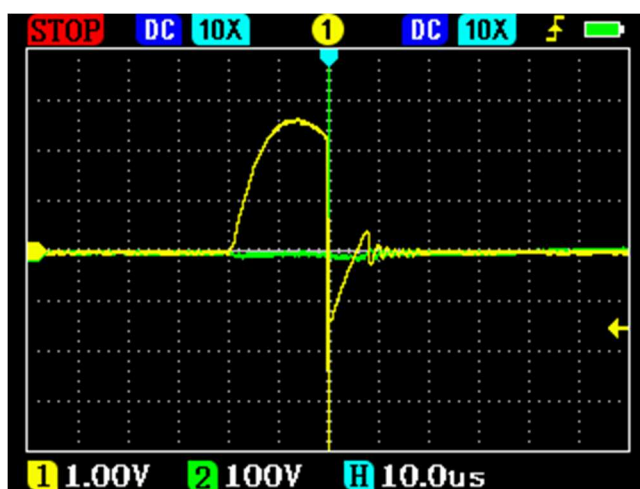


Рис.4.

Как видим на рис.3 прежний импульс полностью затухает к началу нового импульса от генератора. На рис.4 видим, что ток (желтый график) сначала растет, потом падает в резонансе, но падает не до нуля, поскольку на LC резонанс накладывается индуктивный (линейный ток первичной обмотки трансформатора). Если сделать импульс по времени больше, то этот линейный ток становится виден. **Настройка в резонанс генератора важна, так как это дает максимум энергии на выходе системы.**

Емкость C_n заряжается такой схемой до 100 В за 19...20 сек. Ниже показаны графики, снятые при напряжении $C_n=100$ В.

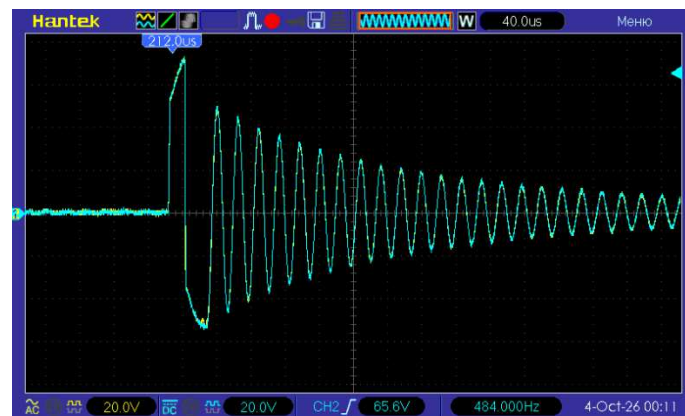


Рис.5.

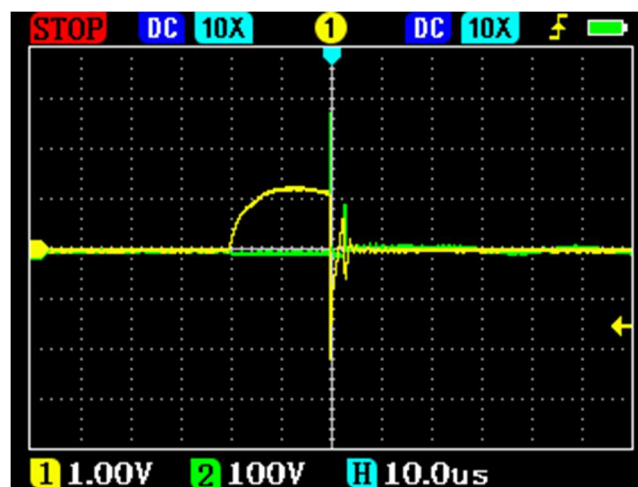


Рис.6.

На рис.5 мы видим появляются два импульса на вторичных обмотках трансформатора, прямой и обратный, которые заряжают емкость C_n , что будет ниже показано и измерено. Остаточные (затухающие) колебания это энергия, которая остается во вторичной обмотке, поскольку емкость C_n имеет накопленное напряжение, когда энергии выходной обмотки не хватает для открытия диодов мостового выпрямителя, поэтому остаточная энергия затухает в обмотке. В данном случае это потери, впрочем, для классической схемы трансформатора тоже самое (см. далее).

На рис.6, на желтом графике мы видим, что ток при $C_n=100$ В этом уменьшается, относительно закороченной емкости C_n (рис.4), т.е. потребление энергии источника падает по мере зарядки C_n . На зеленом графике мы видим обратный импульс напряжения порядка 270 В при закрытии транзистора, что вероятно есть энергия индуктивности первичной обмотки. При этом напряжение

обратного импульса падает при зарядке, при закороченной C_H (рис.4) этот импульс достигает 400 В. Что логично, чем больше ток в первичной обмотке, тем больше обратный импульс.

Дальше посмотрю ток на нагрузке, только поменяю осциллографы, так как этот ток меньше, чем ток первичной обмотки в разы, за счет повышающего трансформатора, большой осциллограф лучше «видит» слабые сигналы, схема показано ниже на рис.7.

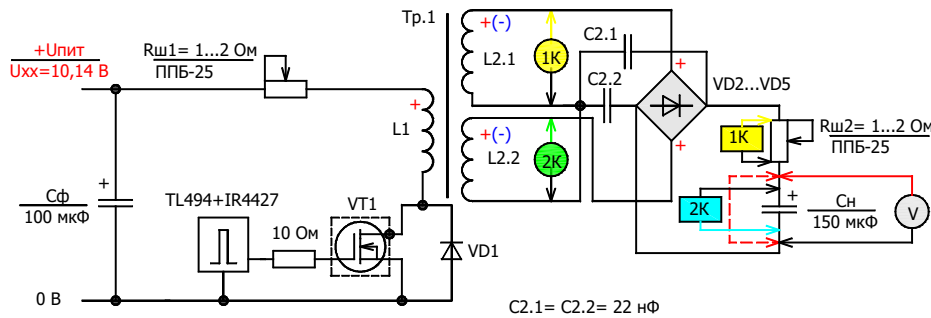


Рис.7.

Сначала так же показаны графики для закороченной перемычкой емкости C_H .

