

УДК 621.314.5

СТАБИЛИЗАТОР НАПЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЛАЗЕРОВ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ

В.В. Татур

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

E-mail: tatur@imces.ru

Стабилизатор напряжения на накопительном конденсаторе предназначен для преобразования постоянного нестабилизированного напряжения в импульсное, стабилизированное по амплитуде, в схемах электропитания лазеров. Принцип действия устройства основан на возможности предварительного заряда накопительного конденсатора до напряжения, позволяющего компенсировать переменную составляющую входного напряжения.

Ключевые слова:

Накопительный конденсатор, дифференциальное уравнение второго порядка, зарядный контур, цепь стабилизации, входное напряжение, выходное напряжение.

Key words:

Storage capacitor, second-order differential equation, charging circuit, stabilization circuit, input voltage, output voltage.

Введение

В электронике и электротехнике широко используют импульсные методы электропитания. Принцип действия таких схем основан на разряде энергии, запасенной в накопительном конденсаторе, на нагрузку. Большинство источников электропитания лазеров на парах металлов построено по такой схеме [1–3]. Мощность, выделяемая на нагрузку, в частности, на газоразрядной трубке, рассчитывается по формуле

$$P = CU^2 f / 2, \quad (1)$$

где C — емкость накопительного конденсатора; U — напряжение на конденсаторе; f — частота повторения импульсов.

Как видно из формулы, мощность, выделяемая на нагрузку, пропорциональна квадрату напряжения, до которого заряжен конденсатор. Согласно формуле (1) повышение этого напряжения на 10 % приводит к увеличению выходной мощности на нагрузку на 21 %, а уменьшение на 10 % приводит к уменьшению выходной мощности на нагрузку на 19 %. Такое изменение мощности на газоразрядной трубке лазеров на парах металлов заметно дестабилизирует выходную мощность лазерного излучения.

В предлагаемой работе приводится техническое решение, которое позволит решить проблему стабилизации напряжения на накопительном конденсаторе.

1. Обоснование технического решения

В силовой импульсной технике часто используется схема с колебательным режимом заряда накопительного конденсатора, рис. 1.

Процесс заряда накопительного конденсатора в такой схеме хорошо известен и описывается дифференциальным уравнением второго порядка. В результате решения этого уравнения можно получить зависимость изменения напряжения на накопительном конденсаторе $U_{\text{вх}}$ от времени t [4]:

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} - \frac{U_{\text{вх}}}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi), \quad (2)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = 2\pi/T_0$ — угловая частота собственных колебаний зарядного контура; T_0 — период собственных колебаний; $\alpha = R/2L$ — коэффициент затухания свободной составляющей; ψ — начальная фаза; $\sin \psi = \omega_0 \sqrt{L/C}$.

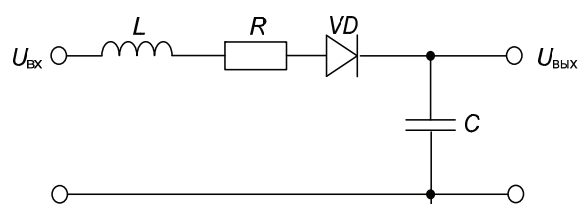


Рис. 1. Схема заряда накопительного конденсатора: C — накопительный конденсатор, L — зарядная индуктивность, R — активное сопротивление цепи зарядного контура, VD — диод

Колебательный режим заряда осуществляется при условии, что время заряда накопительного конденсатора через зарядную индуктивность значительно превышает время его разряда на нагрузку, а активное сопротивление много меньше критического сопротивления зарядной цепи $R \ll R_{\text{кр}} = 2\sqrt{L/C}$. С учетом этих ограничений напряжение на накопительном конденсаторе в момент времени $t = T_0/2$ можно вычислять по формуле

$$U_{\text{вх}} = 2U_{\text{вх}}. \quad (3)$$

В момент достижения на накопительном конденсаторе напряжения $2U_{\text{вх}}$ произойдет запирающее действие диода, и это напряжение удерживается на накопительном конденсаторе до момента разряда запасенной энергии на нагрузку.

