

*Афанасьев А.М.,
к.т.н. Ушаков В.И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ IGBT С РЕГЕНЕРАТИВНЫМ LCD СНАББЕРОМ

На основі імітаційної моделі досліджені електромагнітні процеси і проведений аналіз ефективності роботи IGBT з регенеративною снабберной схемою що до режимів безперервного і переривистого струмів.

***Ключові слова:** ефективність роботи IGBT, регенеративний LCD снаббер, режими безперервного і переривистого струмів.*

На основе имитационной модели исследованы электромагнитные процессы и проведен анализ эффективности работы IGBT с регенеративной снабберной схемой для режимов непрерывного и прерывистого токов.

***Ключевые слова:** эффективность работы IGBT, регенеративный LCD снаббер, режимы непрерывного и прерывистого токов.*

Введение. Прогресс большинства электротермических процессов и производств, использующих токи средней и высокой частоты, напрямую связан с развитием силовой преобразовательной техники. Ее значимость определяется всевозрастающей потребностью в эффективных высокочастотных полупроводниковых преобразователях для электротехнологий. Постоянно повышающееся качество и уникальные характеристики транзисторных ключей открывают долгосрочные перспективы совершенствования полупроводниковых источников питания и электротермических процессов с их применением. Характеристики полупроводниковых преобразователей зависят от эффективного использования полупроводниковых приборов, которое в свою очередь зависит от режимов их работы.

Анализ исследований и публикаций. Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений в электротехнологиях является индукционная обработка металла. Для источников питания высокочастотных установок индукционного нагрева в качестве силовых ключей применяются два основных типа транзисторов: MOSFET и IGBT. Выбор соответствующего типа транзистора определяется заданными выходными параметрами источника, мощностью и частотой коммутации, так

в диапазоне частот 10 – 75 кГц считается эффективным применение IGBT [1].

На практике такие источники наиболее часто выполнены по схеме с неуправляемым выпрямителем на входе и инвертором тока или резонансным инвертором на выходе. Для повышения коэффициента мощности источника питания и обеспечения глубоких регулировочных характеристик, на входе может применяться выпрямитель с активной коррекцией коэффициента мощности, например Виенна-выпрямитель [2], или неуправляемый выпрямитель с импульсным преобразователем постоянного напряжения (ИППН) [3].

Перечисленные выше схемотехнические решения предполагают следующие режимы работы: по характеру тока накопительной индуктивности - режимы прерывистых и непрерывных токов [4], по характеру коммутационных процессов в преобразователях - режимы жесткого HS и мягкого ZCS, ZVS переключения [5].

Эффективность работы IGBT зависит от режимов переключения, которые в свою очередь, зависят от режимов работы накопительной индуктивности. Для режима прерывистых токов включение происходит в ноле тока, что характерно для ZCS режима, а выключение – при максимальном токе, то есть в HS режиме. Для непрерывного режима коммутация, в любом случае, происходит под током, в режиме HS.

При коммутации токов силовыми ключами, неизбежны перенапряжения, обусловленные наличием паразитных индуктивностей. Для защиты ключей применяются снабберы, как правило, это диссипативные RC, RDC цепи [6], позволяющие защитить транзисторы от перенапряжений и уменьшить потери мощности в транзисторах, в тоже время, за счет потерь мощности в активном сопротивлении снабберной цепи, общие потери мощности возрастают.

Регенеративные LCD снабберы [7], уменьшая мощности потерь в ключах, позволяют регенерировать энергию, накопленную в снабберной емкости по необходимости в нагрузку или в источник питания. Применение такого снаббера обеспечивает мягкое выключение IGBT в ZVS режиме, при котором уменьшение динамических потерь мощности в транзисторе осуществляется за счет ограничения скорости нарастания напряжения емкостью снабберного конденсатора C_s , согласно (1).

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{I_M}{C_s}, \quad (1)$$

где I_M – значение тока, соответствующее моменту выключения транзистора;

C_S – значение емкости снабберного конденсатора.