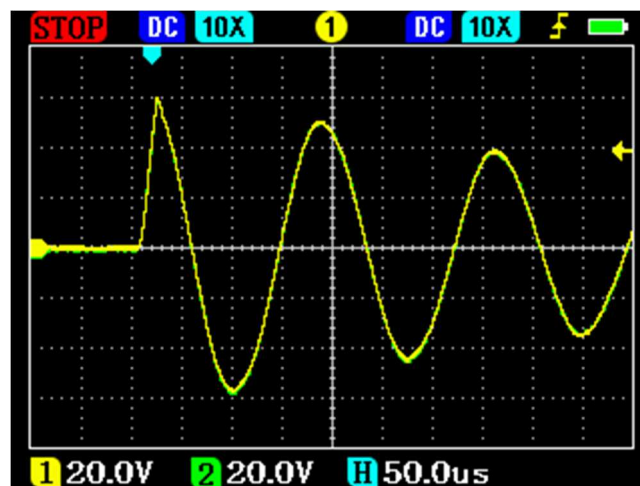


Рис.8.



Рис.9.

На рис.9 мы видим, что в момент открытого транзистора ток выше и частота резонанса растет, что связываю с размагничиванием сердечника током первичной обмотки. Поэтому после закрытия транзистора частота падает и ток тоже, так как индуктивность вторичной цепи растет. По рис.9 также видно, что транзистор чуть раньше закрывается, поэтому в резонансе ток не успевает упасть до нуля. Возможно, резонанс лучше настраивать по току во вторичной обмотке, при закороченной Сн.

Ниже показаны графики для момента, когда напряжение Сн достигает 100 В.

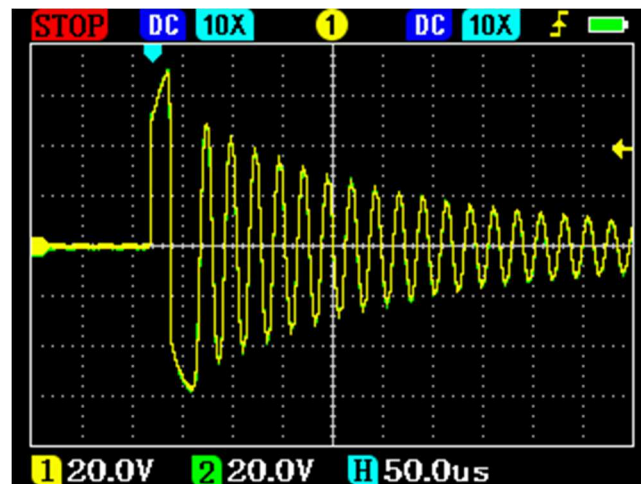


Рис.10.

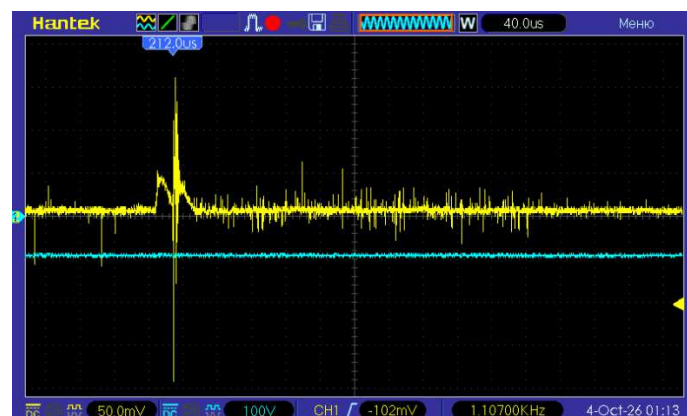


Рис.11.

А тут видим (рис.11) два импульса зарядки Сн, прямой и обратный, выпрямленные диодами, они, конечно уменьшаются по величине, так как напряжение на Сн растет, что видно по голубому графику (рис.11), который достигает 100 В (на осциллограмме -100 В).

Проведу измерение напряжения Сн процессе зарядки, ниже показана схема измерения.

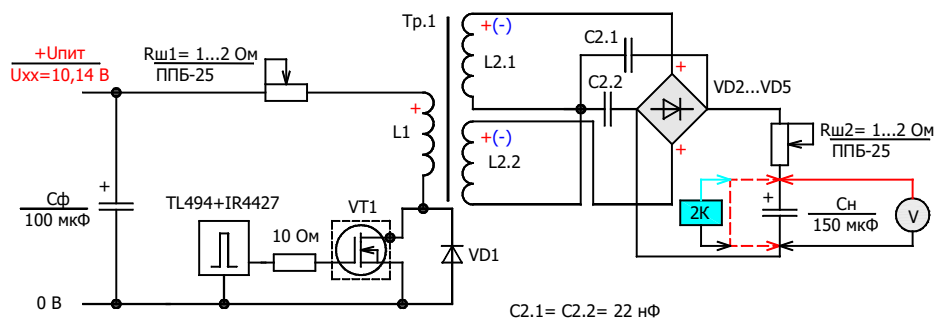


Рис.12.

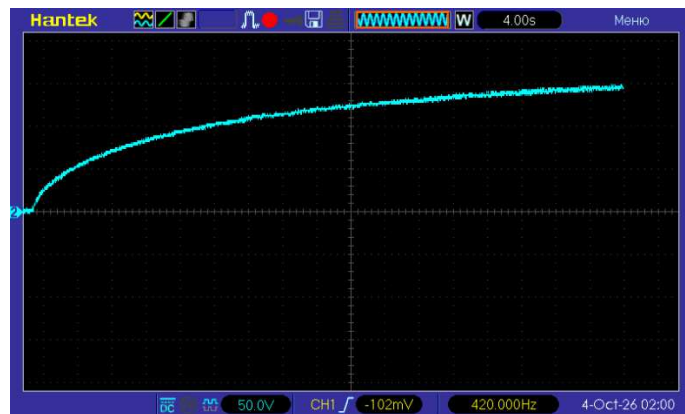


Рис.13.

По полученному графику видим, что **емкость Сн выходит на 100 В за те самые 20 сек**, примерно и дальше заряжается до 150 В и далее, но более медленно.

Ещё хотел посмотреть просадку по источнику питания, так как источник питания не стабилизированный, что отражает (косвенно) потребление энергии в процессе зарядки Сн. Схема показана ниже.

