

Лабораторная работа 2.

Импульсный преобразователь напряжения

Расчеты КПД линейных стабилизаторов показывают, что при преобразовании высокого входного напряжения в низкое выходное приходится сталкиваться с серьезными проблемами тепловыделения. Кроме того, возникают ситуации, когда необходимо организовать питание с напряжением питания выше, чем может дать источник питания. В таких случаях на помощь приходят схемы импульсных преобразователей напряжения.

В отличие от линейных схем в импульсных преобразователях регулирующий элемент (РЭ) работает в ключевом режиме, в связи с этим большую часть времени он находится либо в режиме отсечки (ток не течет) либо в режиме насыщения (регулирующий элемент обладает максимально возможной проводимостью). В обоих этих случаях рассеиваемая на РЭ мощность существенно меньше мощности, выделяемой на РЭ в активном (линейном) режиме работы, являющемся основным для линейных схем.

В данной работе будет рассмотрена одна из разновидностей ИПН – повышающий преобразователь.

Принцип действия повышающего ИПН

Электрическая схема повышающего преобразователя напряжения показана на рисунке 1.

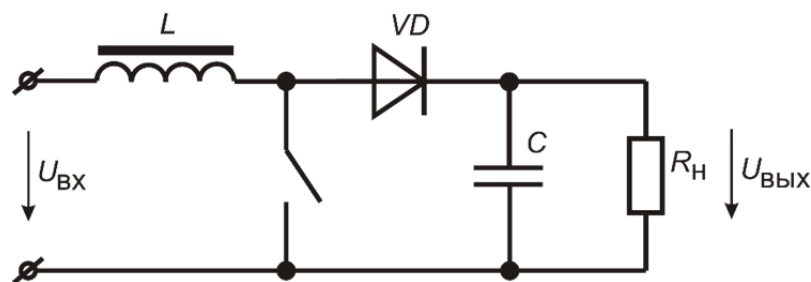


Рис.1 Схема повышающего преобразователя

Для поддержания необходимого выходного напряжения осуществляется периодическая, с периодом T , коммутация ключа. Рабочий цикл схемы состоит из 2 тактов: в течение времени DT ключ замкнут, в течение оставшейся части периода $(1-D)T$ ключ разомкнут. Величина D – коэффициент заполнения импульса, принимает значения от 0 до 1.

При замкнутом ключе ток от источника $U_{вх}$ протекает через катушку индуктивности L и замкнутый ключ (диод VD закрыт). В катушке индуктивности запасается энергия магнитного поля. При размыкании ключа диод открывается. Запасенная энергия проходит через диод, заряжает выходной конденсатор C и обеспечивает ток нагрузки R_n . Превышение выходного напряжения над входным достигается за счет того, что заряженная на первом такте преобразования катушка индуктивности начинает работать как источник ЭДС, включенный последовательно с источником $U_{вх}$.

В установившемся режиме изменения токов и напряжений на компонентах схемы имеют периодический характер. Ток в катушке индуктивности линейно изменяется от значения I_{min} до значения I_{max} . Суммарное изменение тока в катушке индуктивности за два такта преобразования равно нулю

$$\Delta i_1 + \Delta i_2 = 0 \quad (1)$$

Изменение тока на первом такте преобразования:

$$\Delta i_1 = \frac{U_L}{L} \Delta t = \frac{U_{вх}}{L} t_{и} \quad (1.a)$$

На втором такте:

$$\Delta i_2 = \frac{(U_{вх} - U_{вых})}{L} (T - t_{и}) \quad (1.б)$$

Исходя из соотношения (1), получают расчетное соотношение для выходного напряжения повышающего стабилизатора:

$$U_{вых} = U_{вх} \frac{1}{1-D} = \frac{U_{вх}}{D'}, \quad (2)$$

где $D' = 1-D$.

Важно отметить, что за время периода T величина тока в катушке индуктивности не должна уменьшаться до нуля (Рис. 2).