Перезаряд конденсатора C_S происходит во время открытого состояния транзистора VT по колебательному закону, за время которое можно определить по формуле

$$t = \pi\sqrt{L_S \cdot C_S}, \quad (2)$$

где L_S – значение индуктивности снаббера.

При этом энергия, накопленная в конденсаторе C_S , регенерируется в нагрузку, что необходимо учитывать как при расчете параметров схемы, так и при выборе полупроводниковых приборов. На рисунке 1 показана схема импульсного преобразователя с LCD снаббером, регенерирующим энергию в нагрузку.

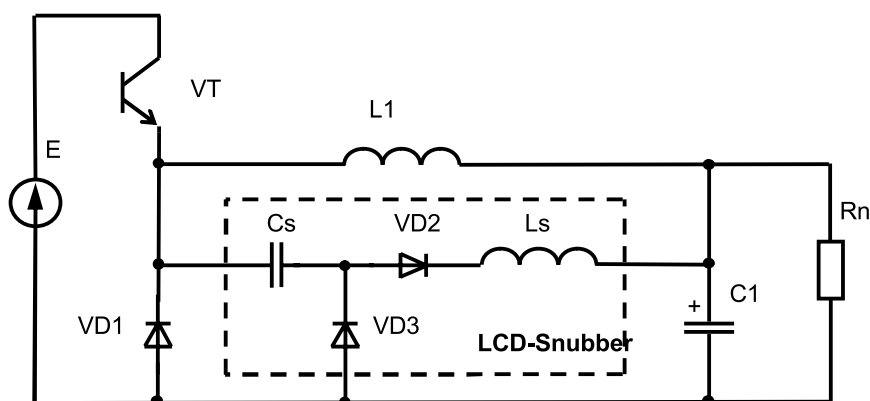


Рисунок 1 – Схема импульсного преобразователя с LCD снаббером

В зависимости от режимов работы накопительной индуктивности, применение LCD снаббера обеспечивает для непрерывных токов – жесткое включение и мягкое выключение транзистора, а для прерывистых токов – мягкое включение, и выключение, то есть с минимальными динамическими потерями мощности.

Постановка задачи. С помощью имитационной модели исследовать влияние на эффективность работы IGBT транзистора и преобразователя в целом, величин емкости C_S и индуктивности L_S регенеративного LCD снаббера, в режимах прерывистого и непрерывного токов.

Изложение материала и полученные результаты. Исследование эффективности работы IGBT проводилось с помощью моделирования в среде OrCad 9.2. Для этого была разработана имитационная PSpice-модель преобразователя, силовая часть которой представлена стойкой из двух последовательно включенных IGBT VT1,VT2 со встречно параллельными диодами VD1,VD2. Такое решение является

классическим для построения большинства преобразователей, в том числе ИППН, инвертора напряжения и резонансного инвертора.

Схема имитационной модели преобразователя показана на рисунке 2.