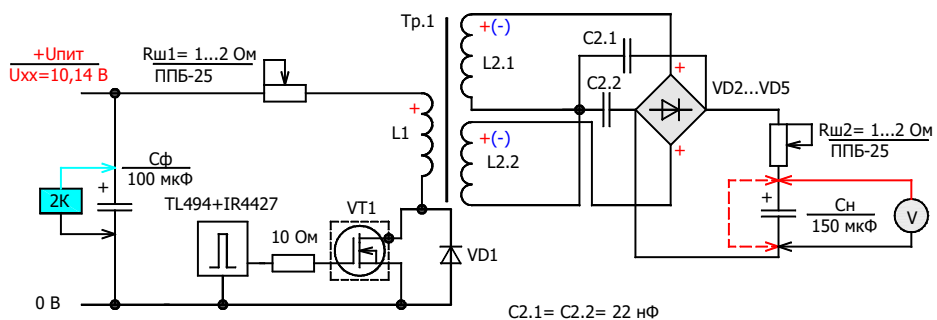


Рис.14.

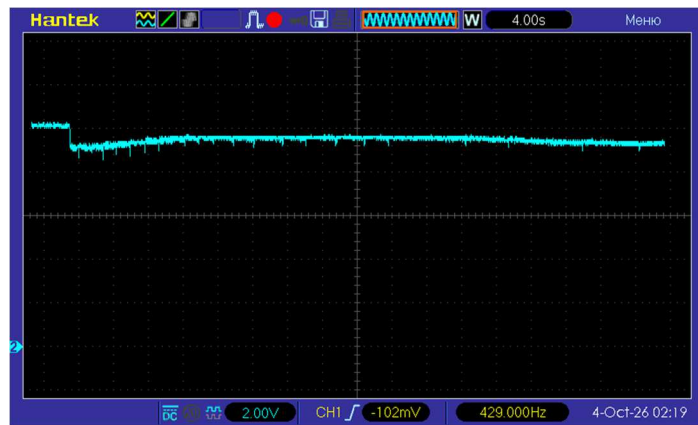


Рис.15.

Как видим, при начале зарядки возникает просадка напряжения в блоке питания, вызванная потреблением энергии источника и дальше напряжение растет, значит потребление падает из-за роста напряжения нагрузки на C_n .

Дальше возникло желание посмотреть напряжения на емкости $C2.1$ и $C.2$. Ниже показана схема измерения.

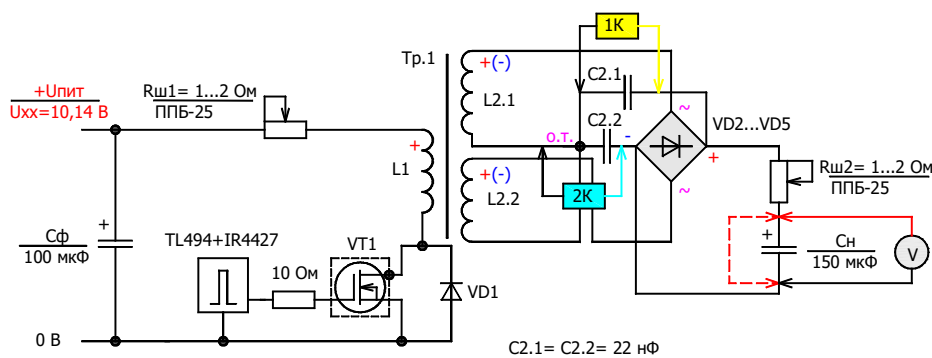


Рис.16.

Ниже приведён график при $C_n=100$ В.

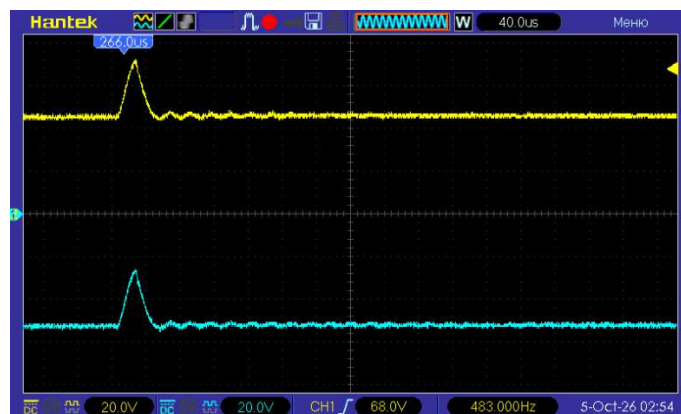


Рис.17.

Разница между голубым и желтым графиком составляет 100 В, т.е. это напряжение на C_n . Чтобы бы был понятен масштаб по времени ниже приведены напряжения на выходах обмоток

трансформатора L2.1 и L2.2, относительно средней точки обмоток трансформатора (о.т.), тоже в момент $U_{\text{н}}=100 \text{ В}$ (на рис.16 это подключение осциллографа не показано).

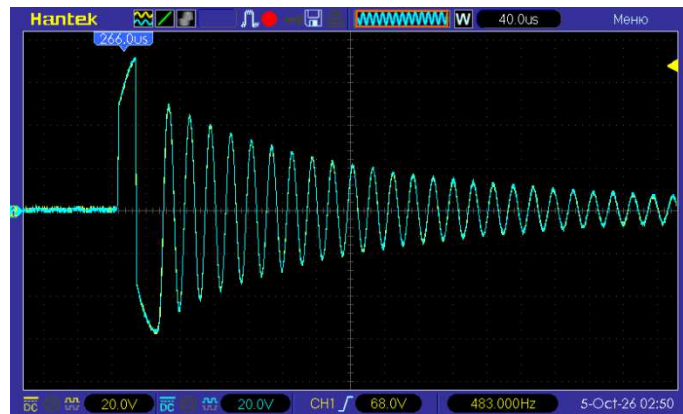


Рис.18.

Поэтому мы видим, что импульс напряжения на C2.1 и C2.2 на рис.17 соответствует плюсу и минусу (по времени) на выходных обмотках (рис.18), т.е. сначала C2.1 заряжается плюсовым напряжением на обмотках трансформатора, через о.т. трансформатора, затем емкость разряжается минусовым импульсом.

Далее посмотрю, как распределяются токи в мостовом выпрямителе. Сначала посмотрю токи в верхнем ряду диодов VD2 и VD5.

