

ТРАНЗИТ ЭНЕРГИИ КОММУТАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ В НАГРУЗКУ

Схемы, состоящие из пассивных и нелинейных элементов (LCD) и позволяющие уменьшить коммутационные потери, часто называют пассивными цепями рекуперации энергии коммутационных потерь. При этом практически все схемы передают энергию не в источник (рекуперация), а в нагрузку. Механизм передачи энергии может быть следующим. Часть энергии, поступающей от источника в преобразователь (регулятор), в момент переключений транзистора не передается в нагрузку, а переходит в коммутационные потери. Цепи "рекуперации" энергии, в момент переключения силового ключа, переводят часть энергии коммутационных потерь в реактивный накопитель и при следующем переключении силового ключа передают эту энергию в аккумулирующий реактивный накопитель. При следующем переключении силового ключа происходит как накопление новой порции энергии, так и передача ранее аккумулированной энергии в нагрузку. Таким образом, порция энергии не участвует в коммутационных потерях, а передается LCD-цепью транзитом в нагрузку.

Коммутационные потери в трех основных схемах преобразователей постоянного тока в постоянный приблизительно одинаковы. Коммутационные потери в транзисторе и диоде приблизительно равны удвоенному произведению мощности в нагрузке на частоту коммутации и суммарное время переключения транзистора и диода. При этой оценке времена переключений транзистора и диода принимаются равными. Например, при частоте коммутации 100 кГц, суммарном времени переключения транзистора и диода 100 нс., мощности в нагрузке 1.5 кВт получаем 30 Вт коммутационных (т.е. дополнительных) потерь. Эта мощность выделяется в транзисторе и диоде и должна быть отведена от них.

До недавнего времени практические схемы существенного уменьшения коммутационных потерь в транзисторе позволяли энергию, эквивалентную энергии коммутационных потерь, отвести от транзистора и передать в теплоприемник (резистор).

В последнее время опубликовано достаточно большое количество схемотехнических решений, позволяющих отводить энергию, эквивалентную энергии коммутационных потерь, от транзистора и диода с последующим ее аккумулированием в реактивном накопителе и передачей в нагрузку.

Все предлагаемые схемы можно разделить на пассивные схемы, содержащие индуктивности, конденсаторы, диоды (LCD), и на активные — содержащие транзисторы, индуктивности, конденсаторы и диоды (TLCD).

В активных схемах используется как минимум дополнительный силовой транзистор и требуется специальная синхронная схема управления, по стоимости сравнимая с основной схемой управления.

В пассивных LCD схемах диоды, выполняющие функции ключей, управляются синхронно с силовым транзистором и не требуют специальных схем управления.

Основная идея уменьшения потерь в транзисторах и диодах во всех схемотехнических предложениях не изменилась. Она заключается в том, что к моменту коммутации, например, транзистора, на нем снижаются или напряжение или ток через него до нуля, т.е. организуется переключение при нуле напряжения (ПНН) или при нуле тока (ПНТ).

Такое переключение эквивалентно тому, что порция энергии, которая пошла бы на потери при коммутации, отводится в реактивный накопитель (в предельно простых случаях рассеивалась в резисторах).

Известные пассивные схемные решения не позволяют устранить сразу все основные коммутационные потери. Можно выделить три вида основных коммутационных потерь:

- потери, связанные с этапом восстановления обратного сопротивления силового диода с учетом его емкости;
- потери при включении силового транзистора, связанные с этапом увеличения тока при полном напряжении;
- потери при выключении силового транзистора, связанные с этапом увеличения напряжения при полном токе.

Поэтому, разработка пассивной схемы для транзитной передачи энергии всех вышеперечисленных потерь в нагрузку, является актуальной задачей.

На рис. 1 показана схема повышающего преобразователя (регулятора). Все результаты, полученные ниже применимы и к другим известным схемам преобразователей.

Любые элементы, которые будут добавлены в схему, изменяют траектории рабочих точек вольтамперных характеристик транзистора и диода

Для уменьшения коммутационных (динамических) потерь при выключении транзистора, тиристора, диода и т.п. нашли широкое применение формирующие RCD-цепи. Эти цепи преобразуют коммутационные потери в приборе в тепловые потери, рассеиваемые в своих элементах (основные потери в R).

Рассмотрим только CD-цепь. На рис. 2 показана CD-цепь, подключенная к выходному выводу открытого транзистора. На рис. 3 показан момент, когда транзистор начинает закрываться.

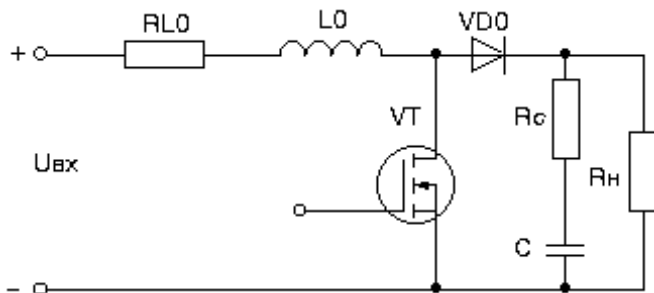


Рис. 1. Повышающий преобразователь (регулятор)

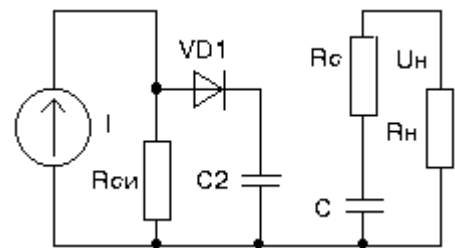


Рис. 2. VT открыт; на C2 — остаточное напряжение

Ток конденсатора C_2 :

$$I_{C2} = I - I_{си} = I \frac{t}{t_{выкл}} \quad (1)$$

где: I — основной ток;

I_{C2} — ток конденсатора;

$I_{си}$ — ток транзистора;

$t_{выкл}$ — время выключения транзистора.