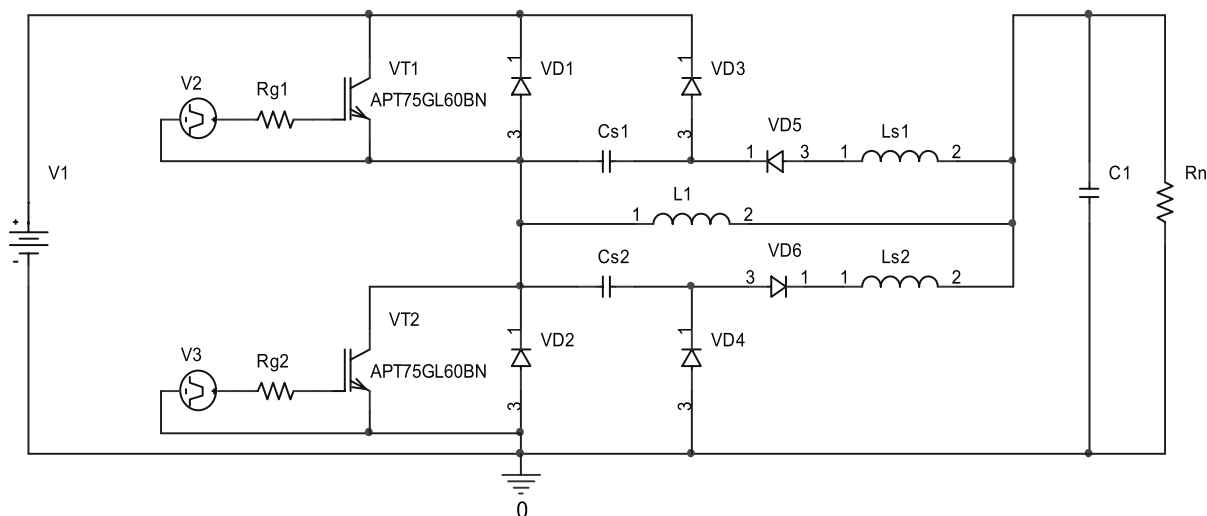


Рисунок 2 – Схема имитационной модели преобразователя

Источник постоянного напряжения $V1$ моделирует неуправляемый выпрямитель с емкостным фильтром от которого питается преобразователь. Для получения стабильных характеристик в режимах прерывистого и непрерывного токов, управление преобразователем осуществляется от источника прямоугольных импульсов $V2$, моделирующего ШИМ верхнего транзистора $VT1$. Нижний транзистор $VT2$ всегда находится в закрытом состоянии, в соответствии с сигналом низкого уровня источника $V3$. Таким образом, имитационная модель представляет собой понижающий импульсный преобразователь постоянного напряжения, работа которого определяется поочередным включением транзистора $VT1$ и диода $VD2$.

Имитационная модель содержит два LCD снаббера, представленные элементами $Cs1, Ls1, VD3, VD5$ и $Cs2, Ls2, VD4, VD6$. Упомянутый выше алгоритм предполагает работу только второго снаббера $Cs2, Ls2, VD4, VD6$.

Величина накопительной индуктивности $L1$ определяет режим работы преобразователя – прерывистый или непрерывный. Нагрузка в имитационной модели представлена сопротивлением Rn с параллельно включенной фильтрующей емкостью $C1$.

На рисунке 3 демонстрируются электромагнитные процессы, характерные для работы импульсного преобразователя с LCD снаббером в режиме прерывистых токов. Выделены процессы переключения IGBT в режимах ZCS и ZVS на фоне временных диаграмм напряжения кол-

лектора U_{ce1} , тока коллектора I_{C1} , ток накопительной индуктивности I_{L1} и ток снабберой индуктивности I_{Ls2} .

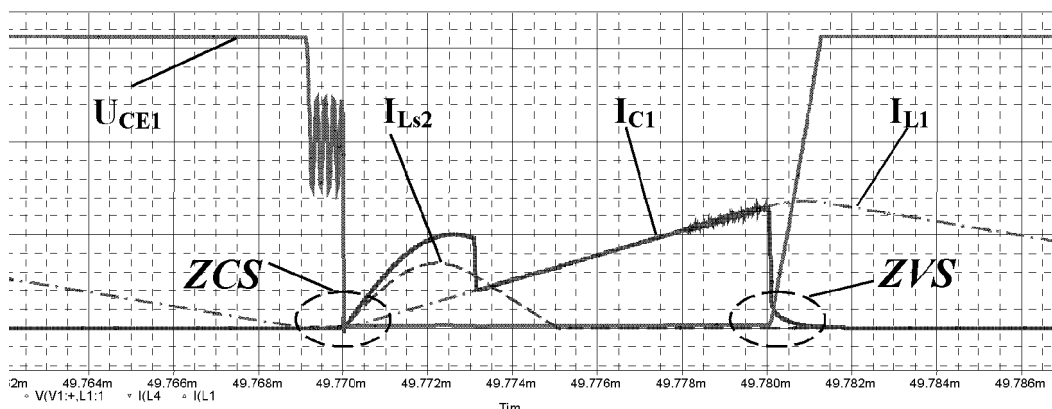


Рисунок 3 – Временные диаграммы, характерные для работы преобразователя с LCD снаббером в режиме прерывистых токов