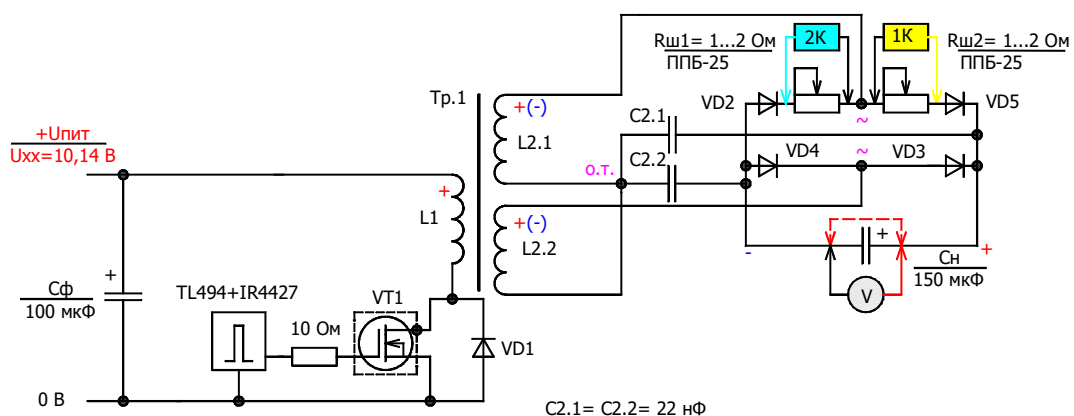


Рис.19.

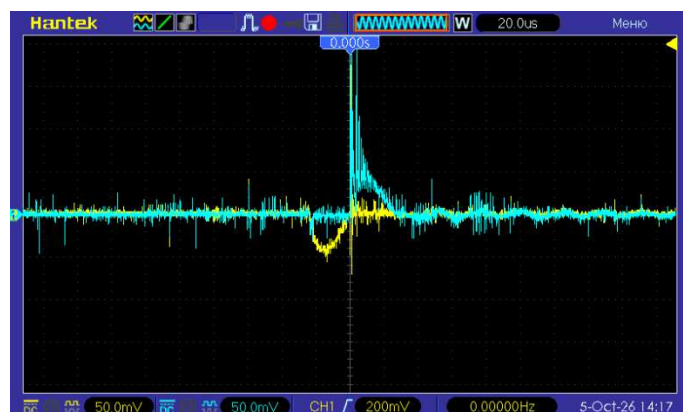


Рис.20.

Как видим, верхние диоды работают по очереди, сначала работает диод VD5 на плюсовой волне, потом VD2 на минусовой волне. Далее проведу измерение тока в нижнем ряду диодов (VD4, VD3), по схеме, как показано ниже.

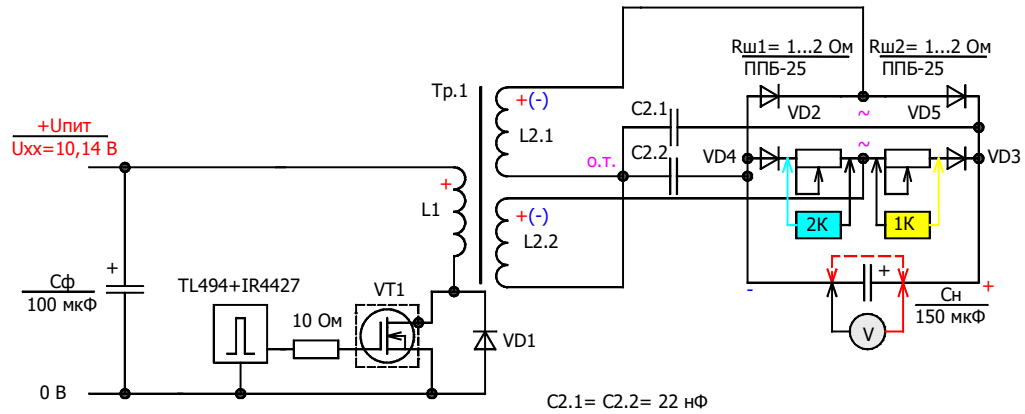


Рис.21.



Рис.22.

Как видим, диод VD3 открывается на плюсовой волне, а диод VD5 на минусовой. Причем ток имеет более резкий фронт и чуть выше по значению, возможно, это связано со взаимодействиями обмоток между собой.

Это означает, что на плюсовой волне открыты диоды VD3 и VD5, а на минусовой VD2 и VD4. Ниже показаны токи во вторичных обмотках на плюсовой волне.

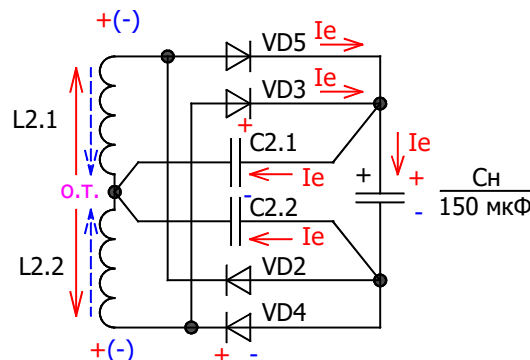


Рис.23.

Рассмотрим процессы для плюсового импульса, который идет первый и формируется от источника, где на обмотках возникают **встречные плюсовые напряжения**, поэтому ток идет через диод VD5 и VD3 и емкость C2.1 заряжается, что мы видели при измерении тока в мостовом выпрямителе.

При этом **токи в обмотках L2.1 и L2.2 идут в одном направлении**, поэтому индуктивности обмоток складываются, по всей видимости. И поэтому емкость C2.1 заряжается от трансформатора, но тут же разряжается на Сн через C2.2. На первый взгляд кажется, что такая схема должна медленнее заряжать Сн, чем последовательное (классическое соединение обмоток трансформатора). Но в данном случае напряжение трансформатора снижается в два раза из-за параллельного подключения, но при этом **ток растет в два раза**. А напряжение на Сн усиливается за счет второй контурной емкости, за счет второго плеча. **И поэтому такая схема со встречными обмотками заряжает не хуже классической схемы**. Если, конечно, настроен резонанс правильно в обмотках. А даже лучше, как будет ниже показано в сравнении с обычной, классической схемой.

Ниже показана схема с последовательным (классическим) включением обмоток. Она соответствует опыту со встречными обмотками на рис.12, где измеряю выходное напряжение на Сн.

