

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕДУКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ МОЩНОСТИ КАК ОСНОВНОЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, филиал
ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей
сообщения»

К.В. Менакер, А.С. Цветаева

PULSE REDUCTION CONVERTER OF CAPACITY AS MAIN POWER SUPPLY OF ELECTROVEHICLES

Trans-Baikal institute of railway transport, branch «Irkutsk state university of means of communication»

K.V. Menaker, A.S. Tsvetaeva

We propose reducing the pulse power converter of electrical energy. The analysis of the converter circuit to determine the limiting output power level. The designed device can be used as a primary and a backup source of electrical energy.

Keywords: capacity transformer, energy saving, accumulative capacity, electronic key, inductor coil, current resonance

Предложен импульсный редукирующий преобразователь мощности электрической энергии. Осуществлен анализ работы схемы преобразователя на предмет определения предельного уровня выходной мощности. Разработанное устройство может быть применено в качестве основного и резервного источника электрической энергии.

Постоянный рост цен на энергоносители и ужесточение экологических норм заставляет авто и авиа производителей искать новые пути повышения эффективности своих транспортных средств. Увеличение доли автотранспортных средств на природном газе, появление и массовое внедрение гибридных и электрических силовых установок, разработка всевозможных видов биотоплива тому подтверждение.

Исторически электромобили, водные и морские суда на электроприводе появились еще во времена Эдиссона. Простота конструкции, экологичность, отсутствие необходимости в охлаждающих и смазывающих жидкостях, простой пуск в холодное время года вот далеко неполный список преимуществ электродвигателя перед двигателями внутреннего сгорания. Однако, отсутствие надежных источников постоянного тока в то время привело к тому, что к 1915 году электрический автомобиль канул в лету. В 1931 году Никола Тесла предпринимает попытку возрождения электромобилей. Известная его демонстрация электромобиля с двигателем переменного тока, питаемого от высокоэффективного источника электрической энергии, могла бы навсегда изменить ход истории. Но скептицизм людей и жажда обогащения на продаже нефтепродуктов не позволили талантливому ученому притворить свои идеи в жизнь.

В настоящее время направление развития электропривода и эффективных источников электрической энергии является приоритетным для большинства известных производителей. Однако, несмотря на достигнутые результаты в области накопительных электрических устройств и гибридных систем, проблема с источниками электрической энергии остается весьма актуальной.

В работах [1-3] был раскрыт принцип действия импульсного редукирующего преобразователя мощности, разработанного в рамках обеспечения устойчивого электропитания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Первоначально преобразователь мощности разрабатывался в качестве резервного источника питания. Его максимальная выходная мощность не превышает 2,5 кВт при потребляемом уровне в 250 Вт. Даже эти характеристики как показали испытания, позволят отказаться от большого числа резервных аккумуляторных батарей на станциях и уменьшить энергопотребление до 10 раз.

Однако, проведенный анализ схемы показал, что введение обратной связи в разработанном устройстве позволит поставить его на самопитание и использовать первичный источник в виде аккумуляторной батареи лишь для пуска преобразователя. При этом становится возможным увеличение выходной мощности устройства до нескольких десятков и даже сотен киловатт и его использование для питания электродвигателей всевозможных транспортных средств.

В доказательство сказанного приведем простейший анализ упрощенной схемы разработанного преобразователя, представленной на рисунок 1.

Основным элементом схемы является катушка индуктивности L_1 , с сопротивлением по постоянному току R_{L1} . Для линейной индуктивности напряжение на ее зажимах пропорционально скорости изменения тока и определяется выражением

$$u_L = L_1 \frac{di_L}{dt}. \quad (1)$$

Внимательный анализ выражения (1) показывает, что чем быстрее изменяется ток, проходящий через катушку, тем большее напряжение наводится на ее концах. Производная – это тангенс угла наклона касательной к функции тока. Значение тангенса угла $\pm 90^\circ$ стремится к бесконечности, а значит и напряжение на катушке достигает значимых значений при резком прерывании тока, которое осуществляется в схеме с помощью электронного ключа J1.

