

И.А. Белоус

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Владивосток. Россия

Моделирование схем импульсных устройств электропитания в пакете NI Multisim

Приведены результаты моделирования и расчетов параметров понижающего и повышающего импульсных преобразователей постоянного напряжения. Показано, что пакет NI Multisim содержит достаточно точные и адекватные модели радиоэлементов и может быть успешно использован для схемотехнического моделирования импульсных устройств вторичного электропитания.

Ключевые слова и словосочетания: схемотехническое моделирование, стабилизатор напряжения, широтно-импульсная модуляция, преобразование постоянного напряжения, импульсный стабилизатор.

I.A. Belous

Vladivostok State University of Economics and Service
Vladivostok. Russia

Modeling of schemes of pulse devices of power supply in a NI Multisim package

Results of modeling and calculation of parameters down and step-up DC switching converters are given. It is shown that the NI Multisim package contains rather exact and adequate models of radioelements and it can be successfully used for circuitry modeling of pulse devices of secondary power supply.

Keywords: circuit simulation, a voltage regulator, pulse width modulation, the conversion constant voltage switching regulator.

Разработка любого радиоэлектронного устройства [1] включает физическое или математическое моделирование. Физическое моделирование связано с большими материальными затратами, так как требует изготовления макетов и их трудоемкое исследование, а иногда просто невозможно из-за сложности радиоэлектронного устройства. В этом случае прибегают к математическому моделированию с использованием средств и методов вычислительной техники [2].

NI Multisim – это программный пакет (рис. 1), позволяющий моделировать электронные схемы и разводить печатные платы. Главная особенность NI Multisim [3] – простой и наглядный интерфейс, мощные средства графического

Белоус Игорь Александрович – доцент кафедры информационных технологий и систем; e-mail: igor.belous@vvsu.ru.

анализа результатов моделирования, наличие виртуальных измерительных приборов, копирующих реальные аналоги. Библиотека элементов содержит более 2000 SPICE-моделей компонентов National Semiconductor, Analog Devices, Phillips, NXP и других производителей. Присутствуют электромеханические модели, импульсные источники питания, преобразователи мощности.

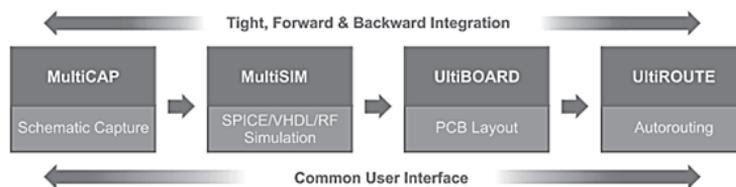


Рис. 1. Взаимосвязь программного обеспечения в NI Multisim

Multicap – средство создания и описания электрических схем. Программа включает безрежимное редактирование, имеет удобные средства взаимодействия с другими программными продуктами и обширную базу данных.

Multisim – интерактивный эмулятор схем, осуществляющий моделирование и анализ аналоговых и цифровых электрических цепей.

UltiBOARD – программное средство для размещения электрорадиоэлементов и разводки электрических соединений между компонентами.

Ultiroute – программное средство для автоматического размещения и соединения большого количества компонентов на печатной плате.

Постоянное совершенствование аппаратуры связи предъявляет все более высокие требования к таким показателям качества источников вторичного электропитания, как надежность, коэффициент стабилизации, выходное сопротивление, масса и габариты, энергетическая эффективность и др. [4]. Эти требования противоречивы. Так, уменьшение выходного сопротивления может быть достигнуто за счет усложнения схемы стабилизатора, что приводит к уменьшению надежности и увеличению его массы. Повышение КПД стабилизаторов напряжения и тока возможно только за счет уменьшения потерь мощности в элементах стабилизатора, что при непрерывном способе регулирования весьма затруднено. При увеличении мощности, отдаваемой стабилизатором в нагрузку, увеличиваются габариты и масса радиаторов, необходимых для нормального теплового режима работы регулирующих транзисторов.

Стабилизатор напряжения (тока), регулирующий элемент которого работает в режиме периодического переключения, называется стабилизатором с импульсным регулированием, или импульсным (ключевым) стабилизатором.