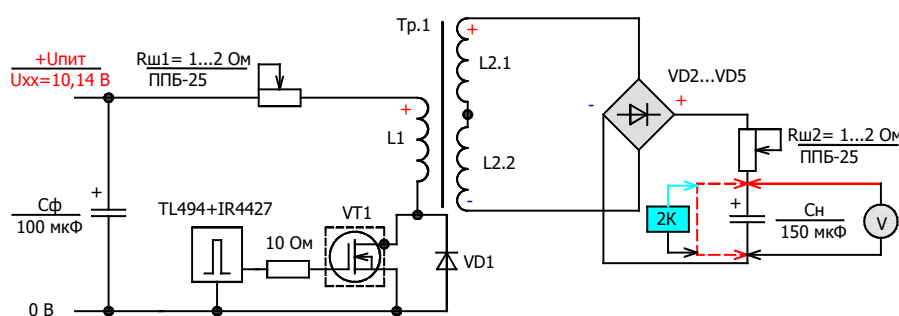


Рис.24.

Время зарядки такой схемы составило 23...24 сек, т.е. оно больше, чем для схемы со встречными обмотками (опыт на рис.13.).

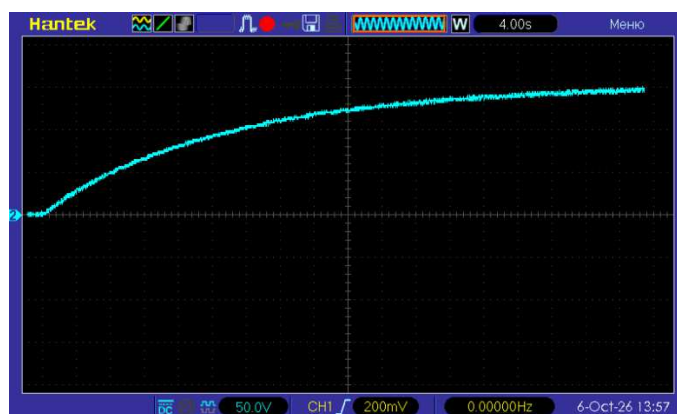


Рис.25.

По графику это тоже заметно, зарядка идет чуть медленнее. Попробовал с подключенными емкостями C2.1 и C2.2, получил время зарядки так же 24 сек (на схеме рис.24 эти емкости не показаны). По графику хорошо видно, что зарядка идет медленнее в начале зарядки Сн.

Посмотрел так же падение питания в процессе зарядки Сн.

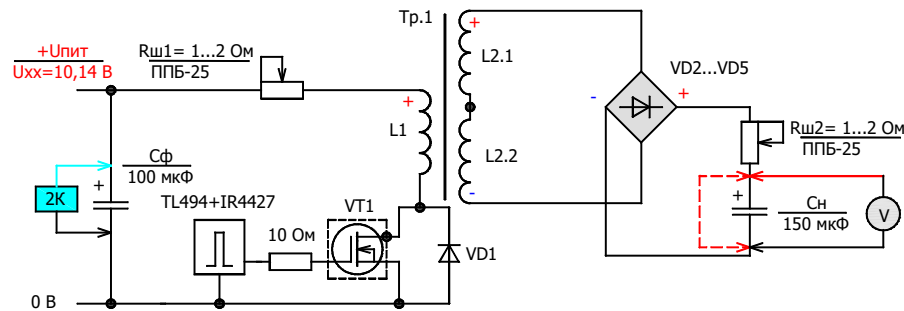


Рис.26.

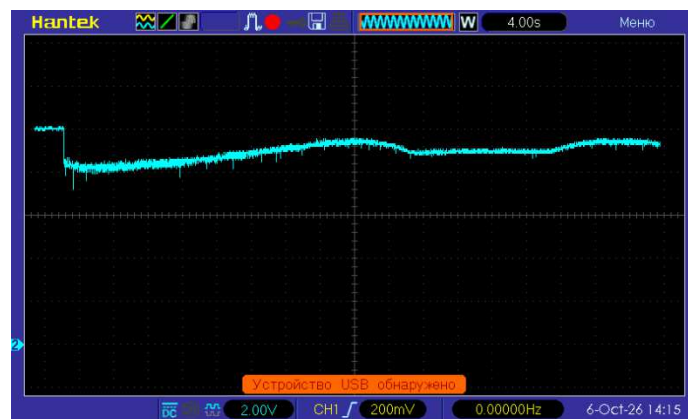


Рис.27.

Если сравнивать питание со встречными обмотками (рис.15), то просадка тут больше! Но это не точно, так как график плавает, схема имеет нестабильность, хотя время зарядки стабильное. Откуда берутся волны или колебания на графике (рис.27) не понял. Т.е. просадка может быть то больше, то меньше. Но, как минимум, потребление схемы со встречными обмотками не больше, а при этом время зарядки быстрее.

Посмотрел так же напряжения на обмотках трансформатора.

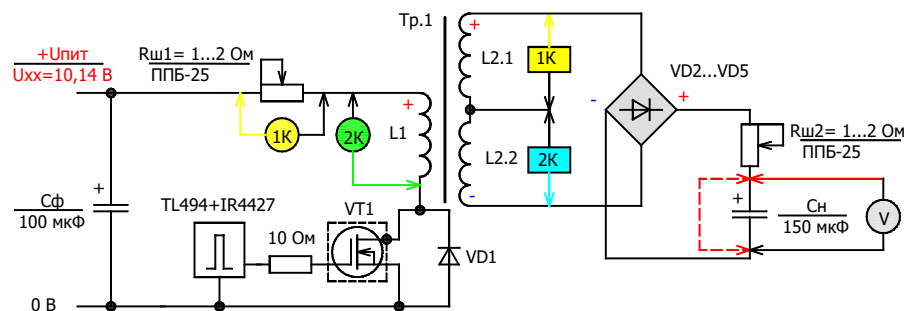


Рис.28.

Сначала приведен график тока и напряжения в первичной обмотке при закороченной S_n , график выходного напряжения не привожу, так как при КЗ вторичной обмотки напряжение на них нулевое (почти).