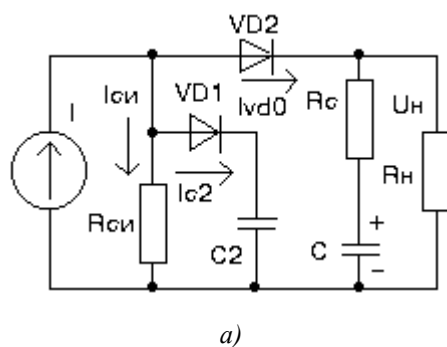
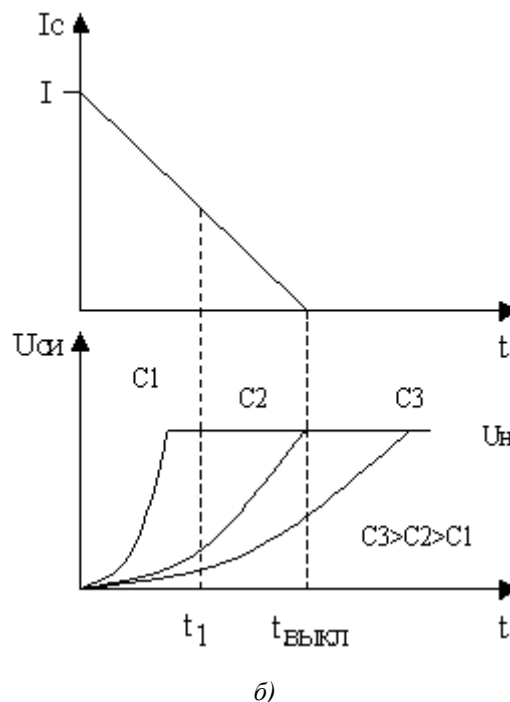


Рис. 3. а) VT закрывается; напряжение на C_2 увеличивается; б) для времени t_1 величина C_2 недостаточна



Напряжение на конденсаторе

$$U_{C_2} = \frac{1}{C_2} \int i_{C_2} dt = \frac{I}{2C_2 t_{\text{выкл}}} t^2. \quad (2)$$

В конце заряда напряжение на емкости C_2 равно напряжению на нагрузке. В выражении (2) принимаем

$$t = \sqrt{2} \cdot t_{\text{выкл}}, \quad (3)$$

поэтому

$$U_n = \frac{I \cdot t_{\text{выкл}}}{C_2}. \quad (4)$$

Из (4) можно выбрать величину емкости конденсатора

$$C_2 = \frac{I \cdot t_{\text{выкл}}}{U_n}. \quad (5)$$

Для RCD-цепей потери в резисторе в 2 ... 3 раза больше, чем коммутационные потери, но при этом потери в транзисторе уменьшаются. Поэтому желательна передача энергии возможных потерь в нагрузку.

Передачу энергии коммутационных потерь в нагрузку можно организовать в два этапа. На первом этапе, в момент переключения транзистора, необходимо передать энергию в аккумулирующий конденсатор. На втором этапе, в момент очередного переключения транзистора, — передать аккумулированную энергию в нагрузку. Следовательно, необходимо организовать два пути канализации энергии. На рис. 4: C_1 — аккумулирующий конденсатор, в который энергия поступает через диод VD_2 , а через диод VD_3 — передается в

нагрузку. Таким образом, практически вся энергия, которая была бы рассеяна в транзисторе, заранее отведена в промежуточный накопитель, а затем — в аккумулирующий.

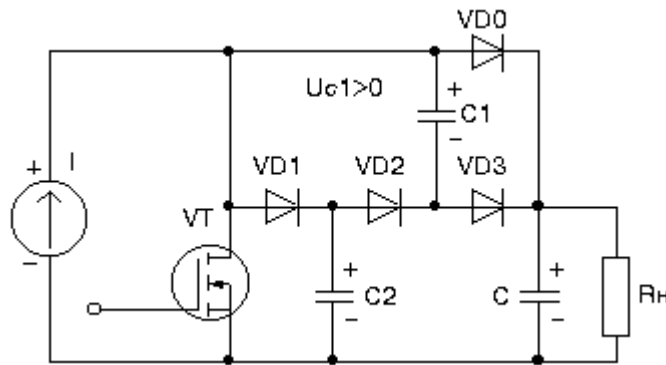


Рис. 4. $VT1$ закрыт; C_1 — реактивный аккумулятор энергии; конденсатор C_2 отдает энергию в конденсатор C_1 через диод VD_2 ; через диод VD_3 энергия из C_1 переходит в нагрузку

На рис. 5 представлен интервал времени, когда открывается транзистор и энергия из промежуточного накопителя (конденсатора) C_2 передается в аккумулирующий накопитель (конденсатор) C_1 . При этом возникает необходимость ограничивать броски токов через все элементы.

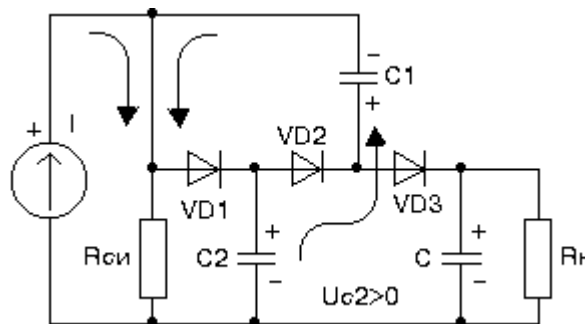


Рис. 5. Передача энергии из конденсатора C_2 в конденсатор C_1

На этапе выключения транзистора (цепь заряда конденсатора C_1 представлена на рис. 3а), напряжение на конденсаторе C_1 откроет диод VD_3 и закроет диод VD_0 . Ток разряда конденсатора C_1 и общий ток поступают в нагрузку. В момент времени, когда напряжение на конденсаторе C_1 начнет менять полярность, открывается диод VD_0 — силовой диод основной схемы (рис. 6).