На рисунке 2 приведена функциональная схема силовой цепи компенсационного стабилизатора постоянного напряжения с импульсным регулированием, в котором регулирующий элемент условно показан в виде ключа *Кл*. Этот ключ периодически замыкается, и на вход Г-образного сглаживающего LC-фильтра подаются импульсы напряжения (рис. 3), амплитуда которых равна величине входного напряжения $U_{вх}$, а длительность $t_{и}$ – времени, соответствующему замкнутому состоянию ключа *Кл*. Интервал, в течение которого ключ *Кл* разомкнут, равен длительности паузы $t_{п}$

между соседними импульсами. Период следования импульсов равен сумме длительностей импульсов t_n и t_n : $T = t_n + t_n$ [3].

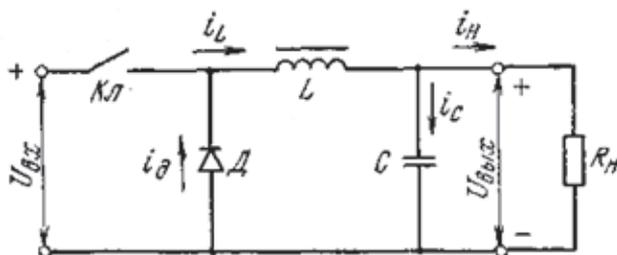


Рис. 2. Функциональная схема силовой цепи импульсного стабилизатора постоянного напряжения типа ПН

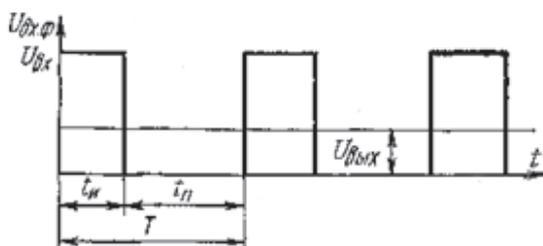


Рис. 3. График изменения во времени напряжения на входе сглаживающего фильтра в импульсном стабилизаторе типа ПН

Для идеального сглаживающего фильтра, в котором нет падения напряжения, среднее значение напряжения на выходе фильтра, т. е. на выходе стабилизатора [4]:

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_n} U_{\text{вх}} dt = U_{\text{вх}} \frac{t_n}{T}. \quad (1)$$

Из полученного соотношения следует, что при постоянных значениях $U_{\text{вх}}$ и T величина выходного напряжения стабилизатора $U_{\text{вых}}$ пропорциональна длительности импульса I_n . Отношение длительности импульсов I_n к периоду их следования T называется коэффициентом заполнения [4]:

$$K_z = t_n / T. \quad (2)$$

Соответственно при $T = \text{const}$ получается

$$U_{\text{вых}} = K_z U_{\text{вх}}. \quad (3)$$

где $K_z < 1$, т. е. среднее значение выходного напряжения в рассматриваемой схеме будет всегда меньше среднего значения входного напряжения. Импульсные стабилизаторы постоянного напряжения, у которых $U_{\text{вых}} < U_{\text{вх}}$, называются понижающими или типа ПН.

Для импульсного стабилизатора типа ПН постоянство напряжения на выходе при изменении входного напряжения обеспечивается соответствующим изме-

нением коэффициента заполнения K_3 . Если напряжение на входе стабилизатора уменьшается: $U_{вх1} = U_{вх} - \Delta U_{вх}$, то $U_{вых1} = K_{31}U_{вх1}$. Если при номинальном значении входного напряжения $U_{вх}$ величина выходного напряжения определялась соотношением (3), то для постоянства напряжения на выходе стабилизатора: $U_{вых} = \text{const}$ – необходимо, чтобы $K_{31} > K_3$.

Коэффициент сглаживания пульсаций Г-образного фильтра тем больше, чем выше частота пульсаций ω_n по отношению к собственной частоте LC-контура ω_0 , т. е. чем меньше период следования импульсов T по сравнению с периодом $2\pi/\omega_0$ [4].