Такой режим заряда накопительного конденсатора является наиболее выгодным с точки зрения минимизации потерь мощности и позволяет зарядить конденсатор до удвоенного напряжения пита-

ния. Но относительная стабильность напряжения $U_{\text{вых}}$ остается равной относительной стабильности напряжения $U_{\text{вх}}$.

Режим заряда накопительного конденсатора до удвоенного напряжения питания возможен при условии нулевых начальных условий, т. е. в начале очередного цикла заряда напряжение на конденсаторе равно нулю. Если на конденсаторе уже имеется какое-то напряжение ΔU , тогда процесс заряда накопительного конденсатора будет описываться формулой

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - \frac{U_{\text{вх}} - \Delta U}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi). \quad (4)$$

Представим входное напряжение $U_{\text{вх}}$ в виде

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{ст}} + \Delta U_{\text{вх}},$$

где $U_{\text{ст}}$ — постоянная составляющая входного напряжения; $\Delta U_{\text{вх}}$ — переменная составляющая входного напряжения.

Если предварительно зарядить накопительный конденсатор до напряжения $\Delta U = \Delta U_{\text{вх}}$, то после подстановки этих величин в формулу (4), при $R=0$ и $t=T_0/2$, выходное напряжение будет равно

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{ст}} + \Delta U_{\text{вх}} + U_{\text{ст}} + \Delta U_{\text{вх}} - 2\Delta U_{\text{вх}} = 2U_{\text{ст}}. \quad (5)$$

Как видно из полученной формулы (5), $U_{\text{вых}}$ на накопительном конденсаторе не зависит от напряжения $\Delta U_{\text{вх}}$, а определяется только постоянной составляющей входного напряжения $U_{\text{ст}}$.

2. Анализ эквивалентной схемы

На рис. 2 приведена эквивалентная схема, с помощью которой может быть реализован вышеописанный метод. Резисторы $R1$ и $R2$ в реальной схеме отсутствуют, фактически они представляют эквивалентное сопротивление каждой из зарядных цепей, состоящих из активного сопротивления зарядных индуктивностей и диодов.

При $U_{\text{вх}} < U_{\text{ст}}$ стабилитрон $VD_{\text{ст}}$ закрыт, напряжение $\Delta U_{\text{вх}} = 0$, цепь индуктивность $L2$ — диод $VD2$ не будет оказывать влияния на работу схемы. Заряд накопительного конденсатора C будет осуществляться по цепи индуктивность $L1$ — диод $VD1$. Согласно формуле (2) зависимость изменения напряжения на накопительном конденсаторе от времени будет описываться формулой

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - \frac{U_{\text{вх}}}{\omega_{01} \sqrt{L1C}} e^{-\alpha_1 t} \sin(\omega_{01} t + \psi_1), \quad (6)$$

Процесс заряда накопительного конденсатора показан на рис. 3, а, кривая 1. Диод $VD1$ в момент времени $T_{01}/2$ закроется, и напряжение на накопительном конденсаторе останется на максимальном уровне. При $t=T_{01}/2$, $R=0$ в формуле (6) $U_{\text{вых}} = 2U_{\text{вх}}$, что соответствует вышеприведенной формуле (3). Стабилизация напряжения на накопительном конденсаторе в этом режиме отсутствует.

