

УДК 621.314

## К вопросу определения предельной выходной мощности импульсного преобразователя мощности электрической энергии

**К. В. Менакер,**

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, кандидат технических наук, доцент

**А. С. Цветаева,**

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, аспирант

Предлагается использование преобразователя мощности электрической энергии в программах, направленных на снижение энергопотребления промышленных предприятий. В основу устройства положен редуционный принцип преобразования мощности. В статье приведён анализ работы схемы преобразователя с целью определения предельного уровня выходной мощности. Разработанное устройство может быть применено для снижения энергопотребления бытовых и промышленных электроустановок и в качестве резервного источника электрической энергии.

**Ключевые слова:** преобразователь мощности, энергосбережение, накопительная ёмкость, электронный ключ, катушка индуктивности, резонанс тока, переходные процессы, свободные колебания.

В соответствии с требованиями действующего Федерального закона № 261 «Об энергосбережении», касающегося снижения энергосбережения предприятий к 2017 году не менее чем на 15 % от существующих значений, был разработан импульсный преобразователь мощности, принцип действия которого раскрыт в работах [1] и [2].

Разработанный преобразователь мощности представляет собой электротехнический аналог гидравлического домкрата. Его работа основана на порционном высокочастотном накоплении энергии в накопительной ёмкости с частотой  $f_1$  и последующем её разряде на нагрузку с меньшей частотой  $f_2 < f_1$ . При этом соотношение выходной и входной мощности преобразователя при условии соблюдения баланса выполненной работы ориентировочно составляет:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 \cdot U_2}{I_1 \cdot U_1} = \frac{f_1}{f_2} = n. \quad (1)$$

Повышение напряжения до требуемого уровня осуществляется с помощью высокочастотного импульсного трансформатора. Разработанная схема при соотношении частот  $f_1 = 100$  кГц,  $f_2 = 1$  кГц позволила осуществить питание нагрузки суммарной мощностью до 14 кВт при уровне потребляемой мощности 140 Вт.

Дальнейшая эксплуатация разработанного устройства выявила следующие недостатки:

- 1) импульсный характер выходного напряжения с малой возможностью стабилизации;
- 2) высокие требования к быстродействию и рабочему напряжению силовых ключей;
- 3) относительная сложность схемы управления силовыми ключами.

Усовершенствование рассмотренной схемы преобразователя мощности позволило устранить указанные недостатки и получить на выходе постоянное

стабилизированное напряжение, необходимое для работы большинства современных электронных устройств.

Произведём ориентировочный расчет предельной мощности упрощённой усовершенствованной схемы преобразователя, представленной на рис. 1 и состоящей из управляющего устройства, катушки индуктивности  $L_1$ , включённой по схеме резонанса токов, и накопительной ёмкости  $C_2$ .

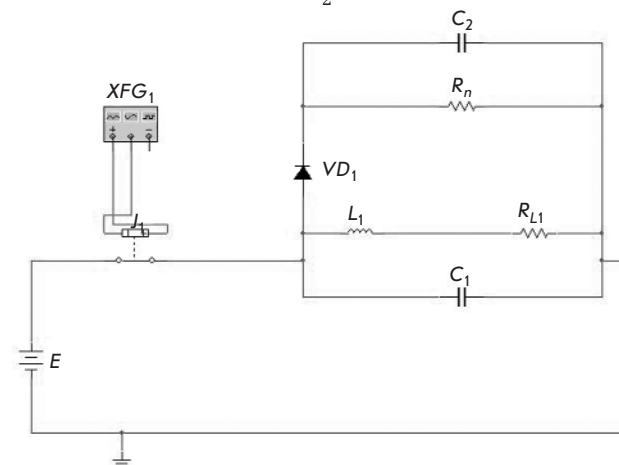


Рис. 1. Упрощённая схема импульсного преобразователя мощности

В связи с относительно высокой частотой сигнала на катушке индуктивности её следует рассматривать как длинную линию с распределёнными параметрами. С целью упрощения анализа схемы рассмотрим сосредоточенную модель катушки, учитывая сопротивление провода по постоянному току  $R_{L1}$  и её индуктивность  $L_1$ .

Необходимое максимальное значение напряжения в системе может быть достигнуто путём насыще-

ния катушки от источника постоянного тока  $E$  и её последующего прерывания с помощью электронного ключа [1]. С целью увеличения тока насыщения катушки и снижения потребляемой мощности устройства целесообразно подключить индуктивность по схеме резонанса токов (рис. 2).