В момент замыкания ключа $Kл$ на вход фильтра подается напряжение $U_{вх}$, и через реактор L начинает протекать ток $i(L)$, возрастающий по линейному закону благодаря тому, что постоянная времени цепи $\tau = L/R$ достаточно велика. Если рассматривается установившийся режим работы ключа (после большого числа его замыканий и размыканий), то к реактору прикладывается напряжение, равное разности между $U_{вх}$ и напряжением на конденсаторе u_c : $u_L = U_{вх} - u_c$. При этом вентиль D оказывается закрытым под действием обратного напряжения, равного по величине $U_{вх}$. Конденсатор C сначала продолжает разряжаться на сопротивление нагрузки при $u_c > (U_{вх} - u_L)$, а затем начинает заряжаться при $u_c < (U_{вх} - u_L)$. В момент размыкания ключа $Kл$ ток, протекающий через реактор, достигает некоторого максимального значения I_{Lm} , которому соответствует запасенная в магнитном поле реактора энергия $LI_{Lm}^2/2$. Ток в реакторе не может мгновенно снизиться до нуля [4].

В некотором интервале времени, в течение которого магнитный поток, сцепленный с витками обмотки реактора, снижается до нуля, в обмотке индуцируется ЭДС $e_2 = -d\psi/dt = -Ldi_L/dt$, противодействующая уменьшению ЭДС. Полярность этой ЭДС противоположна полярности ЭДС реактора в интервале времени, когда ключ был замкнут. Под действием ЭДС открывается вентиль D , и энергия реактора начинает поступать в нагрузку, поэтому ток реактора снижается до некоторого минимального значения I_{Lmin} , соответствующего моменту времени, когда ключ $Kл$ снова замкнется, и т. д.

В интервале t_n , когда ключ разомкнут, конденсатор C сначала продолжает заряжаться при $u_c < e_L$, а затем уже разряжается при $u_c > e_L$. Если при этом ток, протекающий через реактор, не снижается до нуля ($I_{Lmin} > 0$), то режим работы силовой цепи импульсного стабилизатора называется *режимом непрерывного тока реактора*. Режим прерывистого тока реактора, при котором в интервале t_n ток в обмотке реактора снижается до нуля, имеет тот недостаток, что ухудшается сглаживание пульсаций на выходе стабилизатора. Режим непрерывного тока реактора получается тогда, когда величина индуктивности реактора выбирается больше критической $L_{кр}$, которая соответствует нулевому значению тока в обмотке реактора в момент, предшествующий замыканию ключа $Kл$ [4].

При непрерывном протекании тока через индуктивность среднее значение тока в нагрузке I_n равно среднему значению тока индуктивности:

$$I_n = (I_{Lm} + I_{Lmin})/2. \quad (4)$$

Рабочая схема части силовой цепи импульсного стабилизатора постоянного напряжения типа ПН (рис. 4) содержит помимо источника постоянного напряжения $V1$ и нагрузки RH четыре основных элемента: ключ S , реактор $L1$, конденсатор $C1$ и вентиль VD .

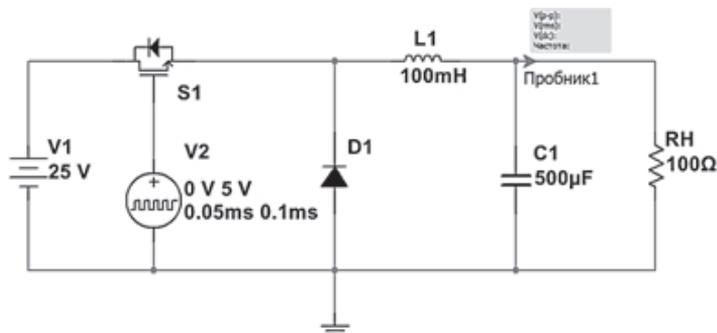


Рис. 4. Рабочая схема для изучения понижающего преобразователя постоянного напряжения

Произведено моделирование понижающего преобразователя постоянного напряжения с целью определения зависимости выходного напряжения от коэффициента заполнения K_3 и сравнения полученных данных с теоретическими расчетами по (3). На рисунке 5 представлены полученные данные. Наблюдается тенденция уменьшения числовых различий между измеренными и рассчитанными значениями по мере увеличения коэффициента заполнения.

