

Создание ударного контура возбуждения импульсного резонансного преобразователя мощности

МЕНАКЕР К.В., ЦВЕТАЕВА А.С.

Проанализирована возможность получения высокочастотных импульсов тока наносекундной длительности и значительной амплитуды от первичного маломощного низковольтного источника энергии, область использования которых весьма широка: от альтернативных источников энергии малой и средней мощности до высокоэффективных индукционных установок плавки и закалки металлов, включая синтез наноструктурированных покрытий. Рассмотрена функциональная схема классического ударного контура возбуждения, принцип работы которого основан на получении значительной импульсной мощности на индукторе за счет его насыщения до значительных значений тока за малый промежуток времени с минимальными затратами. Проанализированы причины ограничения амплитуды тока на индукторе в схеме ударного контура возбуждения и предложены способы устранения недостатков на примере схемы с реальными электронными компонентами. Выполнен анализ работы ударного контура возбуждения и рассмотрены варианты технической реализации устройства с оптимальными параметрами.

Ключевые слова: ударный контур возбуждения, коммутатор, индуктор, накопительная емкость, источник тока.

Одним из важных направлений развития альтернативной энергетики малой и средней мощности является использование современных импульсных технологий. В [1–4] проведен обзор импульсных устройств, в которых малая мощность первичного источника преобразуется в относительно большую мощность на нагрузке. Принцип действия подобных устройств основан на накоплении энергии и дальнейшей ее передаче на нагрузку за более короткий промежуток времени.

Условно по способу накопления и передачи энергии на нагрузку подобного рода преобразователи мощности могут быть разделены на две категории. В устройствах, описанных в [1, 2], накопление энергии осуществляется в первичном контуре устройства и осуществляется за счет правильной организации возбуждения данного контура. В устройствах второго типа [3, 4] накопление энергии осуществляет-

In this article possibility of receiving high-frequency impulses of current of nanosecond duration, considerable amplitude from primary low-power low-voltage power source which area of use is very wide is analysed: from alternative energy sources of low and average power before highly effective induction installations of melting and training of metals, including synthesis of the nanostructured coverings. Article is devoted to research of a function chart of a classical shock contour of excitement which principle of work is based on obtaining considerable pulse power on the inductor due to its saturation to considerable values of current for a small period with the minimum expenses. In work the reasons of restriction of amplitude of current on the inductor in the scheme of a shock contour of excitement are analysed and ways of elimination of these shortcomings on the example of the scheme with real electronic components are offered. The mathematical analysis of work of a shock contour of excitement is carried out and options of technical realization of the device with optimum parameters are considered.

Key words: shock contour of excitement, switchboard, inductor, accumulative capacity, current source.

ся на этапе передачи энергии на нагрузку за счет высокой добротности колебательного контура и использования быстродействующих диодов. В ряде работ можно встретить и комбинированный вид преобразователей. Несмотря на кажущуюся простоту, реализация подобного рода устройств весьма затруднительна. Помимо высоких требований к элементной базе, возникают значительные технические трудности, связанные с получением высокочастотных (до 100 кГц) импульсов тока наносекундной длительности значительной амплитуды (до 1000 и более ампер) в преобразователях первого типа и реализацией высокодобротных контуров (свыше 2000 единиц) в устройствах второго типа.

В статье проанализирована возможность получения высокочастотных импульсов тока наносекундной длительности значительной амплитуды от первичного маломощного низ-

ковольтного источника энергии, область использования которых весьма широка: от альтернативных источников энергии малой и средней мощности до высокоэффективных индукционных установок плавки и закалки металлов, включая синтез наноструктурированных покрытий [5].