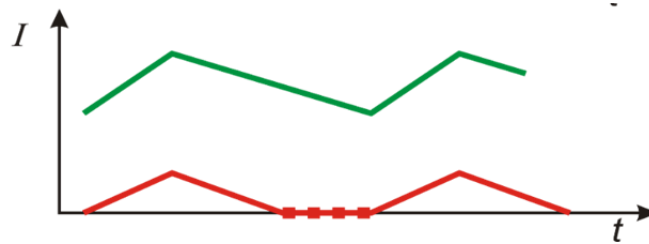


Рис. 2 Графики изменения тока в катушке индуктивности для режимов непрерывного и прерывистого токов

В противном случае схема перейдет в режим прерывистого тока, и рассмотренные расчетные соотношения окажутся неприменимы.

Покажем на одной временной оси графики изменения тока в различных точках схемы преобразователя

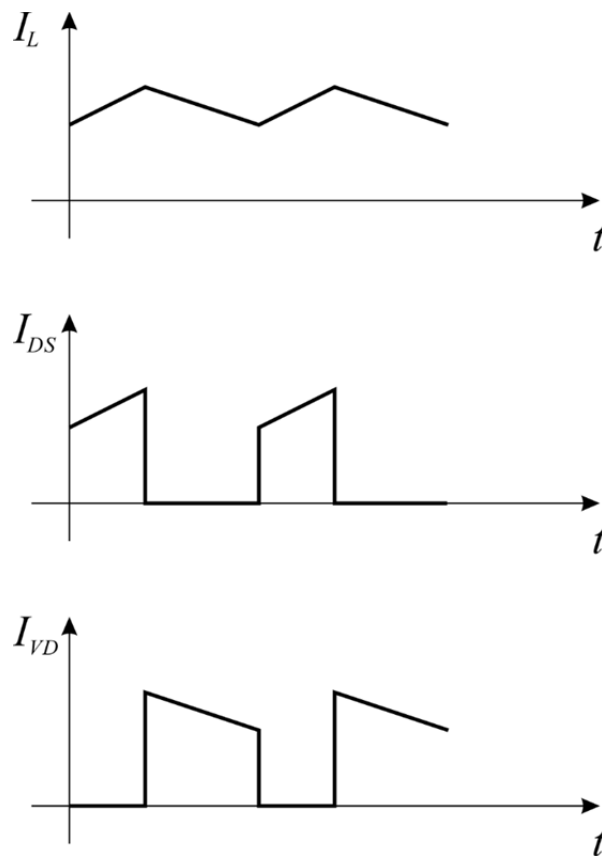


Рис. 3 Графики изменения тока в катушке индуктивности, ключевом элементе и диоде

Ток через катушку индуктивности протекает на протяжении всего периода: на первом такте линейно нарастает, на втором такте линейно уменьшается. Колебания происходят между значениями I_{min} и I_{max} .

Ток через ключ протекает только на первом такте, после чего спадает до нуля. Ток через диод протекает только на втором такте.

При практической реализации ИПН необходимо учитывать особенности электронных компонентов, реализующих его электрическую схему. В отличие от идеальной модели физически реализуемые электронные компоненты имеют ряд дополнительных параметров, а также характеризуются допустимыми рабочими режимами.

Дополнительные параметры, такие как внутренние сопротивления ключа, ESR катушки индуктивности и конденсатора, влияют на характеристики схемы. Одной из наиболее чувствительных к этому характеристик является КПД схемы.

Таким образом в процесс проектирования схемы ИПН можно выделить следующие этапы:

- 1) Анализ и расчет параметров и режимов работы идеальной модели;
- 2) Выбор электронных компонентов для практической реализации схемы с учетом рассчитанных рабочих режимов;
- 3) Дополнение модели параметрами выбранных электронных компонентов;
- 4) Анализ КПД схемы.

Методика расчета компонентов схемы

1. Расчет коэффициента заполнения импульсов (см. соотношение (2)).
2. Расчет катушки индуктивности.

Величина индуктивности определяет скорость нарастания тока в катушке. Временные характеристики процессов определяются частотой преобразования и коэффициентом заполнения импульсов. Определим диапазон изменения тока через катушку.