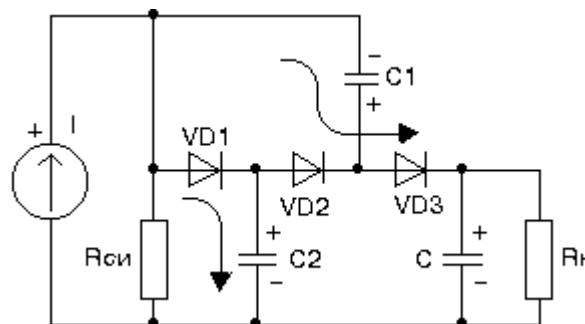


Рис. 6. Передача энергии из конденсатора C_1 в нагрузку

Для уменьшения коммутационных потерь, вызванных бросками токов, в том числе и током восстановления обратного сопротивления силового диода с учетом его емкости, можно использовать линейные

и нелинейные дроссели. В процессе переключения к дросселю практически полностью прикладывается максимальное напряжение, существующее в схеме, что является заметным недостатком такой цепи.

На рис. 7 показан вариант включения дросселя. Во-первых, в момент времени, когда открывается транзистор, дроссель ограничивает бросок тока перезаряда конденсаторов. В этот момент к обмотке дросселя приложено все напряжение нагрузки. За время восстановления обратного сопротивления силового диода дроссель не должен войти в состояние насыщения. Во-вторых, дроссель ограничивает обратный бросок тока восстановления диода VD_0 . При этом начало спада тока через дроссель может определить и ток восстановления диода, и ток разряда конденсатора C_2 . В момент возникновения э.д.с. самоиндукции, открывается диод VD_4 и энергия, накопленная в дросселе, передается в конденсатор C_1 .

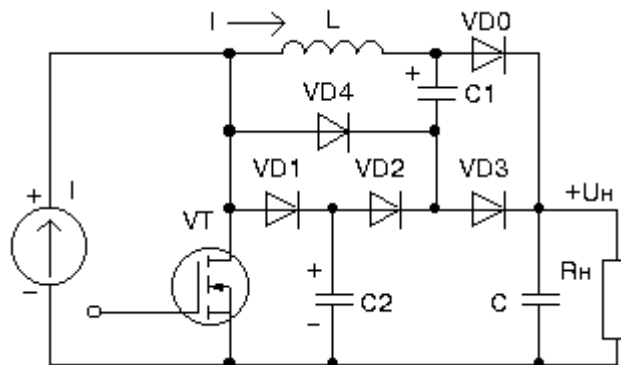


Рис. 7. Введение дросселя L_1 для уменьшения бросков тока разряда конденсатора C_2 и тока восстановления диода VD_0 .

Для того чтобы дополнительно аккумулировать энергию бросков токов можно вместо дросселя подключить трансформатор ($W_2 \geq W_1$) так, как показано на рис. 8. Используемый трансформатор можно отнести к импульсным, но без требований к точности передаваемой формы импульса.

В некоторых LCD и TLCD схемах транзитной передачи коммутационных потерь в нагрузку используются трансформаторы (часто дроссель с дополнительными обмотками). При этом электроэнергия передается в нагрузку без предварительного ее аккумулирования. Поэтому дополнительные обмотки оказываются высоковольтными, а габариты дросселя и добротность становятся препятствием на пути технической реализации.

На рис. 8 показана схема с трансформатором (дроссель с дополнительной обмоткой). Обмотки трансформатора приблизительно одинаковы. Индуктивность одной обмотки приблизительно на два порядка меньше индуктивности основного (силового) дросселя схемы.

В схеме, представленной на рис. 8 образовался последовательный контур ($L_1 C_1 C_2$) в цепи разряда конденсатора C_2 . К моменту разряда конденсатора C_2 на нем было напряжение нагрузки. Собственная резонансная частота контура $L_1 C_1 C_2$ (L_1 —индуктивность обмотки W_1) равна

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_1 \cdot C_1 \cdot C_2}}. \quad (6)$$

Поэтому ток в контуре

$$i = \frac{U_n}{\omega_0 \cdot L_1} \sin \omega_0 t \quad (7)$$

Напряжение на конденсаторе C_1 равно

$$U_{C_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_n (1 - \cos \omega_0 t) \quad (8)$$

Напряжение на конденсаторе C_2 равно

$$U_{C_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_n \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \cos \omega_0 t \right) \quad (9)$$

Соотношения (7) ... (9) записаны без учета знаков, которые можно определить из равенства

$$U_{C_1} + U_{C_2} + U_{L_1} = 0$$

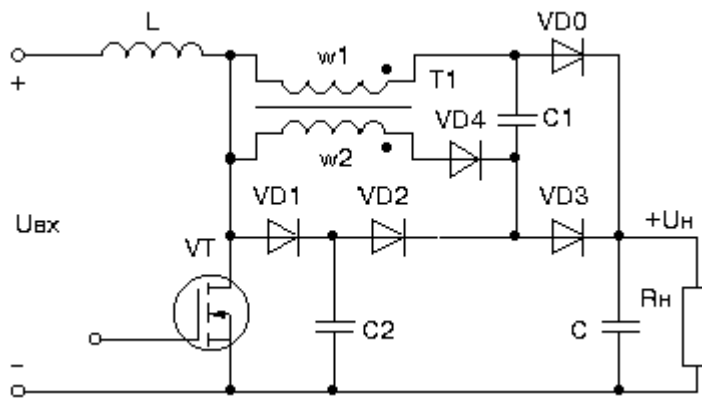


Рис. 8. Введение трансформатора позволяет уменьшить коммутационные потери в цепи восстановления диода.