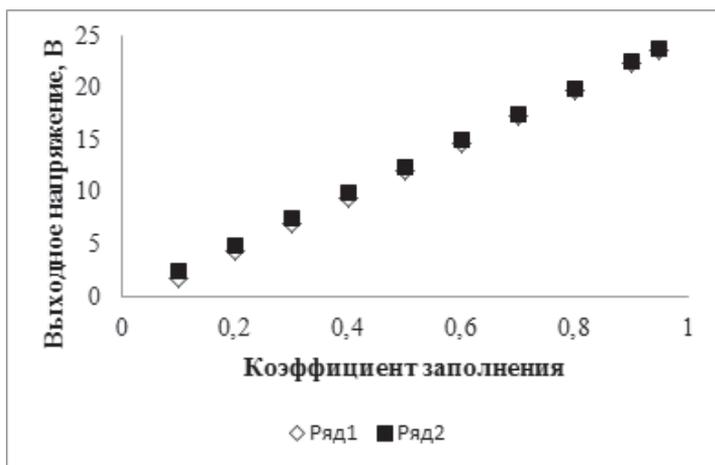


Рис. 5. Результаты измерений (ряд 1) и расчетов (ряд 2) уровня выходного напряжения понижающего преобразователя постоянного напряжения от коэффициента заполнения

Функциональная схема силовой цепи импульсного стабилизатора постоянного напряжения типа ПВ (рис. 6) содержит четыре основных элемента: ключ $Kл$, реактор L , конденсатор C и вентиль D . Величина напряжения на выходе $U_{\text{вых}}$ в данной схеме будет больше величины напряжения на его входе $U_{\text{вх}}$ [4].

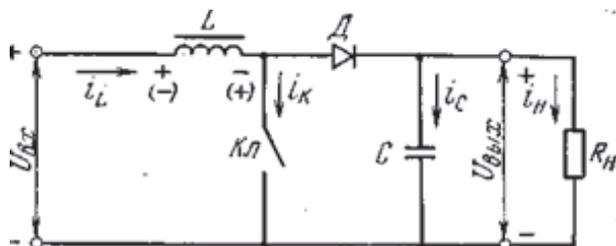


Рис. 6. Функциональная схема силовой цепи импульсного стабилизатора постоянного напряжения типа ПВ

Рассмотрим установившийся режим работы ключа $Kл$. При его замыкании к реактору L прикладывается входное напряжение $U_{вх}$ и через реактор начинает протекать линейно нарастающий ток, поскольку постоянная времени цепи заряда $\tau_3 = L/R_L$ (R_L – активное сопротивление обмотки реактора) обычно много больше времени, в течение которого ключ $Kл$ замкнут. Предполагаем, что реактор работает в режиме непрерывного протекания тока. При этом в магнитном поле реактора запасается электромагнитная энергия, равная $W_L = Li_L^2/2$. Вентиль D в этот интервал не пропускает ток, так как к нему приложено обратное напряжение U_C конденсатора C , которое образовалось в результате большого числа замыканий и размыканий ключа $Kл$. Напряжение на сопротивлении нагрузки R_H в интервале t_H равно напряжению на конденсаторе C . Электродвижущая сила обмотки реактора в этом интервале равна величине входного напряжения и имеет полярность, обратную полярности напряжения на входе $U_{вх}$ (рис. 6) [4].

При размыкании ключа $Kл$ ток, протекающий через реактор, и магнитный поток в сердечнике реактора не могут мгновенно снизиться до нуля. За время, в течение которого магнитный поток снижается, в обмотке реактора индуцируется ЭДС $e_L = -wd\Phi/dt$, которая противодействует уменьшению МДС и имеет полярность, согласную с полярностью входного напряжения. Электродвижущая сила самоиндукции e_L оказывается включенной последовательно с напряжением $U_{вх}$. Суммарное напряжение $(U_{вх} + e_L)$ открывает вентиль D и дозаряжает конденсатор C . Таким образом, напряжение на нагрузке получается больше входного напряжения на величину, равную ЭДС самоиндукции реактора e_L .