Средний ток через катушку индуктивности равен входному току, потребляемому схемой от источника $U_{\text{вх}}$:

$$I_{L \text{ средн.}} = I_{\text{вх}}$$

По закону сохранения энергии, мощность, отдаваемая в нагрузку, не превосходит мощность, потребляемую от первичного источника:

$$U_{\text{вых}} I_{\text{вых}} \leq U_{\text{вх}} I_{\text{вх}}$$

Отсюда можно получить выражение для среднего тока катушки индуктивности:

$$I_{L \text{ средн.}} \geq I_{\text{вых}} \cdot \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$$

При проектировании преобразователя задается величина LIR - относительная пульсация тока через катушку индуктивности.

$$LIR = \frac{\Delta I_L}{I_L}$$

Зная средний ток и величину LIR, можно определить диапазон изменения тока ΔI_L , его минимальное I_{min} и максимальное I_{max} значения. После того, как найдено значение ΔI_L из соотношения 3.а можно найти необходимое значение индуктивности катушки:

$$L = \frac{U_{\text{вх}} t_{\text{и}}}{\Delta I_L} = \frac{U_{\text{вх}} T D}{I_{\text{вх}} \cdot LIR} = \frac{U_{\text{вх}} D}{I_{\text{вх}} \cdot LIR \cdot f} \quad (3.а)$$

$$L \geq \frac{U_{\text{вх}}^2 D}{I_{\text{вых}} \cdot U_{\text{вых}} \cdot LIR \cdot f} \quad (3.б)$$

Из выведенной формулы видно, что при увеличении частоты преобразования f требуется меньшее значение индуктивности L . Таким образом, повышение частоты преобразования позволяет уменьшить массогабаритные характеристики устройства.

3. Расчет емкости выходного конденсатора

Колебания выходного напряжения схемы обусловлены изменением заряда выходного конденсатора. Для того, чтобы напряжение $U_{\text{вых}}$ находилось в допустимой окрестности $\Delta U_{\text{вых}}$ необходимо, чтобы величина изменения заряда конденсатора, происходящая на втором такте (при разомкнутом ключе) не превосходила разность Δq величины заряда, принесенного из катушки индуктивности, и ушедшего в нагрузку.

$$\Delta q \leq I_L(T - t_{\text{и}}) - I_{\text{н}}(T - t_{\text{и}})$$

$$\Delta q \leq \left(\frac{I_{\text{min}} + I_{\text{max}}}{2} - I_{\text{н}} \right) (T - t_{\text{и}})$$

Тогда емкость конденсатора определяется соотношением (4):

$$C_{\text{вых}} = \frac{\Delta q}{\Delta U_{\text{вых}}}$$

$$C_{\text{вых}} \geq \frac{\left(\frac{I_{\text{min}} + I_{\text{max}}}{2} - I_{\text{н}} \right) (T - t_{\text{и}})}{\Delta U_{\text{вых}}} \quad (4)$$

Рабочие режимы электронных компонентов

При реализации повышающего ИПН в качестве ключа может быть применен N-канальный полевой транзистор. Схема принимает следующий вид:

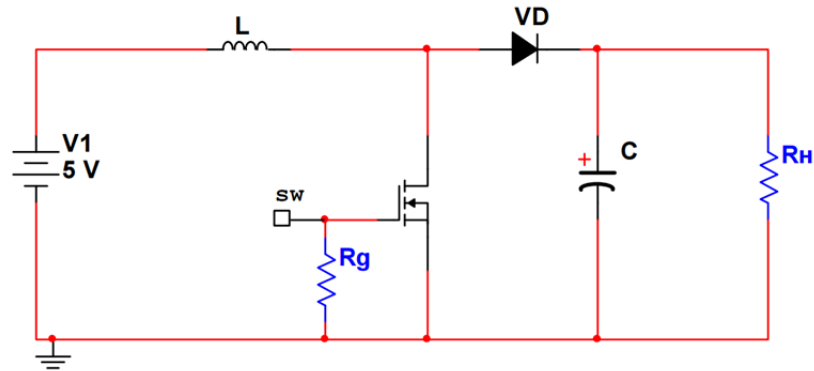


Рис. 4 Схема электрическая принципиальная повышающего ИПН

Полевой транзистор

Характеристики:

Максимальное напряжение сток-исток (drain-source) $U_{СИ}$, U_{DS} ;

Максимальное напряжение затвор-исток (gate-source) $U_{ЗИ}$, U_{GS} ;;

Максимальный ток канала $I_{СИ}$, I_{max} ;

Сопротивление канала в открытом состоянии $R_{СИ}$, R_{DS} , R_{on} .