Однако, прерывание тока ключом не означает одномоментную остановку электронов в проводнике катушки. Это подтверждает один из законов коммутации $i_L(0_+) = i_L(0_-)$ и появление разрядов на выводах катушки. А это означает, что спустя определенное время после прерывания цепи катушки на ней действует практически прежнее значение тока при уровне напряжения, превышающего прежнее в десятки и сотни раз. Произведение же тока на напряжение это мгновенная мощность $p_L = u_L i_L$. Таким образом, мгновенная выходная мощность катушки превышает входную при импульсном характере тока, текущего через нее. Катушка как бы сама начинает вырабатывать электрическую энергию.

Остается только увеличить частоту коммутации катушки, время нахождения ее в высокоактивном состоянии и добиться совпадения по фазе напряжения u_L и тока i_L . Установкой параллельно индуктивности L_1 правильно рассчитанной емкости C_1 достигаются все три условия. При достижении режима резонанса токов в колебательном контуре $L_1 C_1$ возникают свободные колебания с частотой f_2 намного превышающей частоту f_1 накачки катушки. Увеличивается время насыщенного состояния катушки до момента ее следующей подзарядки. Напряжение и ток на резонансной частоте совпадают по фазе [4], и кроме того, увеличивается амплитуда тока i_L . При этом частота коммутации катушки f_1 должна быть намного меньше частоты ее свободных колебаний f_2 и кратна ей $f_1 = n \cdot f_2$ иначе достижение резонанса невозможно. Предельное же значение частоты коммутации катушки f_1 выбирается исходя из времени достижения установившегося значения тока катушки при замкнутом положении ключа J1.

Закон изменения тока катушки при ее коммутации от источника постоянного тока носит экспоненциальный характер

$$i_L(t) = \frac{U_1}{R_{L1}} \left[1 - \exp\left(-\frac{R_{L1}}{L_1} \cdot t\right) \right], \quad (2)$$

где U_1 – ЭДС источника;

τ – постоянная времени катушки

$$\tau = L_1 / R_{L1}.$$

Спустя промежуток времени $(2-3)\tau$ значение тока катушки достигает установившегося значения U_1 / R_{L1} . Поэтому частота коммутации катушки f_1 должна быть не выше значения:

$$f_{1max} = (T_{min})^{-1} = (\tau \cdot s)^{-1}; \quad (5)$$

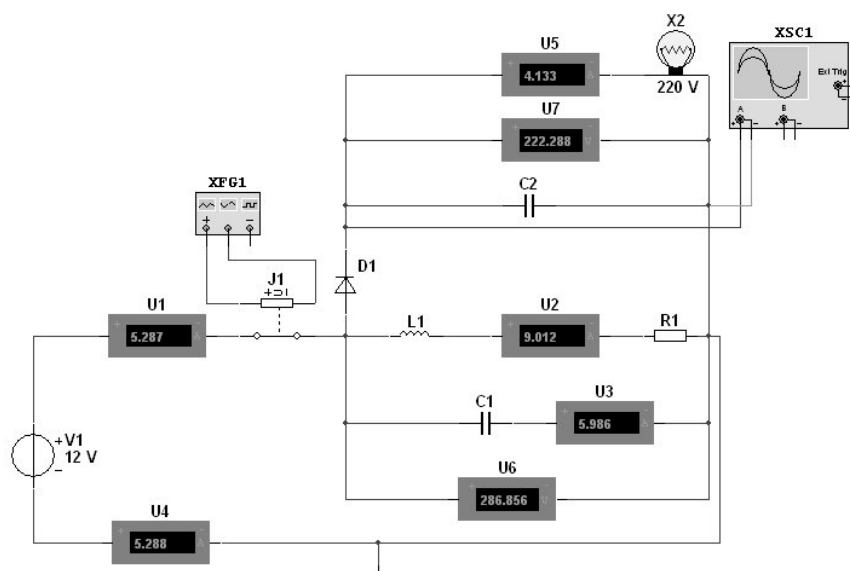


Рисунок 1 – Упрощенная схема преобразователя мощности без цепи обратной связи

$$s = T_{\min} / h; \quad h \geq \tau; \quad T_{\min} = h \cdot s = \tau \cdot s;$$

где h – длительность управляющего импульса;
 T_{\min} – минимальный период следования импульсов;
 s – скважность управляющего сигнала генератора XFG1;

На более высокой частоте коммутации значение тока катушки просто не будет успевать достигать своего установившегося значения, которое квадратично определяет значение запасенной энергии:

$$w_L(t) = \frac{L_1 \cdot i_L^2}{2} \approx \frac{L_1 \left(\frac{U_1}{R_{L1}} \right)^2}{2}, \quad (3)$$