По результатам моделирования построены графики, наглядно демонстрирующие зависимость КПД от величин индуктивности и емкости LCD снаббера для режимов непрерывного и прерывистого токов, которые приведены на рисунке 4.

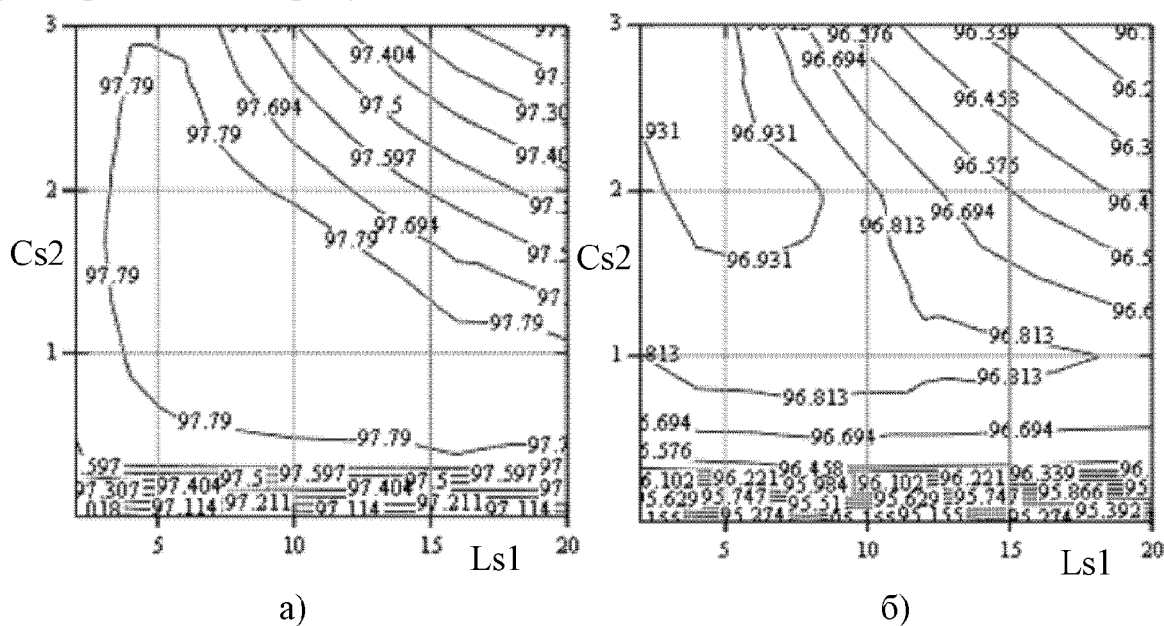


Рисунок 4 – Графики зависимости КПД от параметров $Cs2$ и $Ls2$ для режимов непрерывного (а) и прерывистого (б) токов

В процессе моделирования, величины индуктивности и емкости снаббера были подобраны экспериментально, и изменялись в диапазо-

нах $L_{s2}=0 - 20\text{мкГн}$, $C_{s2}=0 - 3\text{мкФ}$. Далее элементы снаббера C_{s2} и L_{s2} будут упоминаться как C_s и L_s .

Из графиков можно видеть, что изменение величины емкости. C_s оказывае большее влияние на КПД в сравнении с изменением величины индуктивности L_s . Для удобства пользования результатами моделирования, введен коэффициент K_{Eoff} , позволяющий оценить долю энергии снабберного конденсатора E_{CS} к энергии потерь выключения исследуемого IGBT транзистора E_{off}^*

$$K_{Eoff} = \frac{E_{CS}}{E_{off}^*}. \quad (3)$$

Энергия снабберного конденсатора E_{CS} определялась по формуле

$$E_{CS} = \frac{C_s \cdot U^2}{2}, \quad (4)$$

где C_s — емкость снабберного конденсатора;

U – напряжение источника питания.