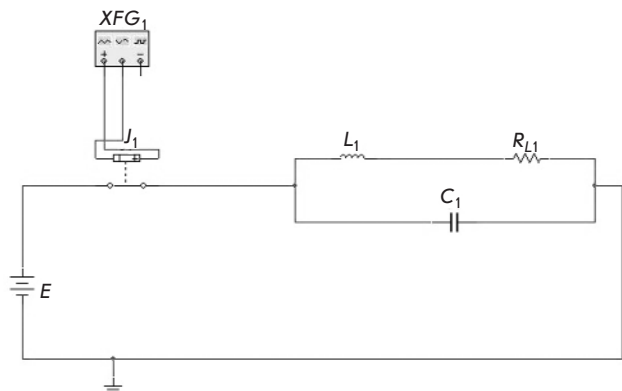


Рис. 2. Схема насыщения катушки индуктивности преобразователя

Анализ переходных процессов в схеме насыщения катушки (рис. 2) осуществим операторным методом. Рассмотрим процесс замыкания электронного ключа при нулевых начальных условиях:

$$i_{L1}(0_+) = i_{L1}(0_-); u_{C1}(0_+) = u_{C1}(0_-) = 0. \quad (2)$$

Операторная схема замещения исследуемой цепи представлена на рис. 3

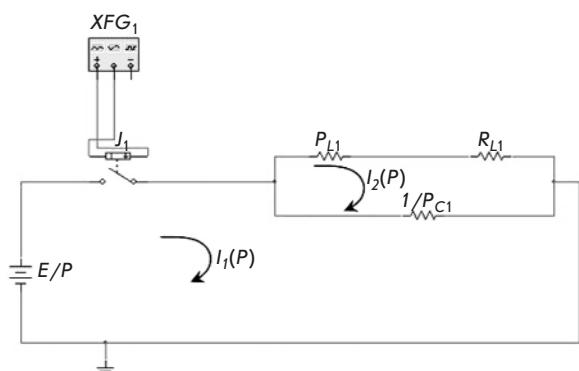


Рис. 3. Операторная схема замещения насыщения катушки

На основе метода контурных токов определим закон изменения тока катушки индуктивности при замыкании ключа:

$$\begin{cases} I_1(p) \cdot \frac{1}{pC_1} - I_2(p) \cdot \frac{1}{pC_1} = \frac{E}{p} \\ I_2(p) \cdot \left( pL_1 + R_{L1} + \frac{1}{pC_1} \right) - I_1(p) \cdot \frac{1}{pC_1} = 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$I_1(p) = \left( \frac{E}{p} + I_2(p) \cdot \frac{1}{pC_1} \right) \cdot pC_1;$$

$$I_2(p) \cdot \left( pL_1 + R_{L1} + \frac{1}{pC_1} \right) - \frac{E}{p} - I_2(p) \cdot \frac{1}{pC_1} = 0;$$

$$I_2(p) \cdot \left( pL_1 + R_{L1} + \frac{1}{pC_1} - \frac{1}{pC_1} \right) = \frac{E}{p};$$

$$I_2(p) \cdot (pL_1 + R) = \frac{E}{p};$$

$$I_2(p) = E \cdot \frac{1}{p(pL_1 + R_{L1})} = \frac{E}{L_1} \cdot \frac{1}{p \left( p + \frac{R_{L1}}{L_1} \right)};$$

$$\begin{aligned} i_2(t) = i_{L1}(t) = L^{-1}[I_2(p)] &= \frac{E}{L_1} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{R_{L1}}{L_1}t} \right) \cdot \frac{L_1}{R_{L1}} = \\ &= \frac{E}{R_{L1}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{R_{L1}}{L_1}t} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Анализ полученного выражения (4) показывает, что при замыкании ключа значение тока индуктивности экспоненциально увеличивается от нуля до установившегося значения  $E/R_{L1}$ . Время переходного процесса составляет от 3 до 5 значений  $\tau$  (постоянная времени катушки,  $\frac{L_1}{R_{L1}}$ ). Емкость  $C_1$  не оказывает влияния на процесс зарядки катушки. Следует отметить, что увеличение тока катушки до значения 0,6 от установившегося происходит за время  $\tau$ . Именно это значение времени определяет максимально допустимую частоту коммутации катушки. Таким образом, в период замыкания ключа за время  $(2 \div 3) \cdot \tau$  энергия, запасённая в катушке, составит:

$$W_{L1} = \frac{L_1 \cdot i_{L1}^2(3 \cdot \tau)}{2} \approx \frac{L_1 \cdot (E/R_{L1})^2}{2}. \quad (5)$$

При условии односторонней (через диод) передачи накопленной энергии в накопительную ёмкость  $C_2$  представляются возможными многократная коммутация катушки в течение 1 секунды и соответствующее увеличение выходной мощности преобразователя до значения:

$$P_{C2} \approx \frac{L_1 \cdot (E/R_{L1})^2}{2} \cdot f = \frac{C_2 \cdot U_{C2}^2}{2} \cdot f, \quad (6)$$

где  $f$  – частота коммутации катушки, Гц;  
 $U_{C2}$  – амплитудное значение напряжения ёмкости  $C_2$ , В.