Для определения выходной мощности преобразователя рассмотрим энергетические процессы в параллельном колебательном контуре $L_1 C_1$. Как было сказано на резонансной частоте напряжение и ток контура совпадают по фазе:

$$u = \sqrt{2} U \cdot \cos(\omega_0 t + \psi); \quad i = \sqrt{2} I \cdot \cos(\omega_0 t + \psi). \quad (4)$$

Мгновенное значение энергии, запасаемой в индуктивности, определяется ее током

$$i_L = \sqrt{2} I \cdot \cos(\omega_0 t + \psi), \quad (5)$$

а мгновенное значение энергии, запасаемой в емкости, – напряжением емкости

$$u_C = \sqrt{2} I \cdot \frac{1}{\omega_0 C} \cos\left(\omega_0 t + \psi - \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2} I \cdot \rho \cdot \sin(\omega_0 t + \psi). \quad (6)$$

Подставляя выражения (5) и (6) в выражения для энергии индуктивности и емкости, получаем:

$$w_{L1} = \frac{L_1 \cdot i_L^2}{2} = L_1 \cdot I^2 \cdot \cos^2(\omega_0 t + \psi) = \frac{L_1 \cdot I^2}{2} [1 + \cos^2(\omega_0 t + \psi)]; \quad (7)$$

$$w_{C1} = \frac{C_1 \cdot u_C^2}{2} = C_1 \cdot I^2 \cdot \rho^2 \cdot \sin^2(\omega_0 t + \psi) = C_1 \cdot I^2 \cdot \frac{L_1}{C_1} \sin^2(\omega_0 t + \psi) = \frac{L_1 \cdot I^2}{2} [1 - \cos^2(\omega_0 t + \psi)];$$

$$\rho = \frac{1}{\omega_0 C_1} = \omega_0 L_1 = \sqrt{L_1 / C_1}.$$

Несмотря на то, что w_{L1} и w_{C1} являются функциями времени, суммарная энергия, запасенная в реактивных элементах цепи, постоянна [4]

$$W_{\text{зан}} = w_{L1} + w_{C1} = L_1 \cdot I^2. \quad (8)$$

При условии многократных колебаний контура на частоте $f_2 = \omega_0 / 2\pi$ и односторонней передачи накопленной энергии через диод D1 в накопительную емкость C_2 , мощность, выделявшаяся в нагрузку за 1 с составит:

$$P_H = W_{\text{зан}} \frac{f_2}{S} = L_1 I^2 \frac{f_2}{S}. \quad (9)$$

Опытные испытания преобразователя мощности без цепи обратной связи, представленного на рисунок 1 подтвердили правильность изложенного. Выходная мощность преобразователя составила 1 кВт при уровне потребляемой в 70 Вт. Многократное превышение уровня выходной мощности потребляемого значения позволяет ввести в схему преобразователя обратную связь, осуществить запуск от аккумуляторной батареи, и да-