Энергия выключения IGBT E_{off}^* рассчитывалась по формуле

$$E_{off}^* = (I_C - I_{C0}) \cdot \frac{\Delta E_{off}}{\Delta I_C} + E_0, \quad (5)$$

где I_C –ток коллектора, соответствующий моменту выключения транзистора;

E_0 – граничное значение энергии выключения;

I_{C0} – ток коллектора, соответствующий граничному значению энергии выключения E_0 ;

$\frac{\Delta E_{off}}{\Delta I_C}$ – наклон характеристики.

Значения E_0 , I_{C0} и соотношение $\frac{\Delta E_{off}}{\Delta I_C}$ определялись из графика паспортной зависимости энергии выключения от тока коллектора исследуемого транзистора $E_{off} = f(I_C)$. Зависимость $E_{off} = f(I_C)$ исследуемого транзистора APT75GL60BN приведена на рисунке 5.

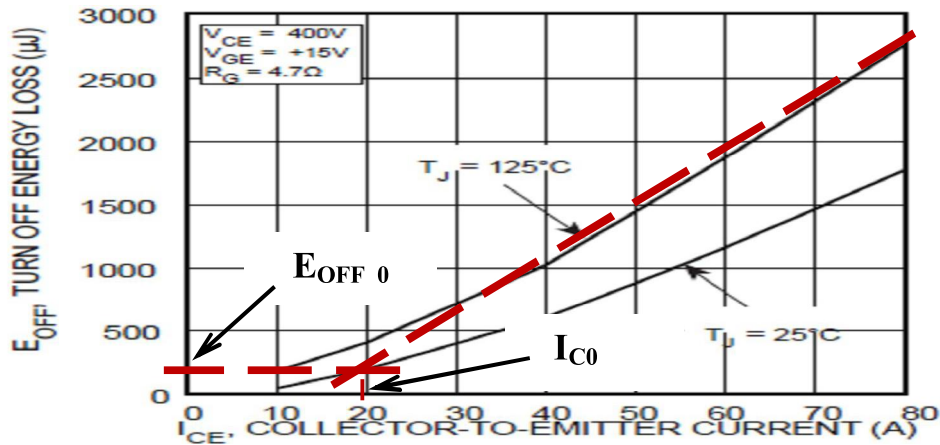


Рисунок 5 – График зависимости энергии выключения от тока коллектора транзистора APT75GL60BN

При необходимости пересчитать величину снабберного конденсатора C_s для другого типа IGBT, можно пользоваться формулой (6) полученной из (3), (4), (5).

$$C_s = \frac{2 \cdot K_{Eoff} \cdot E_{off}^*}{U^2} = \frac{2 \cdot K_{Eoff}}{U^2} \cdot \left[(I_C - I_{C0}) \cdot \frac{\Delta E_{off}}{\Delta I} + E_0 \right]. \quad (6)$$

Используя рассчитанные значения коэффициента K_{Eoff} и результаты моделирования, построены зависимости КПД от величины индуктивности L_s и коэффициента K_{Eoff} для режимов непрерывного и прерывистого токов, зависимости приведены на рисунке 6.