Из (9) — напряжение на конденсаторе C_2 не будет менять знак, если $C_2 \geq C_1$. Режим, при котором U_{C_2} меняет знак, необходимо дополнительно исследовать, но такой режим потребует увеличения нерегулируемой минимальной длительности импульса, т.е. уменьшения кратности регулировочной характеристики.

На интервале времени, когда транзистор открыт, токи через конденсатор C_1 и обмотку W_1 практически совпадают. Эти процессы стилизованно показаны на рис. 9. Время импульса на рис. 9 соизмеримос минимальным "мертвым" временем, определяемым зарядом конденсатора. Здесь: $t_1 - t_2$ — время восстановления обратного сопротивления диода VD_0 ; $t_4 - t_6$ — время разряда C_1 ; $t_1 - t_6$ — время импульса.

Тепло, выделяемое в сердечнике трансформатора, определяется потерями на перемагничивание. Условия нагрева определяют критическую мощность, которую может отвести в окружающую среду сердечник. Мощность, которую может рассеивать сердечник, равна

$$P_{кр} = \alpha \cdot \delta_{охл} \cdot \Delta T, \quad (10)$$

где $\alpha \approx 0.0025 \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{град}$ — коэффициент теплоотдачи;

ΔT — превышение температуры

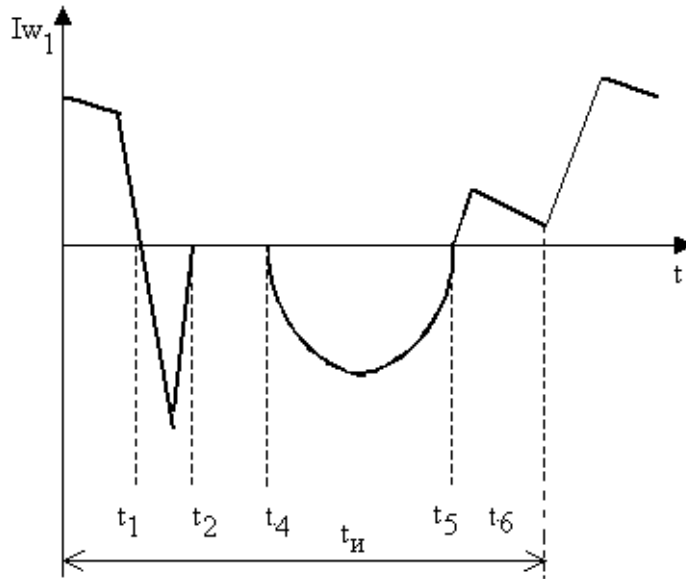


Рис.9. Временная диаграмма тока через обмотку W_1

$$S_{\text{охл}} = \pi(D + d) \left[\frac{1}{2}(D - d) + h \right],$$

где D , d , h —диаметры и высота сердечника.

Остается определить среднюю мощность потерь на перемагничивание сердечника

$$P_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I dt = \frac{4H_m \cdot I \cdot S \cdot B}{T} = \frac{4H_m \cdot B_r \cdot V}{T},$$

где V — объем сердечника.

Эти соотношения позволяют определить предельную рабочую частоту для данного сердечника.

Разработанная LCD-цепь показана на рис. 10 может быть выполнена на отдельной плате и встроена в готовое изделие.

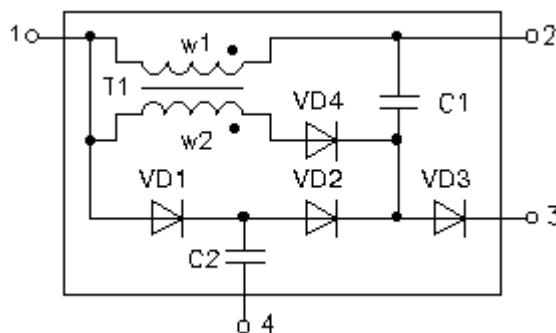


Рис. 1 LCD-цепь транзита энергии коммутационных потерь в нагрузку

На рис.11,12 и 13 показано подключение LCD-цепи к основным схемам регуляторов, содержащих один силовой транзистор и один силовой диод, преобразующих постоянное напряжение в постоянное.

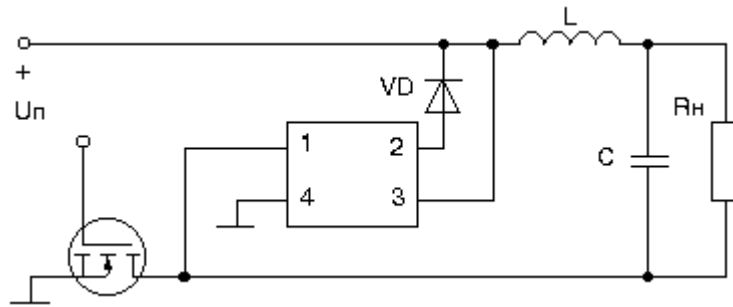


Рис. 11. Понижающий регулятор напряжения с LCD-цепью

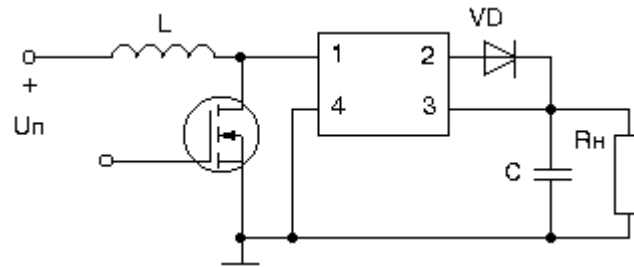


Рис. 12. Повышающий регулятор напряжения с LCD-цепью

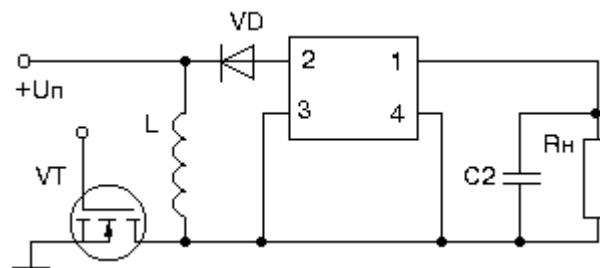


Рис. 13. Понижающий-повышающий регулятор напряжения с LCD-цепью

При моделировании схем рис. 11 ... 13 получены практически одинаковые результаты. Поэтому ниже приведены результаты моделирования для повышающего регулятора.