Таким образом, с увеличением частоты коммутации катушки и её индуктивности  $L_1$  происходит увеличение выходной мощности преобразователя. Однако увеличение порогового значения частоты и индуктивности определяется постоянной времени катушки  $\tau$ . Например, для катушки с индуктивностью 1 мГн и сопротивлением 10 Ом постоянная времени составит 0,0001 с. При напряжении питания катушки в 10 В установившееся значение тока катушки не превысит 1 А. Предельная частота ком-

мутации катушки составит  $1/2\tau=5$  кГц. При этом выходная мощность преобразователя не превысит значения:

$$P_{C2} = \frac{0,001 \cdot I^2}{2} \cdot 5000 = 2,5 \text{ Вт.}$$

Следовательно, непосредственная коммутация катушки электронным ключом не позволяет обеспечить значительную мощность на выходе преобразователя.

Указанное ограничение устраняется введением в первичную цепь преобразователя конденсатора  $C_1$ , включённого параллельно катушке (см. рис. 1). При этом одновременно достигаются четыре положительных эффекта:

1) путём подбора соответствующего значения ёмкости  $C_1$  достигается резонанс токов, что одновременно приводит к увеличению тока насыщения катушки и значительному уменьшению входного тока, следовательно, к уменьшению потребляемой мощности;

2) при размыкании ключа ёмкость  $C_1$  обеспечивает свободные колебания тока катушки с высокой частотой, обеспечивающей через диод многократную накачку энергией накопительной ёмкости  $C_2$ ;

3) сокращается число электронных ключей и значительно упрощается схема управления;

4) рабочая частота электронного ключа уменьшается до десятков герц, вследствие чего обеспечивается необходимое время насыщения катушки.

Значение ёмкости конденсатора  $C_2$  выбирается исходя из условия баланса энергии катушки и конденсатора и поддержания на нагрузке заданного значения напряжения  $U_{C2}$ :

$$\frac{L_1 (E/R_{L1})^2}{2} = \frac{C_2 \cdot U_{C2}^2}{2}. \quad (7)$$

Частота свободных колебаний контура накачки катушки при многократном срабатывании электронного ключа рассчитывается на основе анализа переходных процессов при воздействии периодических импульсов тока известными методами, в частности, путём использования эшелонной функции [3].

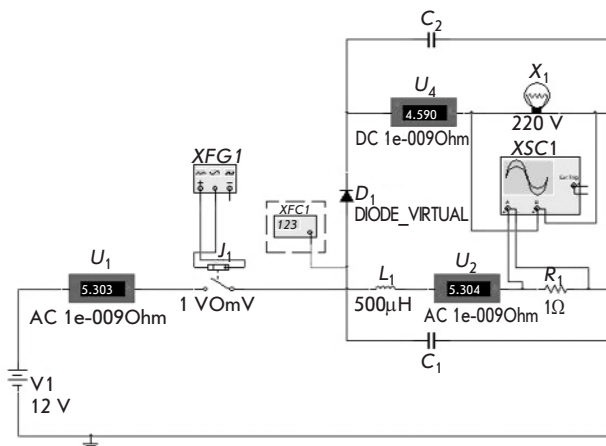


Рис. 4. Упрощённая схема преобразователя мощности 1 кВт

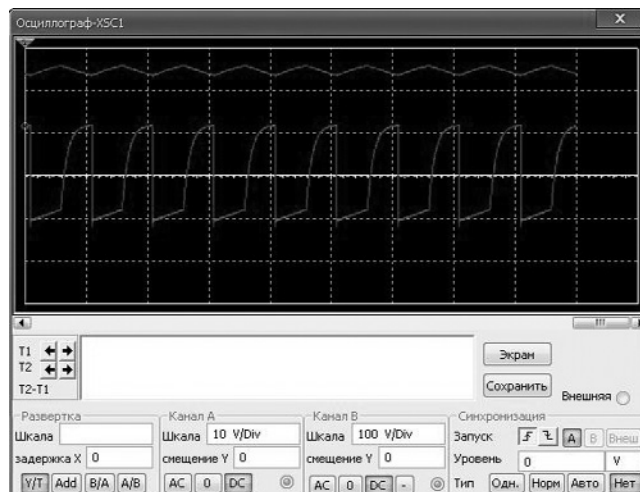


Рис. 5. Осциллограмма тока насыщения катушки и выходного напряжения преобразователя

