

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 .

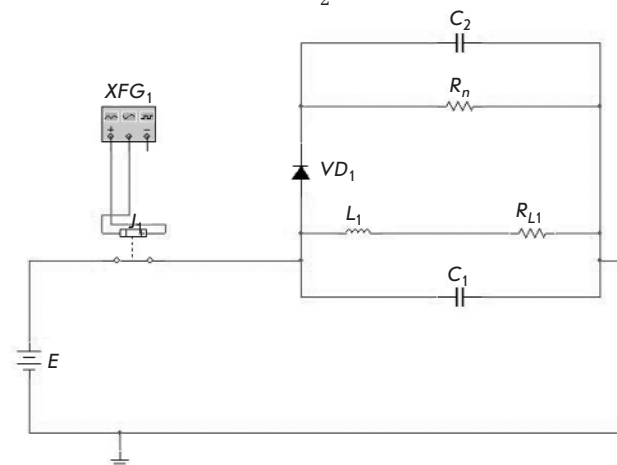


Рис. 1. Упрощённая схема импульсного преобразователя мощности

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).

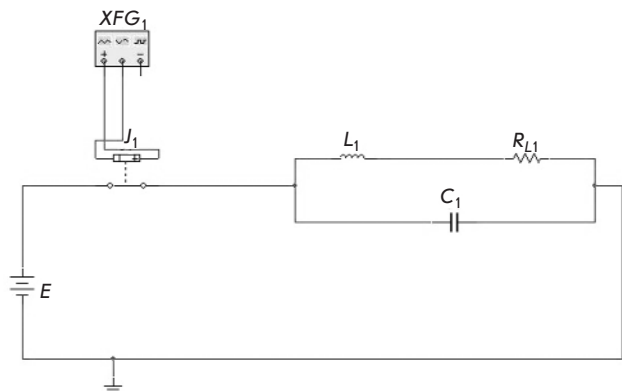


Рис. 2. Схема насыщения катушки индуктивности преобразователя

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

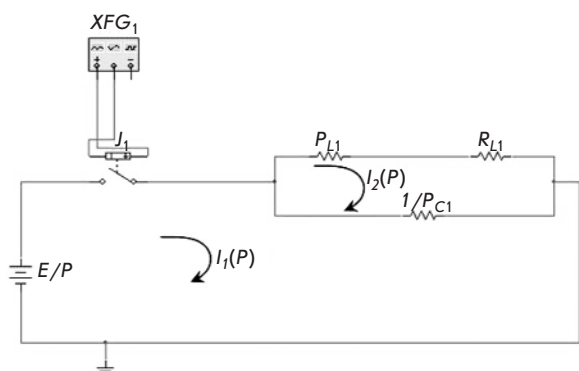


Рис. 3. Операторная схема замещения насыщения катушки

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

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

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

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

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

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

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

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

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 τ (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 τ . 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 τ . 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:

$$P_{C2} = \frac{0,001 \cdot 1^2}{2} \cdot 5000 = 2,5 \text{ Вт.}$$

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].

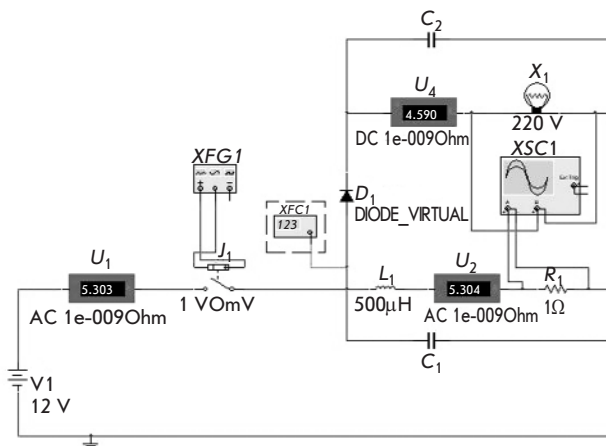


Рис. 4. Упрощённая схема преобразователя мощности 1 кВт

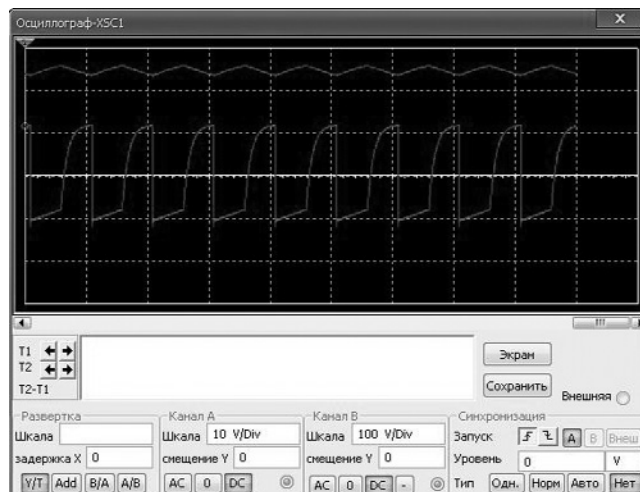


Рис. 5. Осциллограмма тока насыщения катушки и выходного напряжения преобразователя

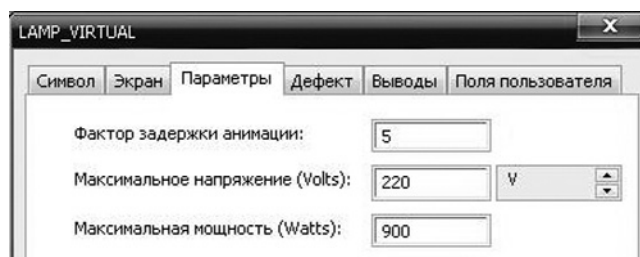


Рис. 6. Параметры нагрузки

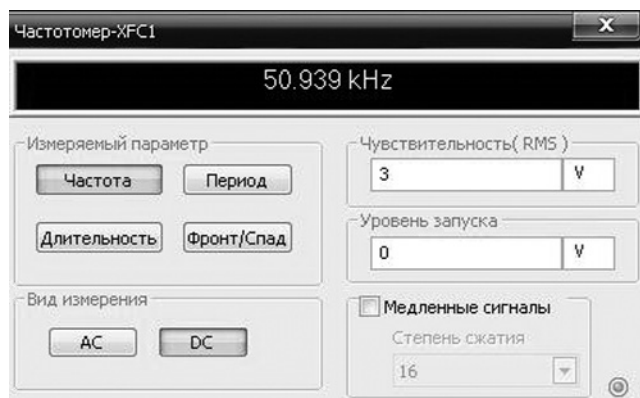


Рис. 7. Частота свободных колебаний контура накачки катушки

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.