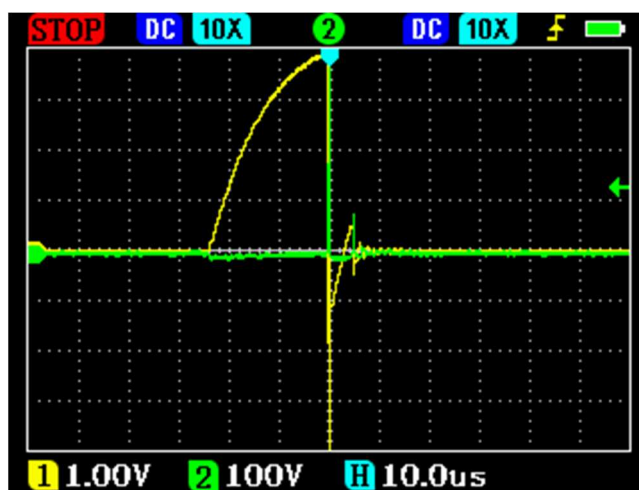


Рис.29.

Если сравним токи в этом же режиме для схемы со встречными обмотками (рис.4), то обнаружим, что ток в классической схеме выше и он при начале зарядки сохраняется, потом постепенно падает. Ниже показан график при $S_n=100$ В.

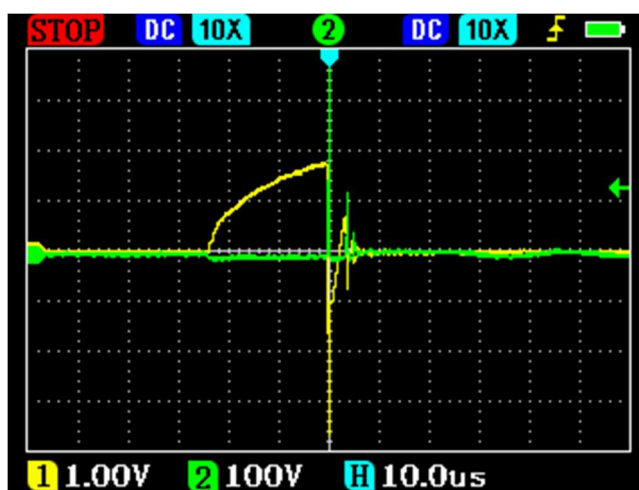


Рис.30.

Если же опять сравним со схемой со встречными обмотками в этом же режиме (рис.6), то и тут ток схемы со встречными обмотками будет ниже. Т.е. **схема с обычным (согласным) подключением обмоток дает больше потребление энергии в источнике**, поэтому большая просадка по питанию (рис.27) не случайна, схема с обычным подключением обмоток трансформатора дает большее потребление энергии источника. При этом зарядка идет медленнее 24 сек, против 20 сек для схемы со встречными обмотками.

Ниже показан график напряжений на выходных обмотках (для встречных обмоток соответствует схема рис.28) при $S_n=100$ В.

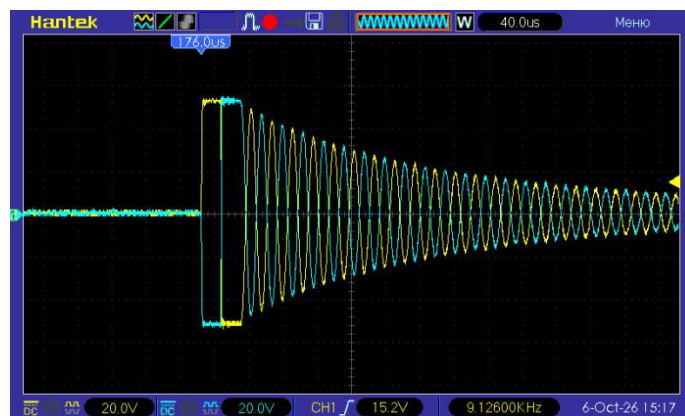


Рис.31.

Тут мы видим два первых и противоположных импульса на обмотках, равные в сумме 100 В, когда напряжение обмоток соответствует заряженному конденсатору C_n , когда идет зарядка C_n . А после возникают затухающие колебания, это остаточная энергия обмотки, так как C_n имеет напряжение и энергии катушек недостаточно для открывания диодов и зарядки C_n . Тут ничем схемы не отличаются.

Далее посмотрю ток на нагрузке (C_n), как и для схемы со встречным включением обмоток.

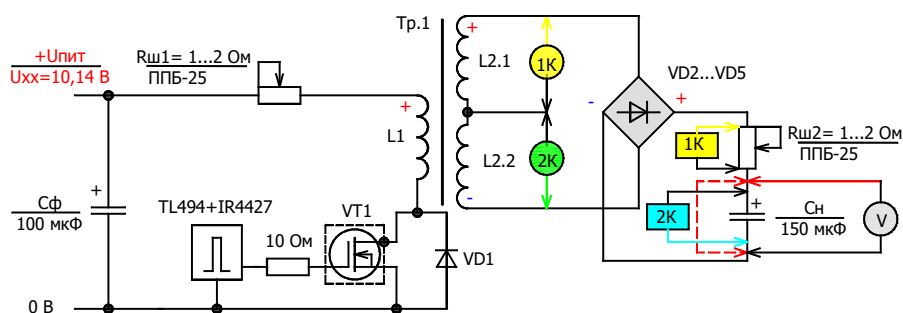


Рис.32.

Сначала показан график тока при КЗ нагрузки (C_n). Напряжение на обмотках не привожу, так как оно почти нулевое, обмотки закорочены.

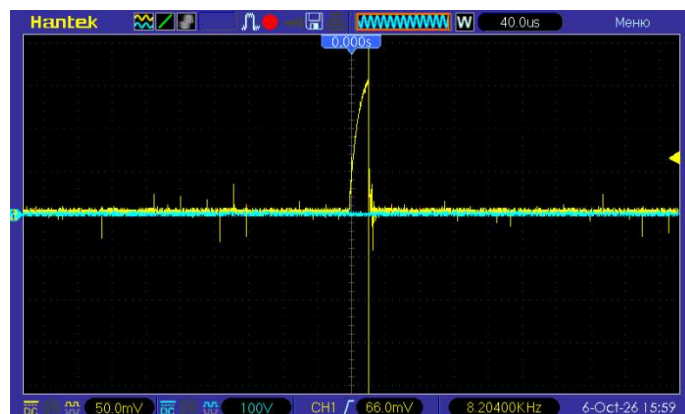


Рис.33.