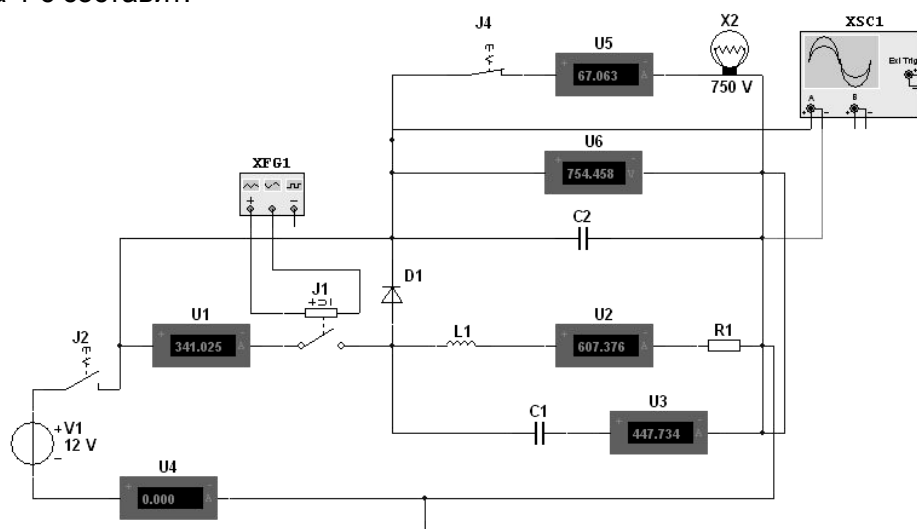


Рисунок 2 – Упрощенная схема преобразователя мощности с цепью обратной связи

лее, при временно отключенной нагрузке подать всю выходную энергию во входную цепь. Произойдет лавинное увеличение выходной мощности преобразователя, которое необходимо ограничивать с помощью стабилизаторов тока и напряжения. При достижении на выходе преобразователя соответствующего напряжения осуществить включение нагрузки. На рисунке 2 представлены результаты моделирования работы схемы преобразователя с цепью обратной связи. При уровне выходного напряжения в 750 В выходная мощность составила 50 кВт и это без дополнительных внешних источников энергии. Предельная выходная мощность преобразователя в данном случае ограничивается предельно допустимыми параметрами элементной базы.

Разработанный преобразователь может быть использован в качестве основного и резервного источников электроснабжения стационарных объектов и главным образом электротранспортных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Менакер, К.В. Разработка преобразователя мощности электрической энергии / К.В. Менакер // Проблемы трансферта современных технологий в экономику Забайкалья и железнодорожный транспорт. -2011. -Т.2. -С. 225-233.
- 2 К вопросу создания преобразователя мощности как резервного источника питания / К.В. Менакер, А.С. Цветаева, А.Г. Литвинцев, Н.Н. Семенов // Электробезопасность.
- 3 Менакер, К.В. К вопросу определения предельной выходной мощности импульсного преобразователя мощности электрической энергии / К.В. Менакер, А.С. Цветаева // Энергобезопасность и энергосбережение.
- 4 Попов, В.П. Основы теории цепей: учеб. для вузов / В.П. Попов. -3-е изд., испр. -М.: Высш. шк., 2000. -575 с.: ил.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: преобразователь мощности, энергосбережение, накопительная ёмкость, электронный ключ, катушка индуктивности, резонанс тока

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Менакер Константин Владимирович, канд. техн. наук, доцент ЗаБИЖТ, филиал ФГБОУ ВПО «ИрГУПС»

Цветаева Анна Сергеевна, аспирант ЗаБИЖТ, филиал ФГБОУ ВПО «ИрГУПС»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 672040, г. Чита, ул. Магистральная, 11, ЗаБИЖТ, филиал ФГБОУ ВПО «ИрГУПС»

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СХЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВСЕРЕЖИМНЫХ МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Ю.В. Хрущев, Ю.С. Боровиков, К.И. Заподовников, А.О. Сулайманов

PRINCIPLES OF FORMATION OF SCHEMES FOR MODELLING CONSTRUCTION ALL-MODE SIMULATION COMPLEXES COMPLEX ELECTRIC POWER SYSTEMS

«National research «Tomsk polytechnic university»
Yu.V. Hrushev, Yu.S. Borovikov, K.I. Zapodovnikov, A.O. Sulajmanov

The basic principles of decision-making are formulated at formation of schemes of modeling for creation of variable modeling complexes of difficult electropower systems. High level of uncertainty of initial conditions and basic data owing to what the part of decisions on formation of schemes of modeling is accepted on the basis of an expert approach is noted.

Keywords: variable modeling, electropower systems, schemes of modeling

Сформулированы основные принципы принятия решений при формировании схем моделирования для построения всережимных моделирующих комплексов сложных электроэнергетических систем. Отмечен высокий уровень неопределённости исходных условий и исходных данных, в силу чего часть решений по формированию схем моделирования принимается на основе экспертного подхода.

При решении прикладных задач, связанных с моделированием схем и режимов сложной электроэнергетической системы (ЭЭС), неизбежно решается задача упрощения её исходного математического описания процессов (исходной модели) [1]. Как известно, такое упрощение сводится к понижению порядка системы дифференциальных уравнений ЭЭС в соответствии с условиями решаемой задачи и уровнем качества применяемых для моделирования средств. Упрощение достигается различными способами [1], которые условно можно объединить в группу способов понижения количества представляемых в расчётной модели элементов и группу способов понижения степени детализации подсистем уравнений этих элементов. В зависимости от конкретных условий в большей мере используются способы упрощения первой или второй группы, однако способы обеих групп присутствуют совместно.

Современные профессиональные программные комплексы (ПК), широко используемые