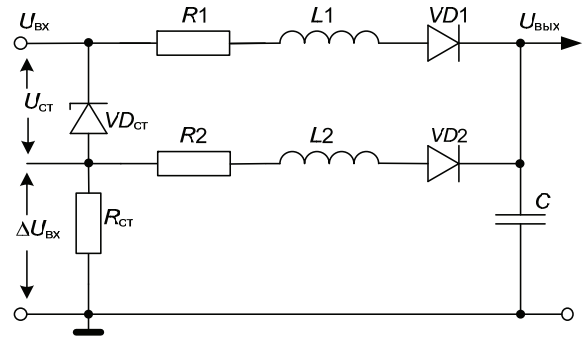


Рис. 2. Эквивалентная схема

При $U_{\text{вх}} > U_{\text{ст}}$ стабилитрон $VD_{\text{ст}}$ начнет открываться, и на резисторе $R_{\text{ст}}$ появится напряжение, которое для предложенного схемного решения соответствует переменной составляющей входного напряжения $\Delta U_{\text{вх}}$. Это напряжение подается на дополнительную зарядную цепь: индуктивность $L2$ — диод $VD2$. В таком режиме накопительный конденсатор C заряжается по двум параллельным зарядным цепям $L1-VD1$ и $L2-VD2$ от напряжений $U_{\text{вх}}$ и $\Delta U_{\text{вх}}$ соответственно. Процесс заряда накопительного конденсатора в такой схеме описывается дифференциальным уравнением третьего порядка. Введем некоторые ограничения в решение данной задачи. Индуктивность $L2$ должна быть много меньше индуктивности $L1$. При этом заряд накопительного конденсатора C по второй зарядной цепи индуктивность $L2$ — диод $VD2$ от напряжения $\Delta U_{\text{вх}}$ будет осуществляться значительно быстрее, чем по цепи индуктивность $L1$ — диод $VD1$ от входного напряжения $U_{\text{вх}}$. До момента запирающего диода $VD2$ влиянием цепи заряда $L1-VD1$ можно пренебречь. При таких допущениях описание процесса заряда можно свести к дифференциальному уравнению второго порядка, а зависимость напряжения на накопительном конденсаторе при заряде от второй зарядной цепи $U_{\text{вых}}^*$ будет описываться уравнением (7), аналогичным уравнению (6), при условии, что работает вторая зарядная цепь от входного напряжения $\Delta U_{\text{вх}}$.

$$U_{\text{вых}}^* = \Delta U_{\text{вх}} - \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\omega_{02} \sqrt{L2C}} e^{-\alpha_2 t} \sin(\omega_{02} t + \psi_2). \quad (7)$$

Процесс заряда накопительного конденсатора в этом режиме показан на рис. 3, а, кривая 2. Диод $VD2$ в момент времени $T_{02}/2$ закроется, и напряжение на накопительном конденсаторе останется на максимальном уровне для данного входного напряжения. При $t=T_{02}/2$, $R=0$ в формуле (7) $U_{\text{вых}}^* = \Delta U_{\text{вх}}$. После запирающего диода $VD2$ вторая зарядная цепь устраняется из процесса заряда, и дальнейший заряд накопительного конденсатора осуществляется по первой зарядной цепи $L1-VD1$. При этом имеющееся напряжение на накопительном конденсаторе $2\Delta U_{\text{вх}}$ является напряжением начальных условий для зарядного контура $L1-VD1-C$, т. е. $U_{\text{вых}}^* = 2\Delta U_{\text{вх}} = \Delta U$.

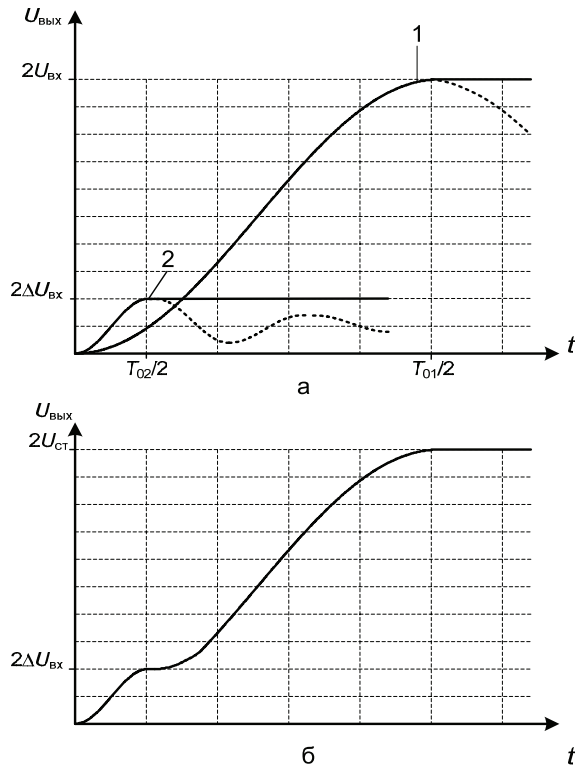


Рис. 3. Процесс заряда накопительного конденсатора: а) кривая 1, 2 – от первой и второй зарядных цепей; б) заряд от двух зарядных цепей