Причем, в этом режиме **есть принципиальное различие от схемы со встречными обмотками** (рис.9), где при КЗ нагрузки (Сн) ток в нагрузке затухающий, в классической же схеме, как видим, импульс тока один и совпадает с импульсом тока в источнике. Что вызывается тем, что токи вторичной цепи и первичной при отключении транзистора VT1 друг друга нейтрализуют. Отсюда падает эффективность зарядки для классической схемы. Для схемы со встречными обмотками ток вторичной цепи гасится контуром и поэтому индуктивная энергия первичной обмотки подается в накопительную емкость в минусовой полуволне.

Ниже показан ток в цепи Сн (желтый график) в момент Сн=100 В.

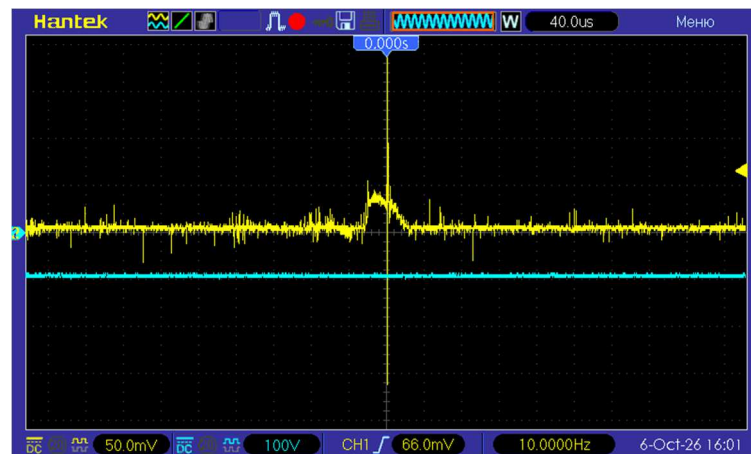


Рис.34.

Две полуволны почти слились в одну (место разделения полуволн видно, как вертикальный всплеск на желтом графике), но в целом ток по величине совпадает для схемы со встречными катушками (рис.11). Ниже показаны напряжения на выходе катушек в момент Сн=100 В, где катушки в противофазе работают.

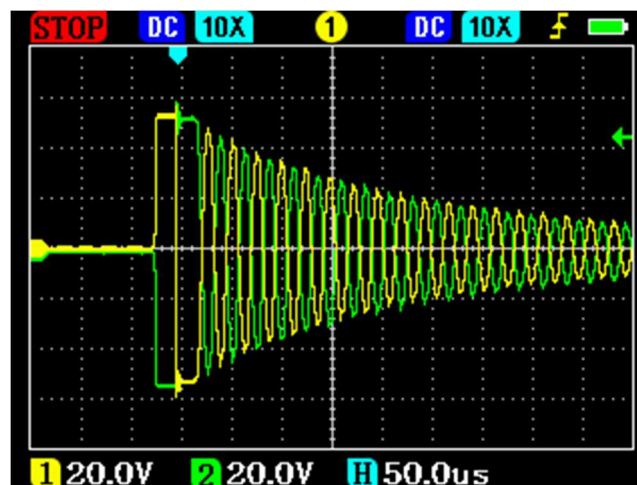


Рис.35.

Тут все по прежнему, мы видим две полуволны напряжения, которые заряжают емкость Сн. И затем идут затухающие энергии в катушке.

Решил **исключить влияние осциллографа**, поэтому убрал все щупы и оставил только вольтметр, как показано ниже на схеме для согласного включения обмоток трансформатора. **И получил время зарядки 20..21 сек.**

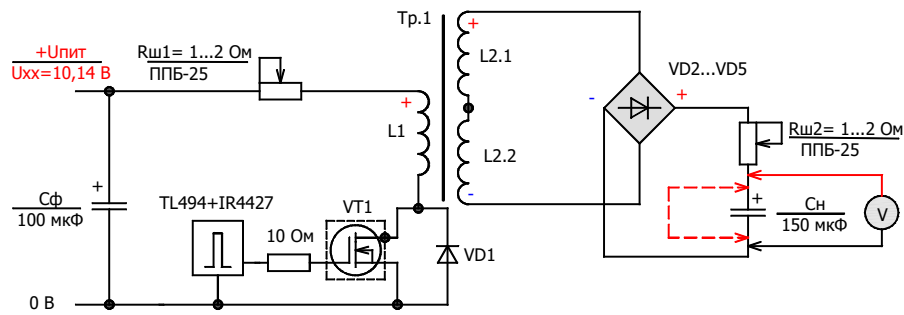


Рис.36.

И тут же, **ничего не меняя** в настройках генератора и сопротивления, сделал измерение для встречной схемы. **И получил время зарядки 15...16 сек для встречной схемы.** Т.е на 3/4 быстрее идет зарядка, чем для классической схемы.

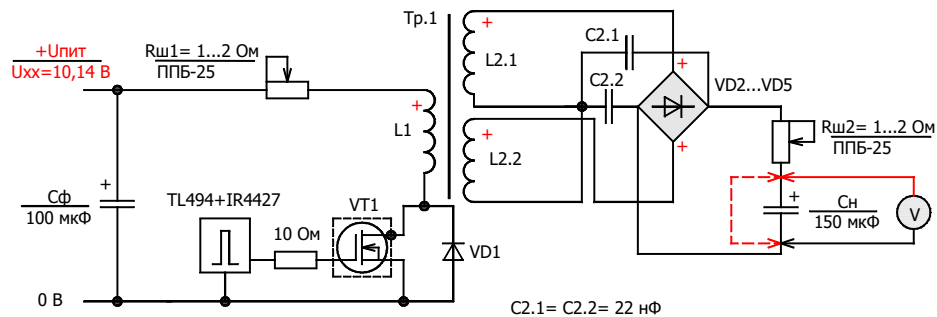


Рис.37.

В завершении опыта хотел сравнить энергию заряженного конденсатора C_n , разряжая его на омическую нагрузку, сначала опыт сделаю для схемы со встречным включением обмоток. Заряжаю емкость C_n до напряжения 100 В, затем разряжаю C_n на $R_n=15$ Ом через ключ К, как показано на рис.38 (красной стрелкой).