Рабочие режимы:

Максимальное значение $U_{СИ}$ формируется после закрытия ключа, и превосходит выходное напряжение схемы на величину падения напряжения на диоде VD.

Максимальное значение тока через канал транзистора достигается в конце первого рабочего такта и соответствует расчетному значению I_{max} для катушки индуктивности.

В открытом состоянии при протекании тока ненулевое значение $R_{си}$ приводит к выделению мощности.

Диод

Характеристики:

Прямое падение напряжения U_{VD} – напряжение на диоде в открытом состоянии;

Напряжение пробоя $U_{пр}$, $U_{ДС}$ (максимальное обратное напряжение)

Максимальное значение среднего прямого тока I_{max} ;

Максимальный пиковый прямой ток I_{peak} – допустимое значение тока для одиночных кратковременных импульсов.

Рабочие режимы:

Падение напряжения U_{VD} при протекании тока приводит к выделению мощности на диоде. Для минимизации потерь мощности рекомендуется использовать диоды Шоттки, обеспечивающие меньшее значение U_{VD} по сравнению с обычными диодами.

Максимальное обратное напряжение формируется на диоде при открытом ключе: со стороны анода потенциал близок к нулевому, со стороны катода потенциал равен $U_{вых}$.

Максимальное значение силы тока, протекающего через диод, достигается в момент закрытия ключа и составляет рассчитанное для катушки индуктивности значение I_{max} .

Катушка индуктивности

Характеристики:

Номинальная индуктивность L ;

Активное сопротивление R_{ESR} – сопротивление проводника, из которого изготовлена катушка индуктивности

Максимальный ток I_{max} – при превышении данного значения катушка может выйти из строя;

Ток насыщения I_{sat} – при превышении данного значения происходит насыщение катушки. В этом случае зависимость величины магнитного потока от силы тока становится нелинейной, и приведенные расчетные соотношения становятся неприменимы.

Рабочие режимы:

При работе повышающего ИПН максимальное значение тока в катушке индуктивности не должно превосходить тока насыщения I_{sat} .

Ненулевое активное сопротивление катушки приводит к выделению мощности, что снижает КПД схемы преобразователя.

Конденсатор

Характеристики:

Номинальная емкость C ;

Максимальное рабочее напряжение U_{max} ;

Эквивалентное последовательное сопротивление R_{ESR}

Рабочие режимы:

В установившемся режиме работы напряжение на конденсаторе равно выходному напряжению. При выборе конденсатора по значению U_{max} необходимо также учитывать, что при рабочем напряжении, близком к U_{max} фактическая емкость конденсатора может оказаться меньше номинальной.

Поскольку в процессе работы конденсатор перезаряжается, на его активном сопротивлении R_{ESR} происходит выделение мощности и формирование разности потенциалов. Выделение мощности приводит к уменьшению КПД. Падение напряжения приводит к увеличению пульсаций выходного напряжения.

С учетом перечисленных особенностей применяемых электронных компонентов можно составить уточненную модель ИПН.

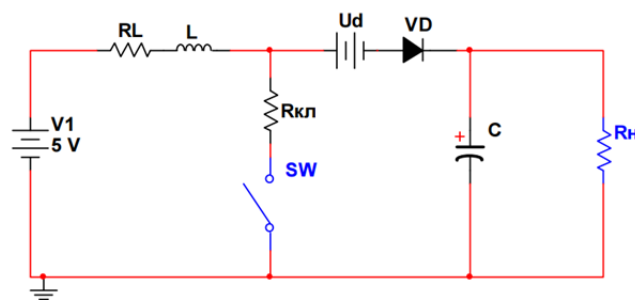


Рис.5. Эквивалентная схема ИПН с источниками потерь

Среда моделирования multisim содержит модели некоторых реальных компонентов, в которых характеристики уже учтены в SPICE модели. Для компонентов, отсутствующих в библиотеке можно использовать эквивалентные схемы замещения, учитывающие характеристики применяемых компонентов.