Процесс заряда накопительного конденсатора в такой схеме описывается дифференциальным уравнением второго порядка с не нулевыми начальными условиями. В результате решения этого уравнения можно получить зависимость изменения напряжения на накопительном конденсаторе $U_{\text{ВЫХ}}$ от времени:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} - \frac{U_{\text{ВХ}} - 2\Delta U_{\text{ВХ}}}{\omega_{01} \sqrt{L_1 C}} e^{-\alpha_1 t} \sin(\omega_{01} t + \psi_1).$$

При $t = T_{01}/2$, $R=0$ получим ранее приведенную формулу (5), где $U_{\text{ВЫХ}} = 2U_{\text{СТ}}$.

Таким образом, напряжение на накопительном конденсаторе $U_{\text{ВЫХ}}$ будет равно удвоенному напряжению на стабилитроне $U_{\text{СТ}}$ и не будет зависеть от переменной величины $\Delta U_{\text{ВХ}}$. На рис. 3, б, показана результирующая кривая процесса последовательного заряда накопительного конденсатора от двух зарядных цепей, которая получена сложением кривых, приведенных на рис. 3, а, и отражает качественный характер процессов, происходящих в схеме.

3. Экспериментальная часть

На рис. 4 приведена электрическая схема эксперимента, питание которой осуществляется от сети переменного напряжения 220 ± 22 В. Регулируемый автотрансформатор Т1 позволяет регулировать входное напряжение от 0 до 250 В. (Для обеспечения техники безопасности при снятии характеристик, на входе схемы дополнительно использовался гальванически развязывающий трансформатор). На диодах VD1, VD2 и конденсаторах C1, C2 выполнен выпрямитель с удвоением напряжения. На выходе выпрямителя в точке $U_{\text{ВХ}}$ получаем выпрямленное, не стабилизированное напряжение, регулируемое с помощью автотрансформатора в диапазоне от 0 до 700 В. Это напряжение напрямую подается на первую зарядную цепь L1–VD4. Цепь выделения напряжений $U_{\text{СТ}}$ и $\Delta U_{\text{ВХ}}$ выполнена на стабилитронах VD_{СТ1} и VD_{СТ2} (супрессорах) – 1,5KE250A и резисторе R1 – CF1-51 кОм. Такая цепочка позволяет разделить входное напряжение на $U_{\text{СТ}} = 500$ В и $\Delta U_{\text{ВХ}}$, регулируемое в диапазоне от 0 до 200 В.

Напряжение $\Delta U_{\text{ВХ}}$ усиливается по току транзистором VT1 – KT898A и подается на вторую зарядную цепь L2–VD5. Трансформатор T2, диодный мост VD3 и фильтрующий конденсатор C3 предназ-