Функциональная схема классического контура возбуждения, применяемого в формирователях импульсов, представлена на рис. 1. Контур состоит из источника тока, накопительной емкости $C3$, управляемого коммутатора $J1$ и индуктора $L4$. Источник тока реализован на первичном источнике напряжения в виде аккумуляторной батареи $V1$, инверторе автогенераторного, транзисторного типа $VT1$, $L2$, $R1$, $R2$, высоковольтном трансформаторе $T1$, выпрямителе $VD2$. Коммутатор $J1$ управляется по цепи обратной связи, реализованной на измерительном трансформаторе тока $T2$, усилителем $У$ и преобразовательном $П$ устройстве. Индуктор $L4$ с емкостью $C3$ и коммутатором $J1$ являются ключевыми элементами контура возбуждения. Активное сопротивление $R3$ в схеме представляет сопротивление открытого канала коммутатора, активное сопротивление провода индуктора и соединительных проводов.

Главной задачей контура возбуждения является получение значительной импульсной мощности на индукторе $L4$. Мощность индуктора определяется импульсной энергией его индуктивности, умноженной на частоту импульсов f :

$$P_{L4} = \frac{L4 I^2}{2} f. \quad (1)$$

Таким образом, задача сводится к насыщению индуктора до значительных значений то-

ка за малый промежуток времени с минимальными затратами. Единственный возможный способ одновременного выполнения указанных условий сводится к зарядке относительно небольшой емкости $C3$ до высокого значения напряжения и последующей ее разрядки на индуктор. Однако получение значительного тока на индукторе связано с рядом трудностей. Проанализируем процессы, связанные с зарядкой емкости $C3$ от источника тока и ее последующей разрядкой на индуктор.

Процесс зарядки накопительной емкости $C1$ от постоянного источника тока описывается известным выражением:

$$u_{C3}(t) = u_{C3}(t_0) + \frac{1}{C3} \int_{t_0}^t i dt, \quad (2)$$

где $u_{C3}(t_0)$ - напряжение емкости $C3$ в момент предшествующий процессу зарядки; i - ток источника.

Закон изменения тока индуктора в период срабатывания коммутатора и разрядки емкости $C3$ носит колебательный или апериодический характер в зависимости от добротности контура:

$$i_{L4}(t) = \frac{u_{C3}}{w_{св} L4} e^{-\frac{R3}{2L4} t} \sin(w_{св} t);$$

$$i_{L4}(t) = \frac{u_{C3}}{L4} e^{-\frac{R3}{2L4} t}, \quad (3)$$

где u_{C3} - значение напряжения емкости $C3$ в момент, предшествующий срабатыванию коммутатора; $w_{св} = \sqrt{\frac{1}{L4 C3} - \frac{R3^2}{4L4^2}}$ - частота свободных колебаний в цепи.