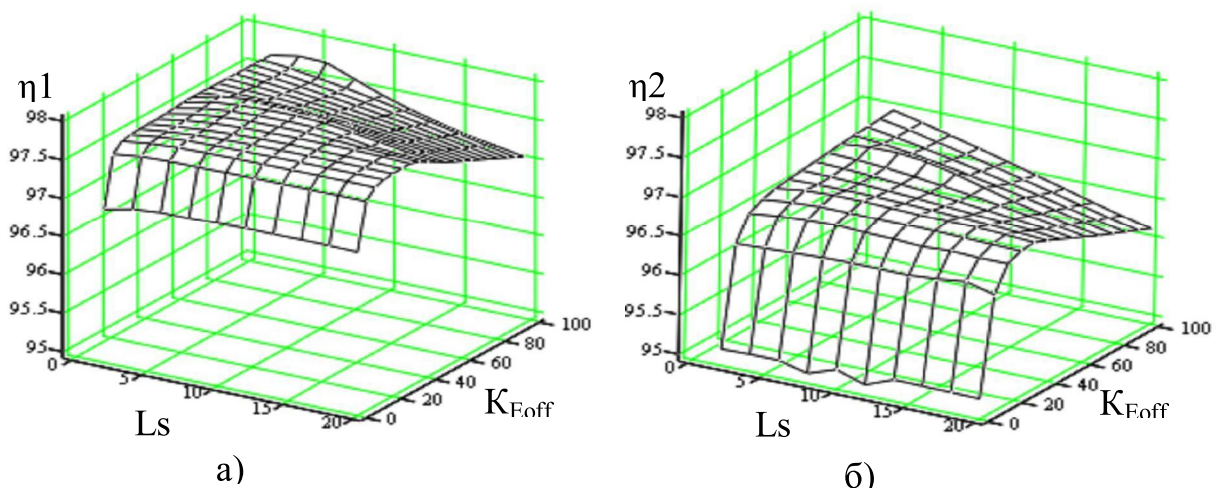


Рисунок 6 – Графики зависимости КПД от параметров L_s и K_{Eoff} для режимов непрерывного (а) и прерывистого (б) токов

Анализ полученных зависимости КПД от параметров L_s и K_{Eoff} позволил сделать следующие выводы, уменьшение КПД наблюдается в двух случаях, - независимо от коэффициента K_{Eoff} при значениях L_s меньше 2 мкГн, и при значениях коэффициента K_{Eoff} больше 40 и L_s больше 5 мкГн. Учитывая, что индуктивность L_s выполняет функцию «насоса» для регенерации энергии из снабберного конденсатора, ее значение необходимо выбирать, еще и с учетом выражения (2).

Для более детального анализа построены зависимости КПД от коэффициента K_{Eoff} при фиксированном значении снабберной индуктивности $L_s, =4$ мкГн. Графики зависимостей КПД для режимов непрерывного и прерывистого токов, приведены на рисунке 7.

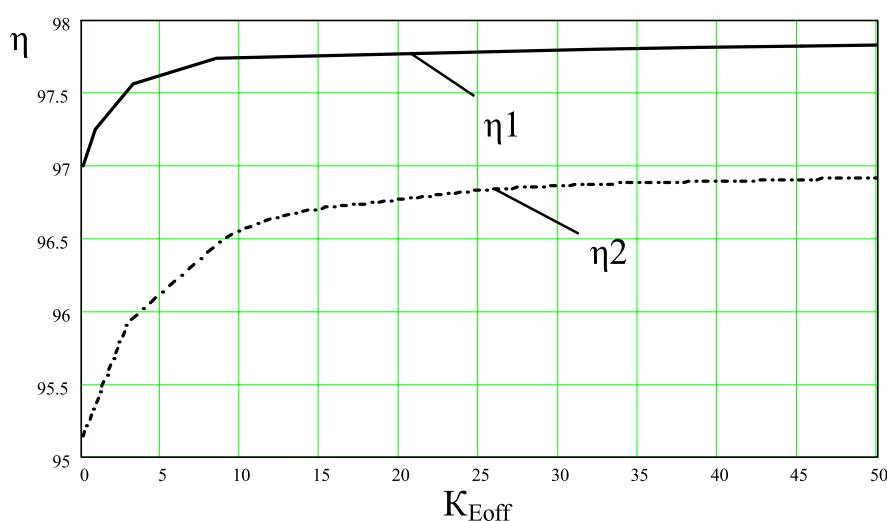


Рисунок 7 – Графики зависимости КПД от коэффициента K_{Eoff} для режимов непрерывного (η_1) и прерывистого (η_2) токов