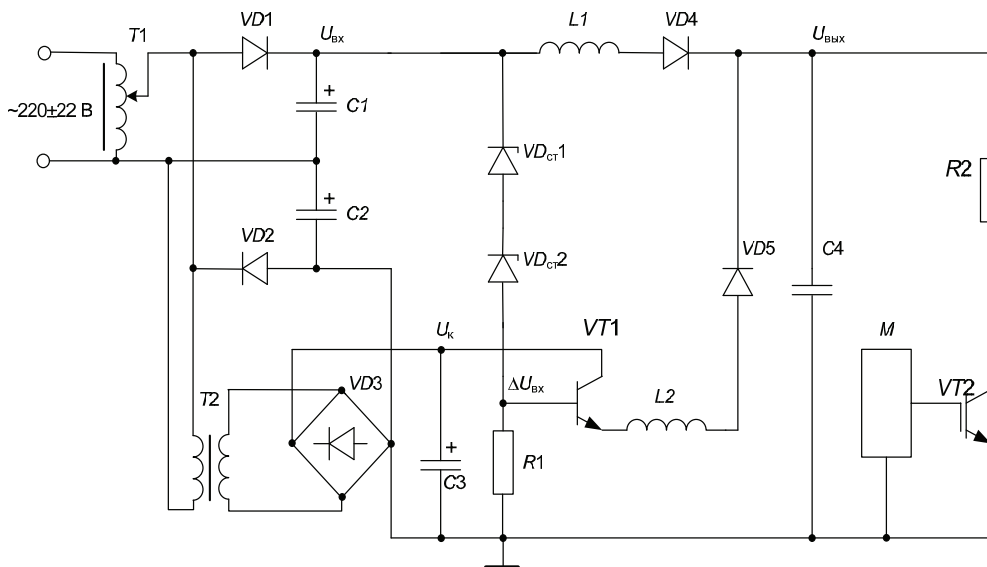


Рис. 4. Электрическая схема

начены для получения напряжения U_k , питающего транзистор $VT1$. Это напряжение должно быть рассчитано таким образом, чтобы при максимальном входном напряжении сети U_k было больше максимального $\Delta U_{вх}$ на величину полностью открытого транзистора $VT1$, то есть $U_k - 201$ В. В качестве накопительного конденсатора $C4$ выбран конденсатор К78-2-1600В – 4700 пФ.

Примем время заряда накопительного конденсатора по первой зарядной цепи $T_{01}/2=50$ мкс. Индуктивность $L1$ может быть рассчитана по формуле

$$L1 = \frac{(T_{01}/2)^2}{\pi^2 C}.$$

После расчетов и округления выбираем индуктивность $L1=50$ мГн. Частота повторения импульсов в схеме должна быть не более 20 кГц для обеспечения полного заряда накопительного конденсатора и гарантированного запирающего диода $VD4$. Диоды в зарядных цепях $VD4$ и $VD5$ выбираем типа HER108. Транзистор $VT2$ – IRG4PH50U, управляется от генератора M . Время открытого состояния этого транзистора, в течение которого происходит разряд накопительного конденсатора, составляет 0,5 мкс. Таким образом, выполняется условие, что время заряда накопительного конденсатора значительно больше времени его разряда. Резистор $R2$ служит в качестве нагрузки, на которой выделяется энергия, запасенная в накопительном конденсато-

ре. Сопротивление резистора $R2=20$ Ом. Такое сопротивление позволяет осуществить разряд накопительного конденсатора за время открытого состояния транзистора $VT2$ до нуля.

На рис. 5 приведены эпюры напряжений на накопительном конденсаторе при изменении входного напряжения от 500 до 700 В. Индуктивность во втором зарядном контуре $L2=1,7$ мГн. При $U_{ст}=500$ В (стабилитроны $VD_{ст1}$ и $VD_{ст2}$ по 250 В) стабилизация начиналась при входном напряжении около 525 В. При изменении входного напряжения от 525 до 700 В (525+33,3 %) выходное напряжение менялось от 1033 до 1121 В (1033+8,5 %).

Стабилизация напряжения на накопительном конденсаторе наблюдается, но коэффициент стабилизации достаточно низкий (33,3 %/8,5 % = 3,9).

На рис. 6 показаны аналогичные эпюры напряжений при $L2=0,5$ мГн. В этом случае выходное напряжение менялось от 1069 до 1075 В (1069+0,56 %), коэффициент стабилизации составил 59,5.

Дальнейшее уменьшение индуктивности $L2$ относительно $L1$ к увеличению коэффициента стабилизации не приводило. Таким образом, при выше приведенных параметрах схемы оптимальное значение $L2$ в 100 раз меньше, чем $L1$.