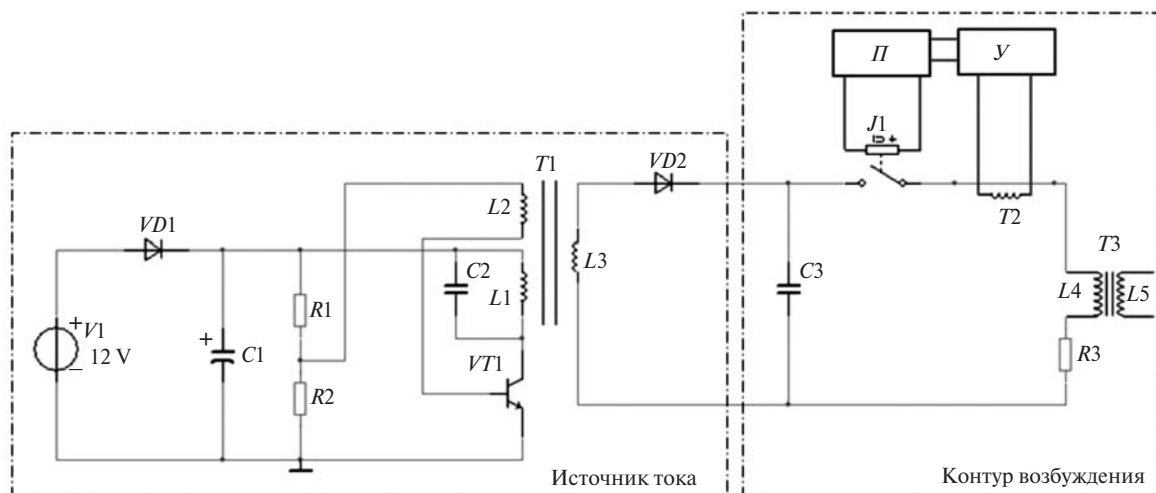


Рис. 1. Функциональная схема ударного контура возбуждения

Анализ выражений (3) показывает, что апериодический процесс разрядки емкости C_3 не приводит к получению значительных токов на индукторе по причине пропорциональности тока времени, значение которого в момент срабатывания коммутатора стремится к нулю, а по истечению некоторого периода приводит к значительному уменьшению напряжения на емкости.

Анализ выражения для колебательного процесса изменения тока индуктора показывает, что достижению значительных амплитуд препятствует большое реактивное сопротивление индуктора $w_{св} L_4$ на относительно высокой частоте свободных колебаний, возникающих в контуре в момент срабатывания коммутатора.

На первый взгляд поставленная задача кажется нерешаемой, однако детальный анализ показывает, что возникающие свободные колебания в контуре, которые и являются основной причиной ограничения амплитуды тока, могут быть использованы для последовательного наращивания силы импульса и достижения значительной энергии. При этом крайне важно обеспечить правильную синхронизацию работы коммутатора с частотой свободных колебаний. Именно из-за отсутствия синхронизации в работе коммутатора большинство схем формирователей импульсов оказываются неработоспособными.

Каким же образом обеспечить правильную синхронизацию в работе коммутатора? Для ответа на этот вопрос проведем детальный анализ работы контура возбуждения с реальными параметрами. В качестве источника тока используем электронный преобразователь для неоновой рекламы модели CNP230-1030K28, основные технические характеристики которого приведены ниже.

Потребляемая мощность преобразователя не превышает 100 Вт, выходное напряжение — 10 кВ, выходной рабочий ток — 25 мА, частота выходного сигнала — 28 кГц. В качестве коммутатора используем вакуумный или газовый разрядник с регулируемым зазором. Частота разрядника при условии применения двухполупериодного выпрямителя VD2 будет определяться частотой пульсаций выпрямленного вы-

ходного сигнала 56 кГц (удвоенная частота выходного сигнала источника тока).

По условию оптимальности работы контура возбуждения первоначальная энергия емкости C_3 после срабатывания коммутатора должна частично вернуться обратно в емкость совершив минимальное число колебаний (в идеале полтора). Так как часть энергии индуктора передается во вторичную обмотку высокочастотного трансформатора ТЗ и далее на нагрузку, то амплитуда тока во втором периоде меньше амплитуды тока первого периода. Компенсация уменьшения амплитуды тока осуществляется за счет энергии источника тока. Частота свободных колебаний контура в силу малости емкости C_3 будет высокой. Поэтому время открытого канала коммутатора относительно периода его срабатывания должно быть минимальным. Примем период открытого канала в пределах 1%. Тогда время зарядки и разрядки емкости C_3 , соответственно, составит:

$$t_3 = \frac{1}{f} 0,99 = \frac{1}{56000} 0,99 = 17,68 \text{ мкс};$$

$$t_p = \frac{1}{f} 0,01 = \frac{1}{56000} 0,01 = 1,786 \text{ мкс}.$$

Индуктор изготовим из многожильного провода диаметром 7 мм, намотанного виток к витку на цилиндрическом каркасе с наружным диаметром 60 мм. Число витков — 5. Измеренная индуктивность индуктора составит $L_4 = 1,723 \text{ мкГн}$. Сопротивление R_3 индуктора вместе с соединительными проводами в значительной степени определяется сопротивлением открытого канала и по предварительным расчетам составит около 2 Ом.