Проведенное сравнительное моделирование повышающего преобразователя без LCD-цепи и с ней показало хорошее совпадение с результатами физических испытаний серийных изделий.

На рис. 14 показана модель повышающего регулятора без LCD-цепи. Типы и параметры элементов показаны на схеме. Коэффициент регулирования $D = 0,2$.

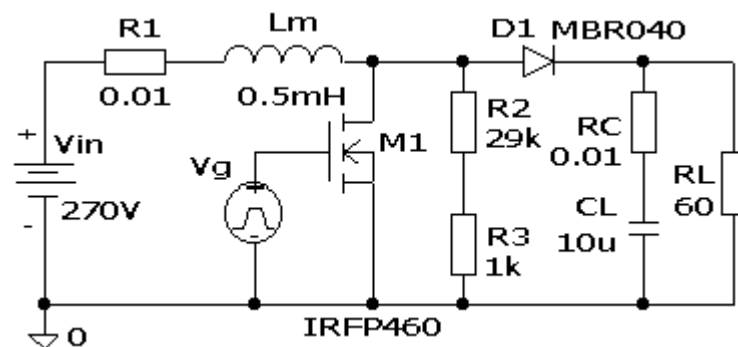


Рис.14. Модель повышающего регулятора без LCD-цепи

При моделировании влиянием R_c можно пренебречь. Мощность в нагрузке около 2 кВт. Делитель R_2, R_3 служит для согласования масштабов $U_{си}$ и I_c .

На рис. 15 показана форма выходного напряжения схемы рис. 14 практически в установившемся режиме: $U_n = 341,9$ В, $U_{нmin} \approx 341,2$ В, $U_{нmax} \approx 342,6$ В.

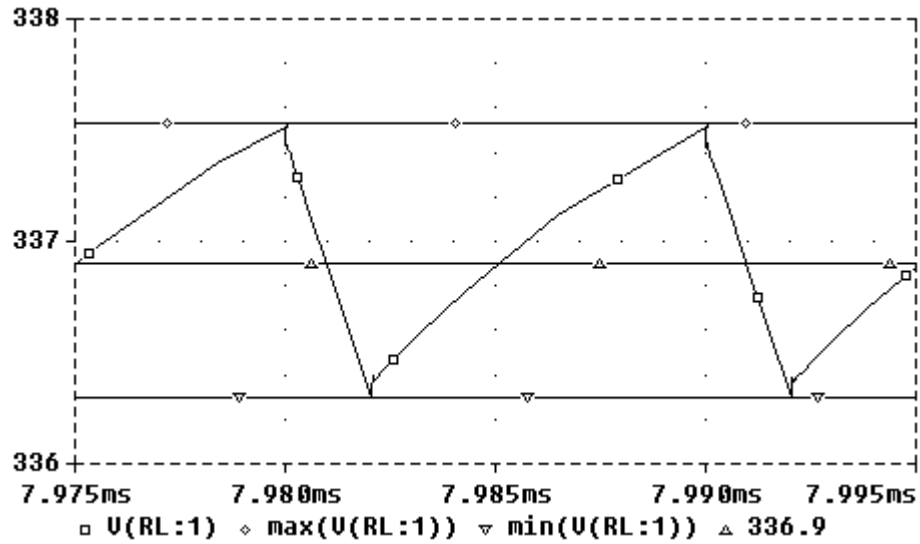


Рис. 15. Выходное напряжение в схеме рис. 21

На рис. 39 показан процесс включения транзистора в схеме повышающего регулятора без LCD -цепи. На рис. 16 — масштаб $U_{си}$ 1:30 (показано $U_{си}/30$). В течение времени, показанного на рис. 23, ток через