Анализируя зависимости КПД от коэффициента K_{Eoff} для режимов непрерывного и прерывистого токов можно выделить следующее, при значении $K_{Eoff}=0$, LCD снаббер в работе преобразователя не участвует. В этом случае КПД имеют минимальные значения: $\eta_1=97\%$, $\eta_2=95,2\%$. С увеличением коэффициента K_{Eoff} , наблюдается рост КПД. Для непрерывного режима интенсивный рост КПД происходит до значения $K_{Eoff} \approx 8$, при этом η_1 изменяется от 97% до 97,75%. Для прерывистого режима интенсивный рост КПД наблюдается до значения $K_{Eoff} \approx 15$, при этом η_2 изменяется от 95,2% до 96,75%. Дальнейшее увеличение K_{Eoff} несущественно влияет на коэффициент полезного действия.

Применение LCD снаббера для обоих режимов является эффективным, но для режима прерывистого тока эффективность применения выше – $\Delta\eta_2=1,55\%$, по сравнению с $\Delta\eta_1=0,75\%$ для режима непрерывного.

го тока. Независимо от значения коэффициента K_{Eoff} , максимальный КПД наблюдается для режима непрерывного тока.

Тем не менее, в некоторых случаях применение режима прерывистого тока может быть целесообразным, так как позволяет получить лучшие массогабаритные показатели и меньшую постоянную времени переходного процесса.

Выводы.

1. Получены и проанализированы зависимости КПД от параметров регенеративного LCD снаббера в режимах прерывистого и непрерывного токов. Определено, что снижение КПД наблюдается в двух случаях, при значениях L_s меньше 2 мкГн независимо от коэффициента K_{Eoff} , и при значении коэффициента K_{Eoff} больше 40 с индуктивностью L_s больше 5 мкГн.

2. Применение регенеративного LCD снаббера для обоих режимов является эффективным, и позволяет повысить КПД преобразователя. Для режима прерывистого тока эффективность применения составляет 1,55% , для режима непрерывного тока – 0,75%.

3. Для удобства пользования полученными результатами, введен относительный энергетический коэффициент K_{Eoff} , с помощью которого можно пересчитать параметры LCD снаббера для другого типа IGBT.

Библиографический список

1. *D.L.Loveless Solid State Power Supplies for Modern Induction Metal Heat Treating Metal Producing 8/95* // <http://www.inductoheat.com>.

2. Чернецов П.О. Исследование активного выпрямителя в составе источника питания для индукционного нагрева / П.О.Чернецов, С.В. Дзлийев, Д.А. Патанов, И.С. Тихомиров // Актуальные проблемы в области индукционного нагрева (АРИН-2006): материалы междунар. научн.-техн. конф., 2006.

3. Поляков В.Д. Высокочастотный преобразователь на IGBT для индукционного нагрева [Электронный ресурс] / В.Д. Поляков., Э. Чаколья. – Режим доступа:

<http://promel2000.narod.ru/index.html>.

4. Севернс Р. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания / Р. Севернс, Г. Блум; пер. с англ. под ред. Л. Е. Смольникова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 294с: ил.

5. *Soft switching in ZVS or ZCS-mode / switching loss reduction networks* // *IGBT and MOSFET power modules Application Handbook* <http://www.semikron.com>.

6. Y.Zhang, S.Sobhani, R.Chokhawala. *Snubber considerations for IGBT applications International Rectifier Corporations,. Technical Papers // www.irf.com.*

7. K. Mark Smith Jr. and K. M. Smedley *Properties and Synthesi of Passive, Lossless Soft-Switching PWM Converters //http://ieeexplore.ieee.org.*

Рекомендовано к печати д.т.н., проф.Заблодским Н.Н.