С помощью выражения для частоты свободных колебаний контура определим значение емкости C_3 с учетом выполнения условия последовательного наращивания силы импульса:

$$\frac{3}{2} T_{св} = t_p \text{ ® } T_{св} = \frac{2}{3} t_p; \quad (4)$$

$$w_{св} = \sqrt{\frac{1}{L_4 C_3} - \frac{R_3^2}{4 L_4^2}} = \frac{2p}{T_{св}} = \frac{1}{L_4 C_3} - \frac{R_3^2}{4 L_4^2} = \frac{4p^2}{T_{св}^2};$$

Основные технические характеристики электронного преобразователя CNP230-1030K28

Модель	Напряжение питания, В	Потребляемый ток, А	Потребляемая мощность, Вт	Выходное напряжение, В	Частота выходного напряжения, кГц	Выходной рабочий ток, мА
CNP230-1030K28	210—230	0,44	96,80	10000	28	25

$$C_3 = \frac{T_{CB}^2 4L_4}{16\rho^2 L_4^2 + R_3^2 T_{CB}^2} =$$

$$= \frac{\frac{2}{3} t_{p\phi}^2 4L_4}{16\rho^2 L_4^2 + R_3^2 \frac{2}{3} t_{p\phi}^2} = 208,3 \text{ пФ.}$$

С помощью выражения (2) определим напряжение на емкости C_3 за время t_3 закрытого канала коммутатора первого такта его работы:

$$u_{C_1}(t_3) = u_{C_1}(t_0) + \frac{1}{C_1} \int_{t_0}^{t_3} i dt =$$

$$= \frac{1}{208,3 \cdot 10^{-12}} \int_{t_0}^{t_3} 0,025 dt = 2,156 \text{ кВ.}$$

В результате выполнения условия (4) происходит последовательное увеличение напряжения на емкости C_3 до 10 кВ за счет возврата части энергии от индуктора в каждом последующем такте срабатывания коммутатора и одновременного поступления энергии от источника тока (рис. 2). При этом также происходит увеличение тока, действующего на индукторе.

Результаты моделирования работы ударного контура возбуждения с указанными ранее параметрами в программном комплексе Multisim 11.0 представлены на рис. 3.

Анализ результатов моделирования показывает, что импульсы тока индуктора достигают значений 100 А. При частоте импульсов 56 кГц суммарная мощность индуктора составит:

$$P_{L_1} = \frac{L_1 I^2}{2} f = \frac{1,723 \cdot 10^{-6} \cdot 100^2}{2} \cdot 56000 = 482 \text{ Вт}$$

при уровне потребляемой мощности электронного преобразователя CNP230-1030K28 не более 100 Вт.

При источнике тока с уровнем выходного напряжения до 30 кВ и использовании коммутирующего устройства с малым сопротивлением канала выходная мощность индуктора согласно результатам моделирования может составить соответственно 4,6 кВт при уровне потребляемой мощности 750 Вт. И это далеко не предел.

В ходе исследований было выяснено, что отклонение удвоенного значения частоты коммутатора от частоты автогенератора источника тока позволяет получить амплитудно-модулированную форму тока индуктора. Так, при изменении частоты коммутатора с 56 кГц до 55 кГц частота огибающей сигнала составила 500 Гц (рис. 4).

Частота огибающей тока индуктора может быть уменьшена вплоть до 50 Гц относительно частоты коммутатора и в последующем детектирована. Данное явление, легко объяснимое частичной ресинхронизацией работы коммутатора, при необходимости может быть использовано для питания от преобразователя мощности устройств, рассчитанных на промышленную частоту тока (50–60 Гц) без использования дополнительных преобразовательных устройств.