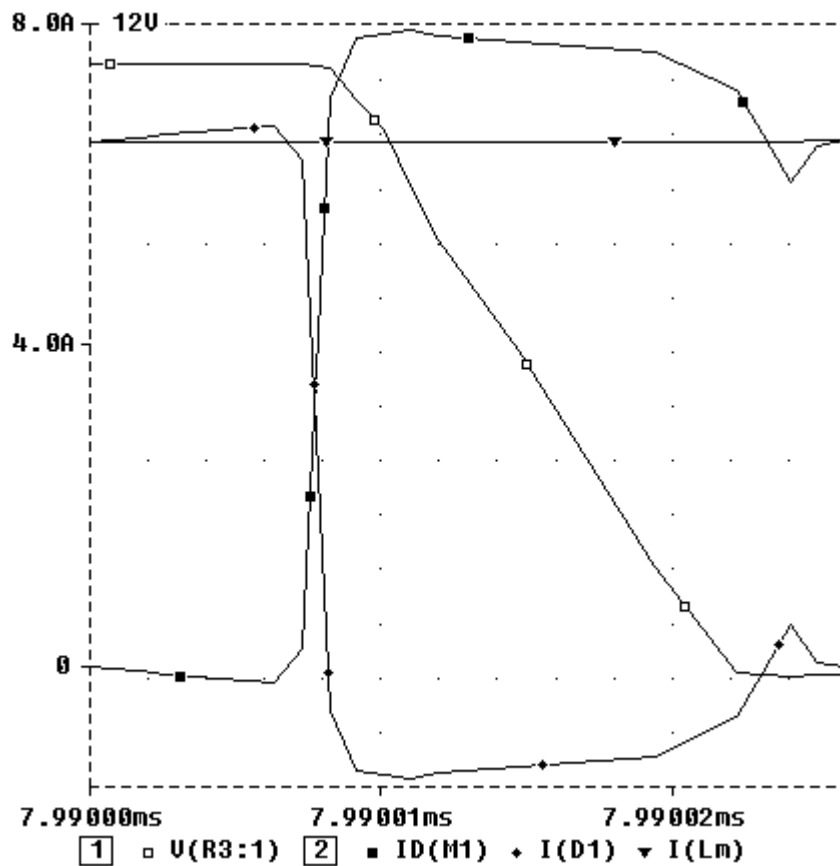


Рис. 16. Процесс включения транзистора

индуктивность практически не меняется. Токи включения транзистора и выключения диода частично совпадают во времени, образуя путь короткого замыкания нагрузки. В течение значительного времени к транзистору приложено все напряжение нагрузки при максимальном токе стока (показано $U_H/30$).

На рис. 17 приведен процесс выключения транзистора. В этом случае перекрытие тока $I_{сн}$ и напряжения $U_{сн}$ несколько меньше, чем при включении транзистора.

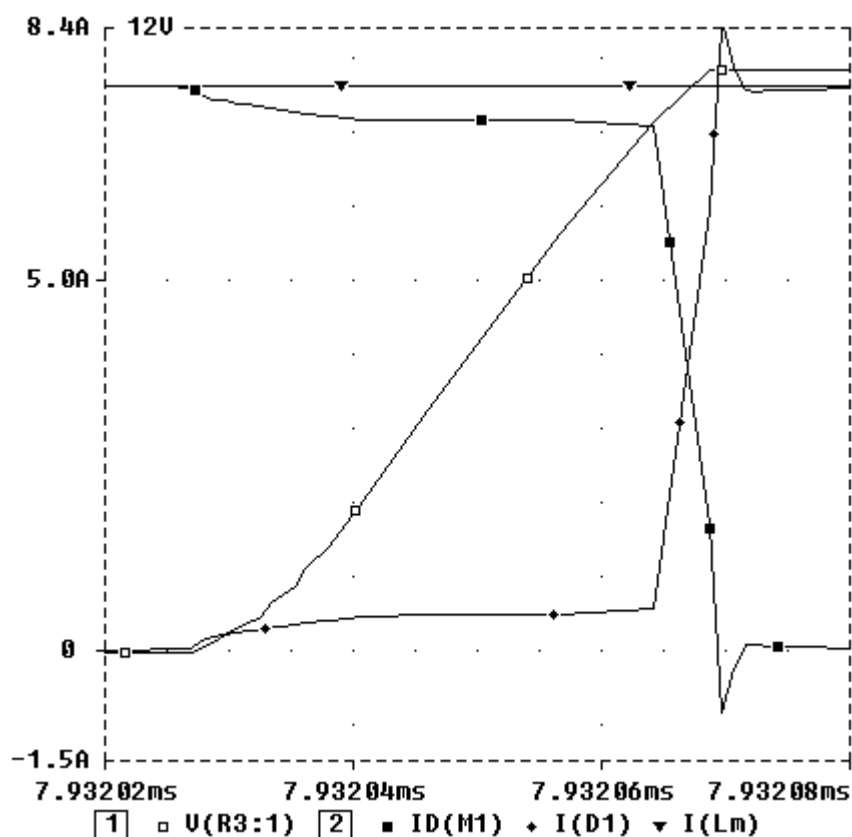


Рис. 17. Процесс выключения транзистора

Рис. 16 и 17 подтверждают необходимость уменьшения (желательно полного исключения) коммутационных потерь в преобразователях повышенной мощности.

На рис. 18 изображена модель повышающего преобразователя с LCD-цепью. Коэффициент регулирования $D=0,2$, выходная мощность составляет около 2,0 кВт.

На рис. 19 показана форма выходного напряжения: $U_H = 362.25V$. В схеме без LCD-цепи получено $U_H = 342V$.

На рис. 20 показаны ток стока, ток основной индуктивности и напряжение между стоком и истоком ($U_{сн}/30$). По сравнению с преобразователем без LCD-цепи получено существенное уменьшение коммутационных потерь за счет практически полного устранения «перекрытия» тока стока и напряжения между стоком и истоком. Всплеск тока стока — это передача энергии конденсатора C_2 в аккумулирующий конденсатор C_1 через обмотку дросселя и включаемый транзистор.

На рис. 21 выделен процесс включения транзистора (рис. 20).

На рис. 22 выделен процесс выключения транзистора (рис. 20).