КПД схемы ИПН

По определению КПД равен отношению мощности $P_{\text{вых}}$, переданной в нагрузку, к мощности $P_{\text{вх}}$, полученной от первичного источника энергии:

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Выходная мощность меньше входной на сумму мощностей, рассеиваемых на компонентах схемы:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} - (P_L + P_{\text{кл}} + P_{VD}) \quad (6)$$

Значения мощности, рассеиваемой на компонентах преобразователя, рассчитываются с учетом характеристик примененных компонентов и относительной величины времени, в течение которого происходит выделение тепла. Приведем приближенные формулы для оценки потерь мощности:

$$P_L = R_L I_{\text{вх}}^2 \quad (7)$$

$$P_{\text{кл}} = D \cdot R_{\text{СИ}} \cdot I_{\text{вх}}^2 \quad (8)$$

$$P_{VD} = (1 - D) \cdot (R_{VD} I_{\text{вх}}^2 + U_{VD} I_{\text{вх}}) \quad (9)$$

Более точную оценку рассеиваемой мощности можно получить, если учитывать линейный характер изменения тока и находить среднюю мощность интегрированием на периоде преобразования.

Пример расчета

1. Исходные данные:

$$U_{\text{ВХ}} = 5 \text{ В}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = 10 \text{ В}$$

$$\delta U_{\text{ВЫХ}} = 5\%$$

$$R_{\text{Н}} = 40 \text{ Ом}$$

$$\Delta I_{\text{ВЫХ}} = 300 \text{ мА}$$

$$f = 45 \text{ кГц}$$

$$LIR = 0.3$$

2. Расчет номиналов:

1) Определим коэффициент заполнения импульсов по формуле (2):

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \frac{1}{1 - D} \rightarrow D = 1 - \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}}$$

$$D = 1 - \frac{5}{10} = 0,5$$

2) Ток нагрузки:

$$I_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{Н}}} = \frac{10}{40} = 0,25 \text{ А}$$

3) Период коммутации:

$$T = \frac{1}{f} = 22,2 \text{ мкс}$$

3) Определим индуктивность катушки (8.б):

$$L > \frac{U_{\text{ВХ}}^2 D}{I_{\text{ВЫХ}} \cdot U_{\text{ВЫХ}} \cdot LIR \cdot f}$$

$$L \geq \frac{5 \cdot 5 \cdot 0,5}{0,25 \cdot 10 \cdot 0.3 \cdot 45 \cdot 10^3} = 370 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} = 370 \text{ мкГн}$$

Ближайшее значение из ряда 390 мкГн

6) Абсолютная величина погрешности выходного напряжения:

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \delta U \cdot U_{\text{ВЫХ}}$$

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = 0,05 \cdot 10 = 0,5 \text{ В}$$

7) Рассчитаем емкость (9):

$$C_{\text{ВЫХ}} \geq \frac{\left(\frac{I_{\min} + I_{\max}}{2} - I_{\text{H}}\right)(T - t_{\text{H}})}{\Delta U_{\text{ВЫХ}}} = \frac{(0,5 - 0,25) \cdot (22,2 - 11,1)}{0,5} = 5,55 \text{ мкФ}$$

Возьмем ближайшее значение из ряда E24 – 5,6 мкФ.