Эффективность принципа последовательного наращивания силы импульса при создании ударного контура возбуждения, подтверждается в [1], суть которой состоит в повышении

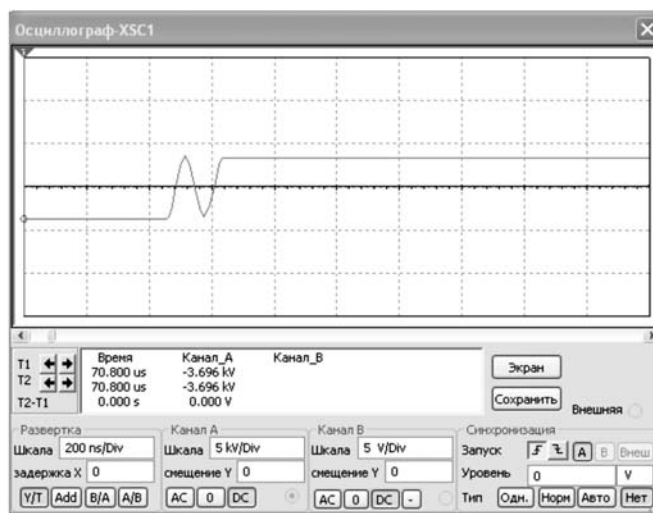
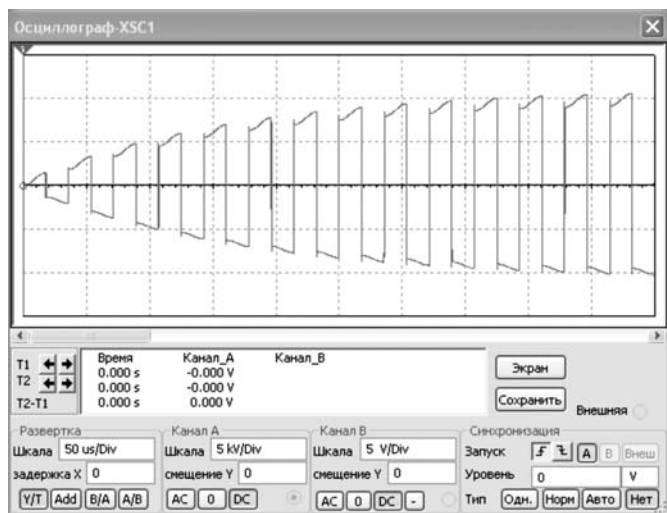


Рис. 2. Осциллограмма изменения напряжения емкости C_3 в масштабе 50 мкс/дел и 200 нс/дел (на третьем такте работы коммутатора)