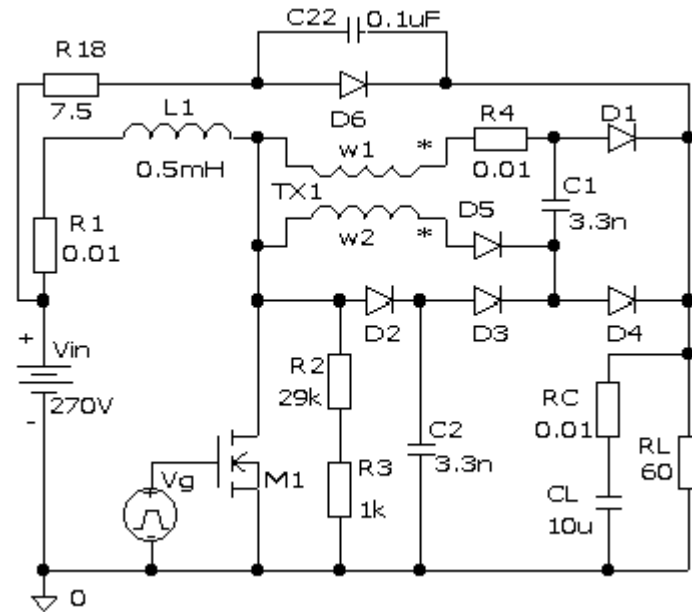


Рис. 18. Модель повышающего преобразователя с LCD-нагрузкой

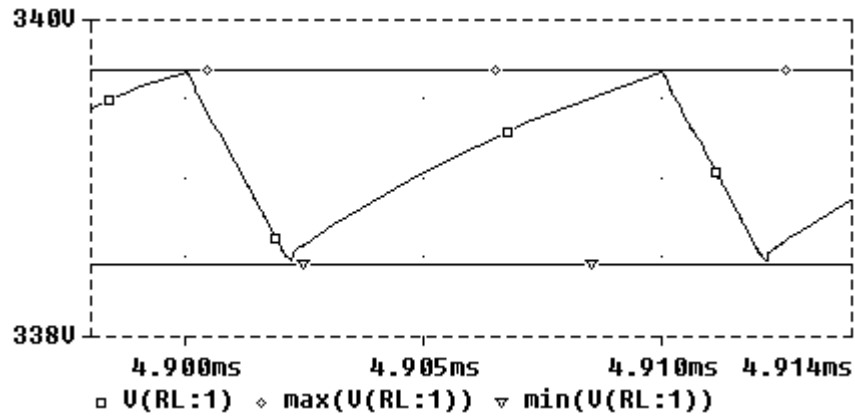


Рис. 19. Выходное напряжение в схеме рис. 18

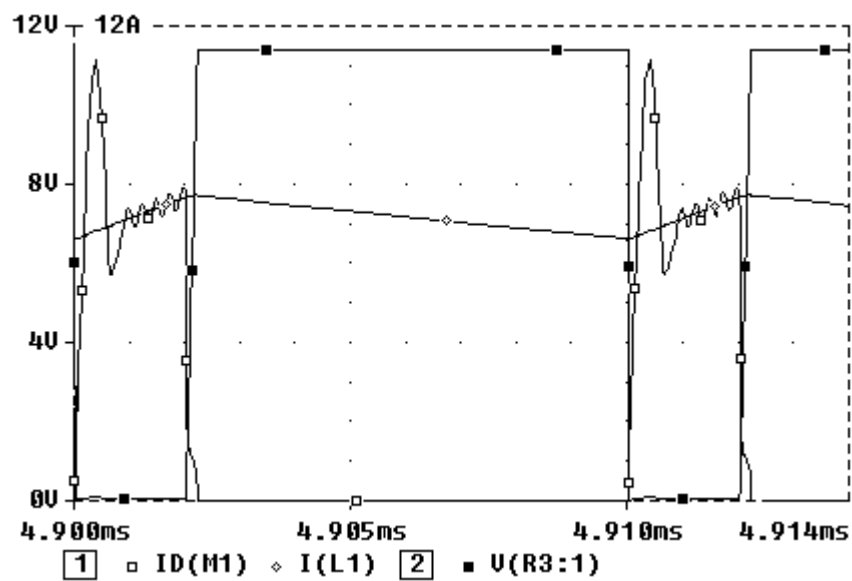


Рис. 20. Ток стока, входной ток индуктивности и напряжение сток-исток

На рис. 23 приведены процессы включения и выключения транзистора (напряжение между стоком и истоком и на конденсаторах C_1 и C_2). При включении транзистора напряжение $U_{си}$ сразу падает практически до нуля.

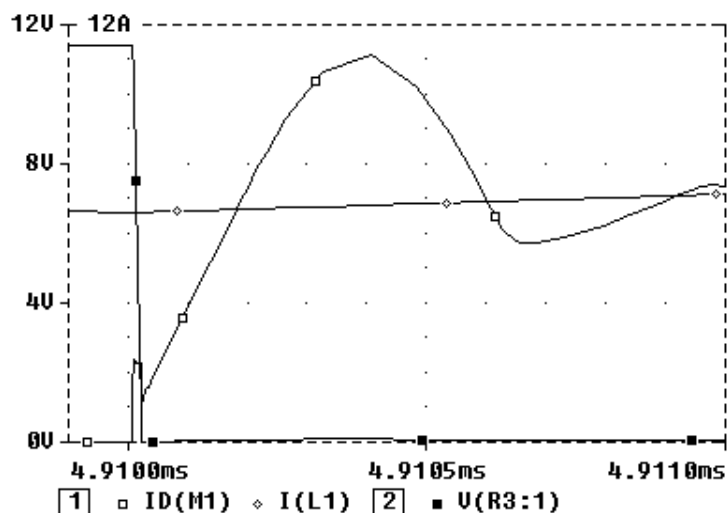


Рис. 21. Процесс включения транзистора в повышающем преобразователе с LCD – цепью

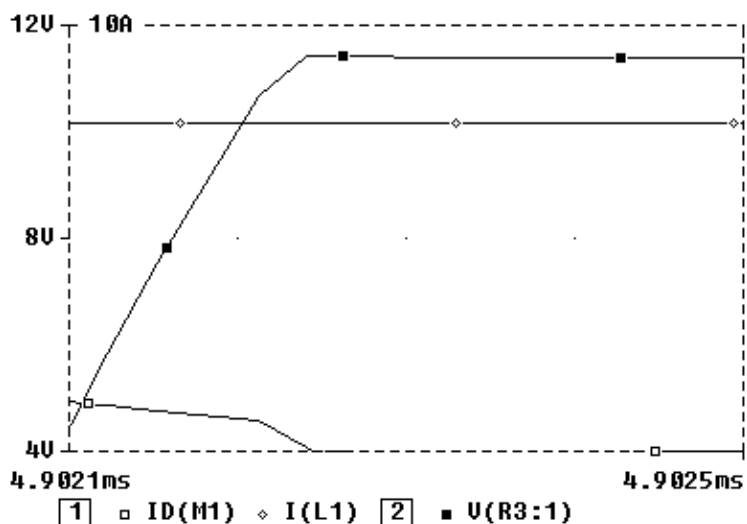


Рис. 22. Процесс выключения транзистора в повышающем преобразователе с LCD - цепью

При выключении транзистора напряжения $U_{си}$ и на конденсаторе C_2 совпадают. Скорость нарастания определяется величиной C_2 . В начале импульса энергия из C_2 передается в C_1 — выброс напряжения на C_2 (рис. 1). Процесс передачи энергии — колебательный. В момент включения транзистора энергия из C_1 поступает в нагрузку через диод D_4 (в это время диод D_1 смещен в обратном направлении).