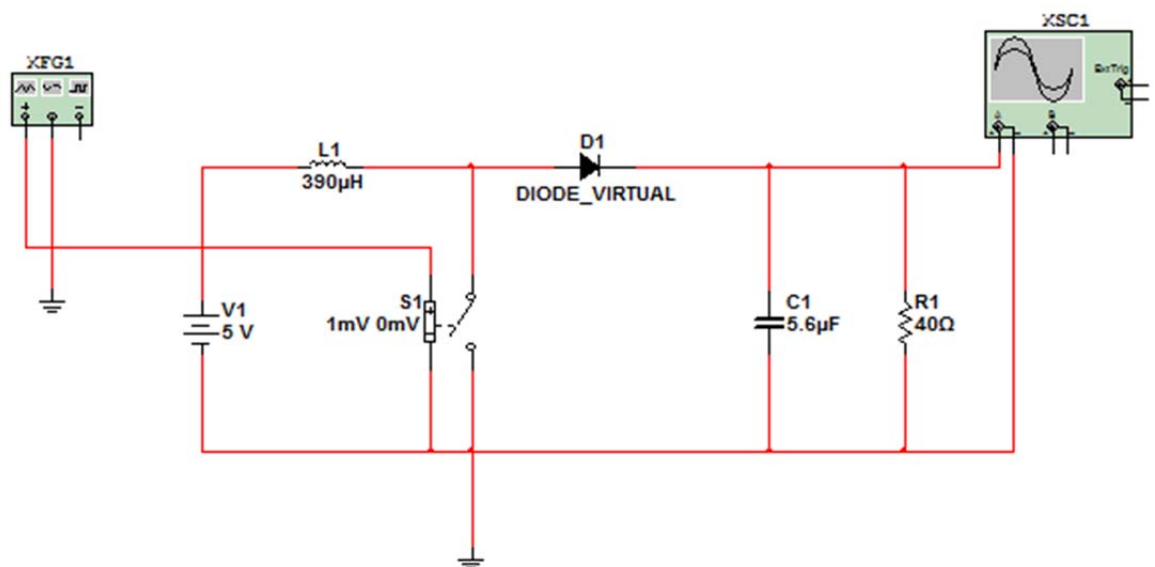


Рис.6. Модель идеального преобразователя напряжения

Пояснения к схеме

XFG1 – функциональный генератор, расположен на панели инструментов справа.

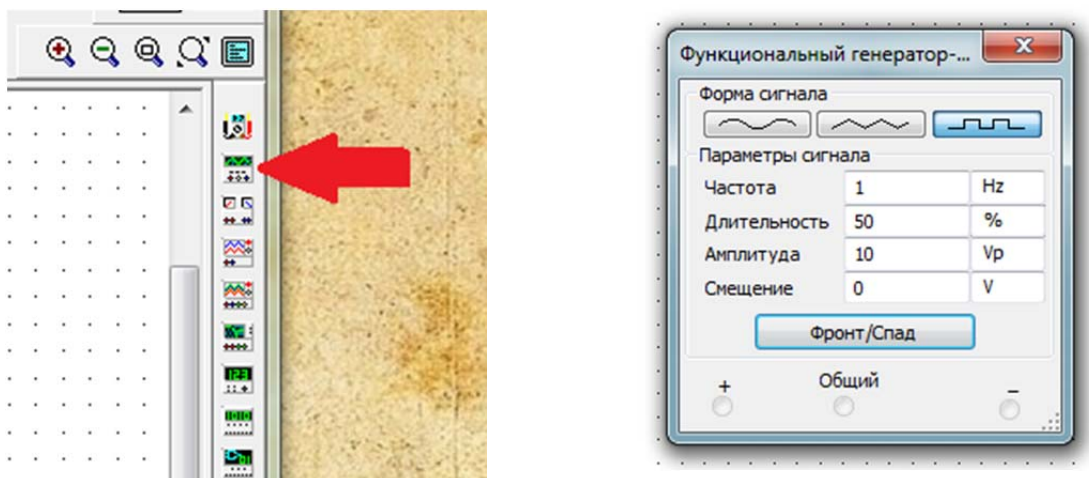


Рис.7. Расположение и панель управления функционального генератора

В схеме рисунка 6 генератор используется для управления коммутацией ключа. На ключ необходимо подавать сигнал прямоугольной формы с частотой, определенной в варианте задания. Установка этих параметров производится через окно настройки, остальные параметры можно оставить без изменений.

В качестве ключа на схеме используется виртуальный ключ, управляемый напряжением (SPDT). Находится в разделе Basic, семейство SWITCH.