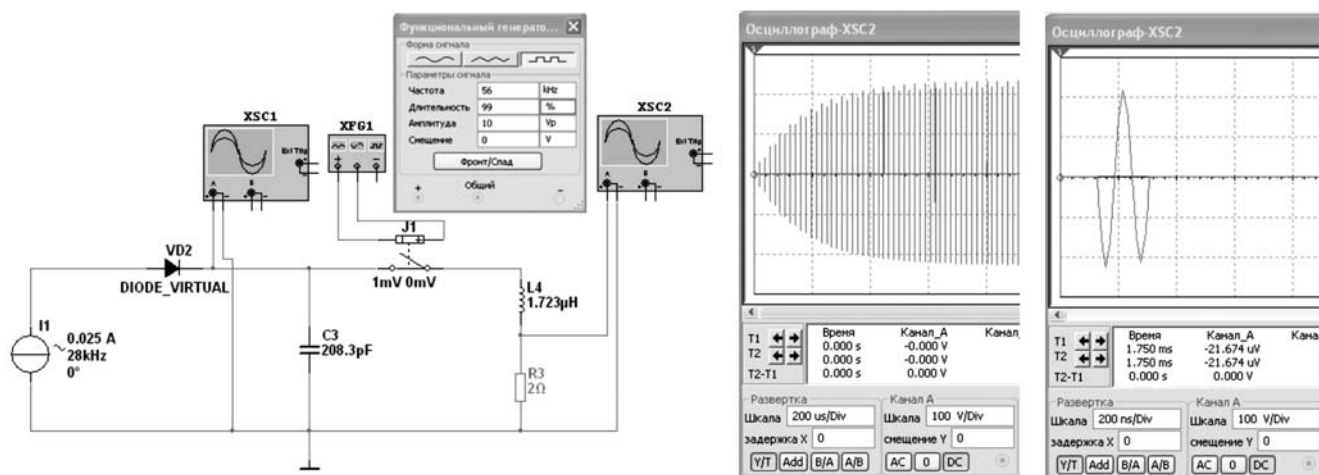


Рис. 3. Схема замещения ударного контура возбуждения и осциллограмма изменения тока индуктора в масштабе 200 мкс/дел и 200 нс/дел

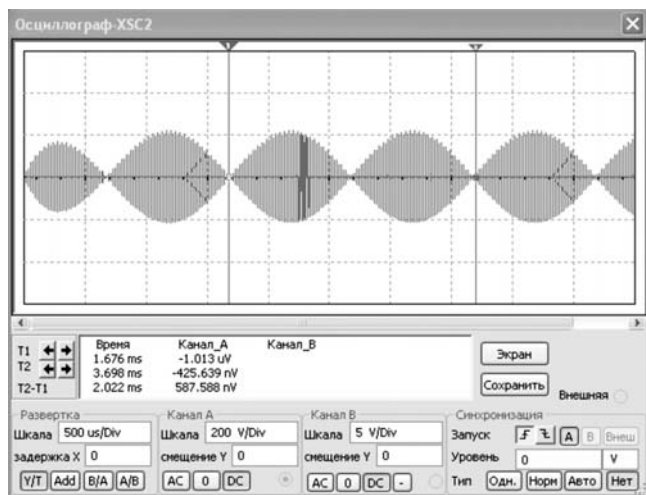


Рис. 4. Осциллограмма тока индуктора при частоте работы коммутатора 55 кГц

КПД индукционной установки путем параметрического подмагничивания магнитопровода индуктора в начале каждого периода колебаний тока в индукторе, следующего за периодами тока возбуждения питающего генератора, в моменты перехода тока индуктора через ноль, т.е. последовательное наращивание энергии индуктора достигается в данном устройстве синхронным изменением индуктивности индуктора. К недостаткам данного подхода следует отнести сложность учета нелинейных параметров магнитопровода индуктора.

Таким образом, представление о процессах работы различных модификаций ударных контуров возбуждения и обеспечение условия последовательного наращивания силы импульса, изложенного в данной работе, позволит создать большое разнообразие схем формирования

лей наносекундных токовых импульсов значительной амплитуды, область применения которых необычайно широка. Преобразователи мощности, высокоэффективные устройства индукционной плавки и закалки металлов, устройства получения полимерных нанопокровов, физические эксперименты — вот далеко не полный перечень областей применения ударных контуров возбуждения, построенных на основе изложенного принципа.

Список литературы

1. Патент 2088035 РФ. Способ ударного возбуждения колебательного контура индукционной установки / Исхаков И.Р., Налобин А.В., Таназлы И.Н., Шуляк А.А. // БИ. 1997. № 8.
2. Smith D.L. Resonance energy methods // Trans World Energy, CED, 2002.
3. Патент 125415 РФ. Импульсный резонансный преобразователь напряжения МПК / Менакер К.В., Цветаева А.С. // БИ. 2013. № 6.
4. Менакер К.В., Цветаева А.С. Импульсный редуцирующий преобразователь мощности // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 6. С. 21.
5. Андреев А.А., Саблев Л.П., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые покрытия. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010.

Менакер Константин Владимирович — доцент кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта, канд. техн. наук. Окончил механико-машиностроительный факультет Читинского ГТУ в 2000 г. Защитил диссертацию по теме: «Методы моделирования движения поездов в координатных системах интервального регулирования» РГОТУПС в 2005 г.

Цветаева Анна Сергеевна — старший преподаватель кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта. Окончила электротехнический факультет ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения» в 2008 г.