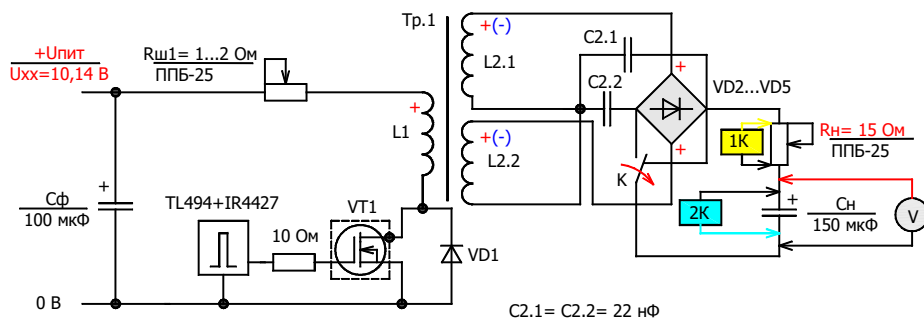


Рис.38.



Рис.39.

На графике видим, как вся накопленная энергия в конденсаторе C_n тратится на омическом сопротивлении.

Ниже сделаю тоже самое для классической схемы, т.е. для обычной схемы подключения обмоток трансформатора. Точно так же разряжаю накопленную энергию на конденсаторе при $C_n = 100$ В на омической нагрузке 15 Ом через ключ К.

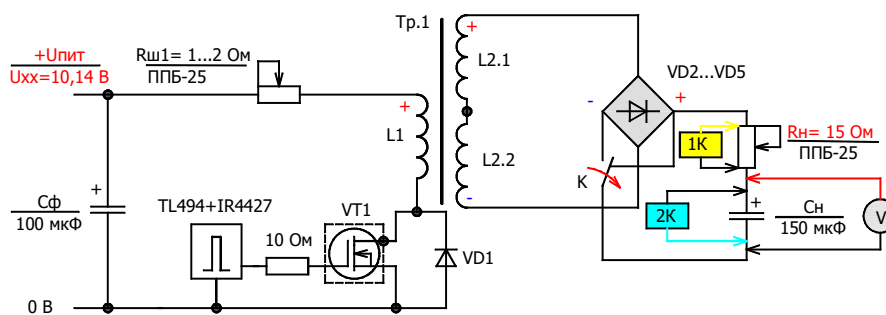


Рис.40.

Ниже показана полученная диаграмма.



Рис.41.

Как видим, мощность на выходе одинаковая в обеих схемах реализуется, разницы на нагрузке нет. Но есть разница при зарядке.

Выводы. Схема со встречными выходными обмотками трансформатора, как показывает данный опыт, может заряжать накопительную емкость не хуже, а даже эффективнее, чем классическая схема с согласными вторичными обмотками. При условии настройки в резонанс схемы. Так как из-за резонанса ток вторичной обмотки плавно затухает и поэтому индуктивный ток первичной обмотки сохраняется и заряжает C_H дополнительно, отсюда растет эффективность зарядки. Особенно эффективность растет в начале зарядки C_H , когда токи максимальные в схеме.

Думаю, что данная схема может применяться для зарядки аккумуляторов, где резонанс делает энергию в нагрузке двух полярной. В то время, как для обычной схемы, как я предполагаю, как показано ниже на рисунке, энергия в нагрузке C_H однополярная, где вторая полярность уходит в источник.

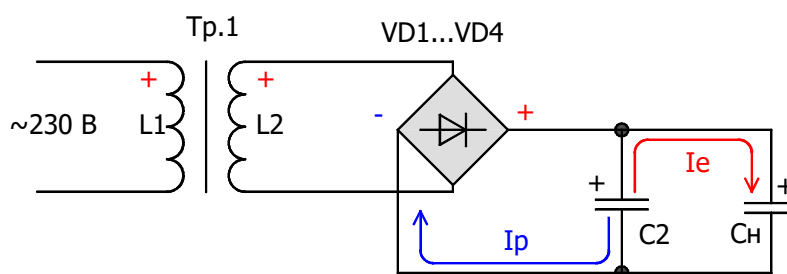
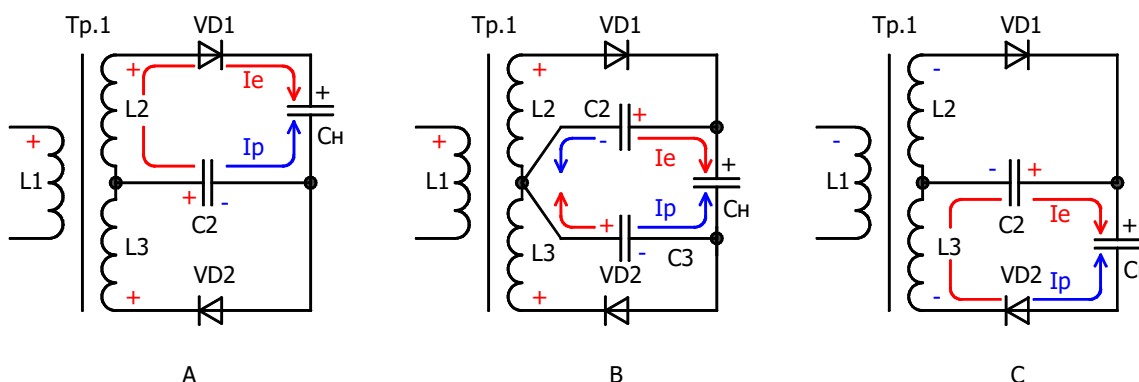


Рис.42.

Для сбалансированной схемы возможны три варианта, как ниже показано на рисунке. Причем, все схемы заряжают за одно и тоже время, до удвоенного (почти) значения напряжения обмотки L2 или L3. Что происходит из-за второго плеча, которое работает в противофазе напряжению на другой обмотки, сохраняя энергию в контурном конденсаторе C3 или C2, отсюда получаем эффект удвоения напряжения. Ток удваивается за счет подключения параллельно выходных обмоток, на рисунке для упрощения показана только одна пара диодов.



Средняя схема (B) более сбалансированная, она **имеет ток зарядки каждый полупериод**, в то время как схема (A) и (C) имеют пропуск в половину периода. Поэтому встречное включение обмоток трансформатора тем выгодно, что **можно реализовать резонанс в цепи нагрузки**. Конечно, для питания лучше использовать двухполупериодную схему, чтобы иметь равные плечи положительного и отрицательного напряжения на зарядке. Кроме того, подбирая величину контурной емкости можно регулировать ток зарядки.