На рис. 24 показаны токи в схеме повышающего преобразователя с LCD-цепью. В качестве опорного тока использован ток основной индуктивности.

На рис. 24а ток диода D_2 имеет "всплеск". В этот момент транзистор закрывается, и ток основной индуктивности протекает через конденсатор C_2 , заряжая его. Ток через диод D_1 по времени не совпадает с началом "спада" тока через основную индуктивность. Эта задержка связана с тем, что на этом этапе ток основной индуктивности замыкается через конденсатор C_1 и диод D_5 . Энергия, аккумулированная в конденсаторе C_1 , передается в нагрузку.

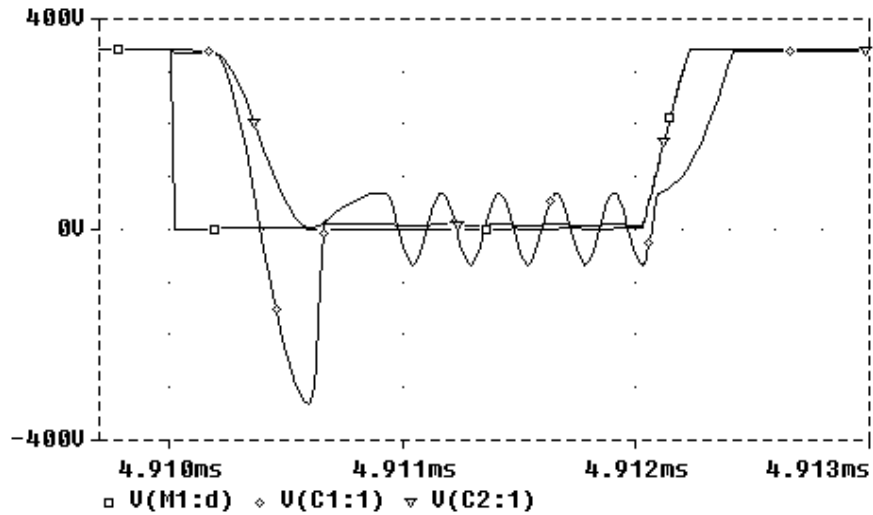


Рис. 23 Включение и выключение транзистора: напряжения сток – источник и на конденсаторах C_1 и C_2

На рис. 24б первый "всплеск" тока диода D_3 — это передача энергии в конденсатор C_1 . Второй всплеск тока — передача энергии в нагрузку через диод D_4 .

На рис. 24в ток диода D_4 — это сумма токов разряда конденсатора C_1 и тока через диод D_3 .

На рис. 24г ток диода D_5 — в момент включения транзистора ток отключения диода D_1 , протекающий через обмотку вспомогательного дросселя, трансформируется во вторичную обмотку и подзаряжает конденсатор C_1 .

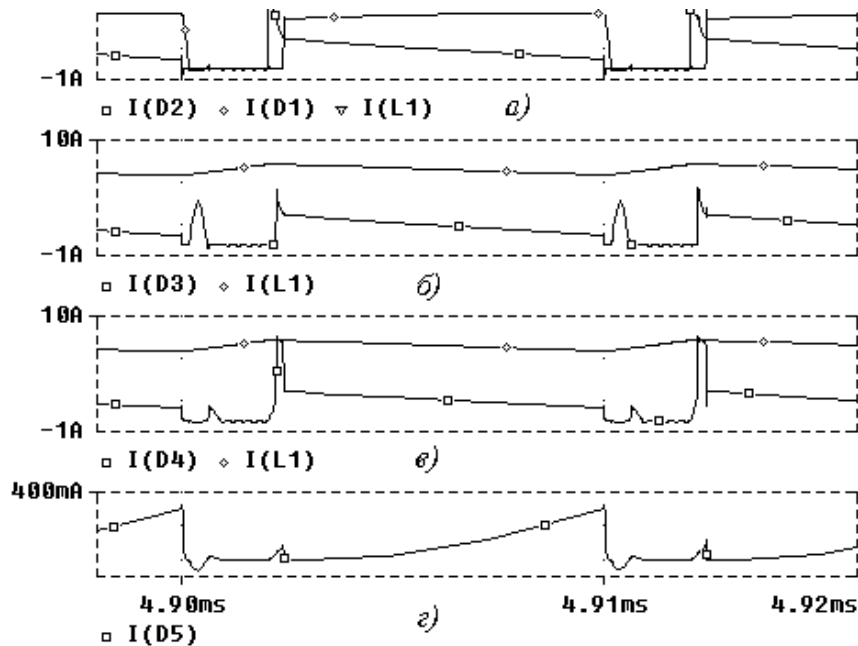


Рис. 24. Токи в схеме повышающего преобразователя с LCD-цепью: а) токи диодов D_2 и D_1 и основной индуктивности; б) токи диода D_3 и основной индуктивности; в) токи диода D_4 и основной индуктивности; г) токи диода D_5

Предложена индуктивно-емкостная цепь транзита возможных коммутационных потерь в нагрузку. В предложенной схеме происходит выделение модуля энергии возможных коммутационных потерь, аккумулярование и передача в нагрузку.