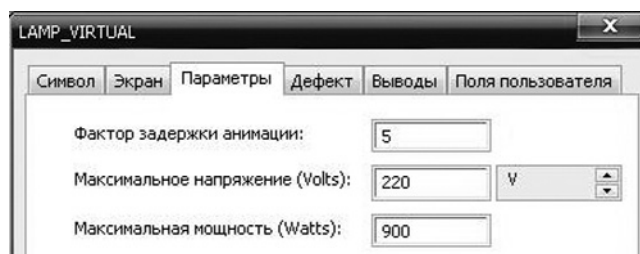


Рис. 6. Параметры нагрузки

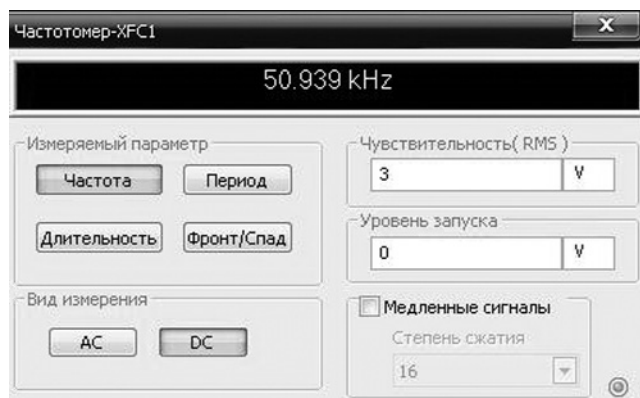


Рис. 7. Частота свободных колебаний контура накачки катушки

Авторами была спроектирована и реализована усовершенствованная схема импульсного преобразователя мощности со следующими параметрами: входное напряжение и ток – 12 В, 5,3 А; действующее значение тока насыщения катушки 9,3 А, выходное напряжение и ток – 220 В, 4,6 А; предельная выходная мощность 1000 Вт. Упрощённая схема данного устройства представлена на рис. 4; осциллограмма тока насыщения катушки и выходного напряжения преобразователя – на рис. 5; параметры нагрузки – на рис. 6; показание частотомера в цепи диода, соот-

ветствующее частоте свободных колебаний контура накачки катушки – на рис. 7.

Ориентировочное значение предельной мощности нагрузки представленного устройства определим с использованием ранее полученной формулы:

$$P_2 \approx \frac{L_1 \cdot I_{L1}^2}{2} \cdot f = \frac{500 \cdot 10^{-6} \cdot 9,3^2}{2} \cdot 50000 = 1081 \text{ Вт.}$$

При этом значение потребляемой мощности преобразователя не превысило 70 Вт.

Следует отметить, что представленная на рис. 4 схема преобразователя мощности не является рабо-

тоспособной в силу значительного упрощения устройства и ряда серьезных требований, предъявляемых к части её элементов. Полная принципиальная схема устройства не приводится с целью защиты интеллектуальной собственности.

В настоящее время получены патенты на изобретение, устройство и полезную модель преобразователя. Разработанный преобразователь мощности может быть использован в качестве основного и резервного источника питания устройств различного назначения, включая мобильные системы.

## Литература

1. Менакер К. В. Разработка преобразователя мощности электрической энергии // Проблемы трансфера современных технологий в экономику Забайкалья и железнодорожный транспорт. – 2011. – Т.2. – С. 225–233.
2. Менакер К. В., Цветаева А. С., Литвинцев А. Г., Семенов Н. Н. К вопросу создания преобразователя мощности как резервного источника питания // Электробезопасность. – 2012. – № 3. – С. 97–99.
3. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей: Учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.: ил.

## The question of the limiting target capacity definition of the pulse converter of electric energy capacity

**K. V. Menaker,**

*Zabaikalsky Railway Transport Institute, Ph.D., associate professor*

**A. S. Tsvetaeva,**

*Zabaikalsky Railway Transport Institute, post-graduate student*

*The authors offer to use the converter of electric energy capacity. In a basis of this device is reducing principle of capacity transformation. In this paper was made an analysis of work of the converter scheme with a purpose of the definition of a target capacity level. The developed device can be applied to decrease the power consumption of household and industrial electrical installations and as a reserve source of electric energy.*

**Keywords:** capacity converter, energy-economy, accumulative capacity, electronic key, inductance coil, current resonance, transients, free fluctuations.