В настройках ключа необходимо задать сопротивление открытого и закрытого состояния. Для приближения данного ключа к идеальному следует установить сопротивление открытого состояния в 0,01мОм.

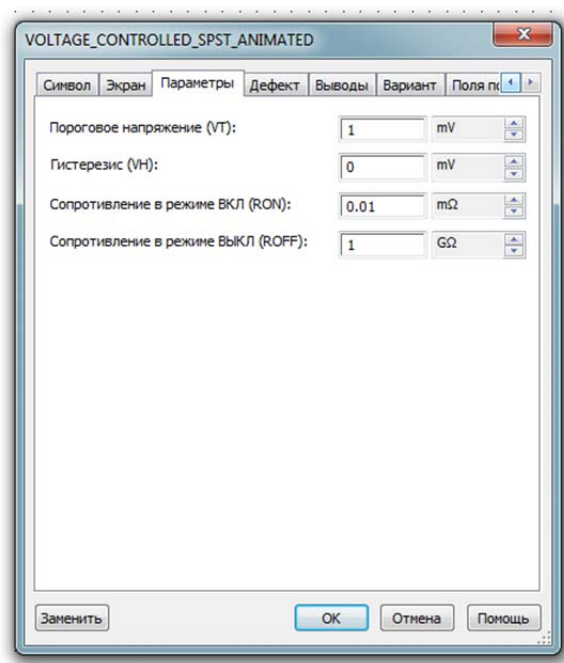


Рис.8. Окно настройки ключа

Контроль работы схемы производится с помощью осциллографа (XSC1 – на схеме). Он расположен так же на правой панели инструментов. Двойным кликом ЛКМ по пиктограмме открывается его рабочее окно. По умолчанию фон экрана, на котором изображается осциллограмма, черного цвета. Для переключения фона на белый необходимо нажать кнопку «Экран» на панели осциллографа.

Задание

1. Разработать и промоделировать схему идеального повышающего ИИП на основе виртуальных компонентов Multisim. Характеристики преобразователя выбрать согласно таблице 1 и номеру варианта.
2. С учетом рабочих режимов разработанного ИПН осуществить выбор реальных компонентов, промоделировать работу полученной схемы.
3. Рассчитать КПД преобразователя. Проверить значение экспериментально.
4. Ответить на контрольные вопросы по указанию преподавателя.

Таблица 1. Варианты заданий

Вариант	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$\delta U_{\text{вых}}, \%$	$R_H, \text{Ом}$	$R_L, \text{Ом}$
1	3	12	1	120	0,1
2	5	15	1	100	0,1
3	7	16	2	120	0,2
4	9	18	2	100	0,2
5	3	21	5	120	0,3
6	5	27	5	100	0,3
7	7	12	10	100	0,4
8	9	15	10	120	0,4
9	3	16	1	100	0,5
0	5	18	1	120	0,5

Контрольные вопросы

1. Какими преимуществами и недостатками обладают ИПН по сравнению с линейными схемами преобразователей напряжения,
2. Изобразите схему повышающего ИПН, опишите его принцип действия.
3. Что влияет на КПД ИПН? Каким образом можно добиться его повышения?
4. Какие преимущества дает использование в ИПН диодов Шоттки по сравнению с применением обычных диодов?
5. В чем состоит отличие режима прерывистого тока от режима непрерывного тока?
6. Изобразите график изменения тока через катушку индуктивности.
7. Изобразите график изменения тока через диод.
8. Как рассчитать номиналы катушки индуктивности и конденсатора? Какие факторы нужно учитывать при выборе компонентов?
9. Как рассчитать минимальный ток нагрузки?
10. Что такое коэффициент заполнения импульса? Как его значение соотносится со входным и выходным напряжением ИПН?

Стандартные ряды номиналов

E24	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0
E12	1.0		1.2		1.5		1.8	
E6	1.0				1.5			

E24	2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.3
E12	2.2		2.7		3.3		3.9	
E6	2.2				3.3			

E24	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1
E12	4.7		5.6		6.8		8.2	
E6	4.7				6.8			