Амплитуда напряжения на накопительном конденсаторе в такой схеме может регулироваться дискретно, заменой стабилитронов $VD_{ст1}$ и $VD_{ст2}$.

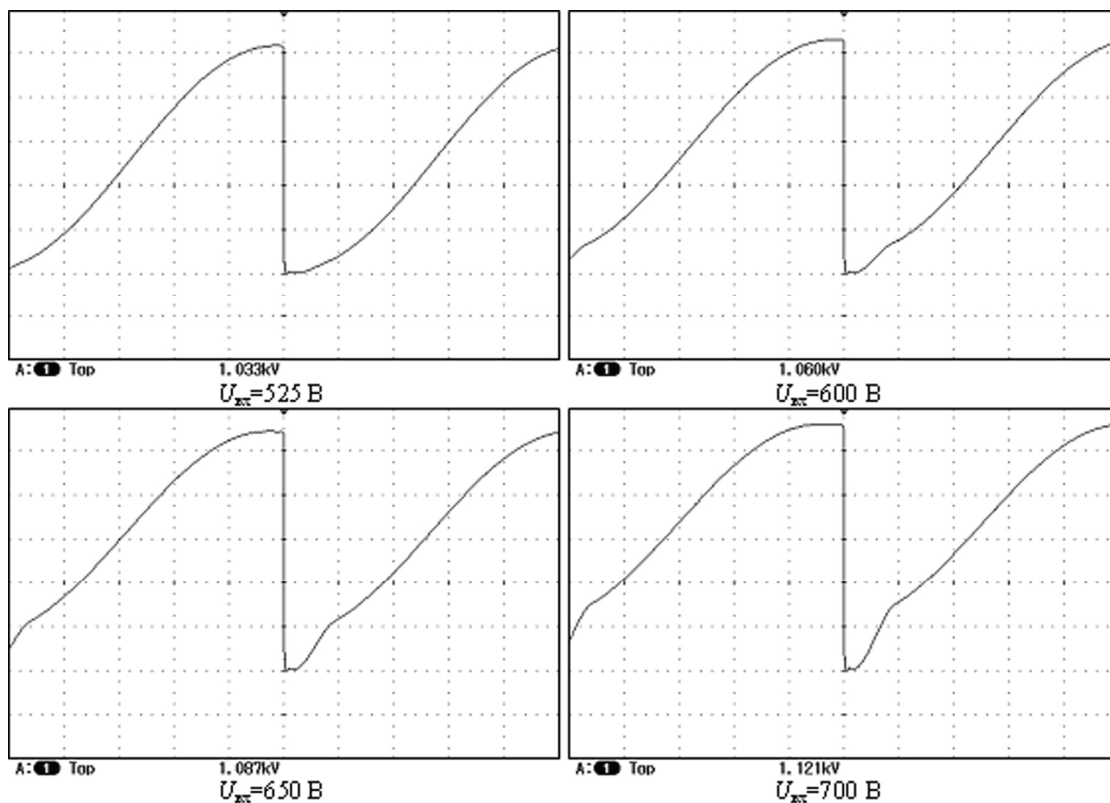


Рис. 5. Эпюры напряжений при $L1=50$ мГн, $L2=1,7$ мГн

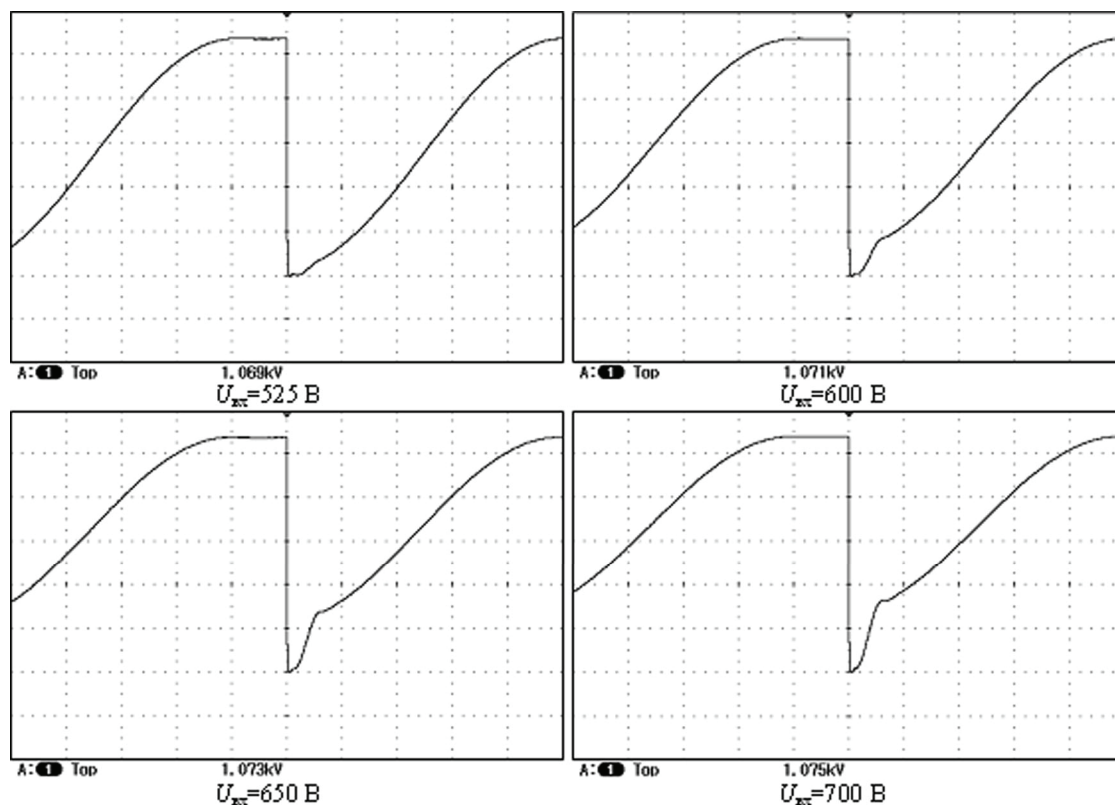


Рис. 6. Эпюры напряжений при $L1=50$ мГн, $L2=0,5$ мГн

Закключение

Предлагаемый метод стабилизации напряжения на накопительном конденсаторе основан на возможности предварительного заряда этого конденсатора до напряжения, позволяющего компенсировать переменную составляющую входного напряжения. При этом на входе схемы заряда накопительного конденсатора используется постоянное нестабилизированное напряжение.

Стабилизатор напряжения на накопительном конденсаторе реализован в модификации лазера на парах бромида меди с транзисторным коммутатором. Это позволило значительно повысить стабильность лазерного излучения. Устройство надежно в эксплуатации, просто в настройке и может быть использовано при разработке импульсных источников питания различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батенин В.М., Бучанов В.В., Молодых Э.И. и др. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. — М.: РФФИ, 1998. — 544 с.
2. Волков И.В., Вакуленко В.М. Источники электропитания лазеров. — Киев: Техника, 1976. — 176 с.
3. Визирь В.А., Иванов С.В., Манылов В.И. и др. Генератор сильноточных импульсов для накачки газового разряда // Приборы и техника эксперимента. — 2007. — № 2. — С. 84–86.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 1984. — 559 с.
5. Пат. 2371824 Российская Федерация. МКИ H02J 7/10. Устройство для стабилизации напряжения на накопительном конденсаторе / Татур В.В., заявитель и патентообладатель Институт мониторинга климатических и экологических систем. — № 2008132223; заявл. 04.08.2008; опубл. 27.10.2009. Бюл. № 30.
6. Суханов В.Б., Татур В.В. Эксплуатационные характеристики CuBr-лазера с транзисторным коммутатором // Известия Томского политехнического университета. 2008. — Т. 312. — № 2. — С. 108–110.

Поступила 12.11.2009 г.