Реактор в схеме стабилизатора типа ПВ не участвует в сглаживании пульсаций напряжения на сопротивлении нагрузки, а является элементом, в котором запасается электромагнитная энергия во время t_H . В интервале t_H эта энергия суммируется с энергией источника входного напряжения и передается в нагрузку. Поэтому наличие конденсатора C в схеме стабилизатора является принципиально необходимым, так как он является единственным элементом, обеспечивающим поддержание постоянного напряжения на нагрузке стабилизатора в интервале t_H . В импульсном стабилизаторе типа ПВ напряжение на выходе стабилизатора $U_{вых}$ связано с напряжением на его входе $U_{вх}$ выражением:

$$U_{вых} = U_{вх} \frac{1}{1 - K_3}, \quad (5)$$

где K_3 – коэффициент заполнения, определяемый по (2). Из (5) следует, что выходное напряжение стабилизатора типа ПВ всегда больше входного. Выходное напряжение тем больше входного, чем больше значение коэффициента заполнения K_3 [3].

Рабочая схема части силовой цепи импульсного стабилизатора постоянного напряжения типа ПВ (рис. 7) содержит помимо источника постоянного напряжения $V1$ и нагрузки RH четыре основных элемента: ключ S , реактор $L1$, конденсатор $C1$ и вентиль VD .

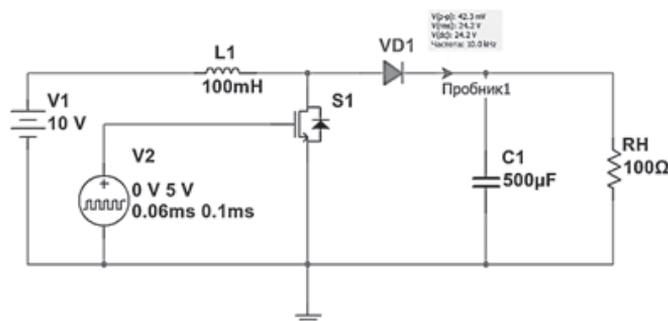


Рис. 7. Рабочая схема для изучения повышающего преобразователя постоянного напряжения

Произведено моделирование повышающего преобразователя постоянного напряжения с целью определения зависимости выходного напряжения от коэффициента заполнения K_3 и сравнения полученных данных с теоретическими расчетами по (5). На рисунке 8 представлены полученные данные. Наблюдается минимальное отличие измеренных и расчетных значений выходного напряжения повышающего преобразователя постоянного напряжения.

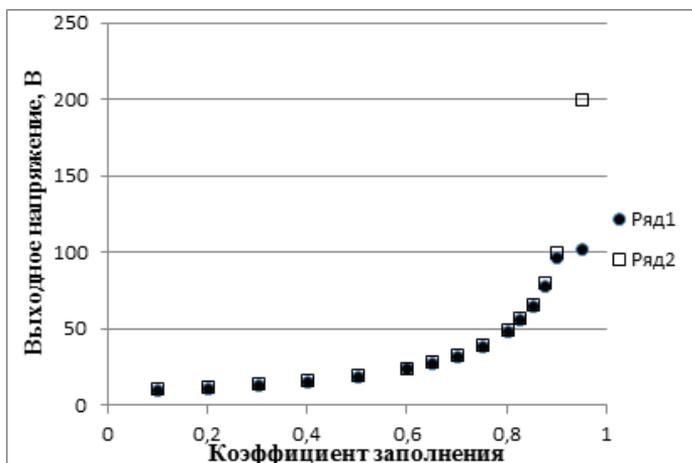


Рис. 8. Результаты измерений (ряд 1) и расчетов (ряд 2) уровня выходного напряжения повышающего преобразователя постоянного напряжения от коэффициента заполнения

Сравнение результатов моделирования и расчета параметров схем понижающего и повышающего преобразователей постоянного напряжения показывает адекватность и достаточную точность используемых моделей в пакете NI Multisim.

Данный пакет может успешно использоваться для схемотехнического моделирования импульсных устройств вторичного электропитания.

1. Номоконова, Н.Н. Электронные устройства: от идеи до практического результата / Н.Н. Номоконова, Г.В. Голиков, Д.Ю. Михайлов, Ю.В. Колесова, А.В. Овсяникова // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2015. – № 1 (28). – С. 62–65.
2. Введение в Multisim. Трёхчасовой курс [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ni.com/russia>
3. Шестеркин, А.Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10 / А.Н. Шестеркин. – М.: Пресс, 2015. – 360 с.
4. Левашов, Ю.А. Электропитание и элементы электромеханики: практикум / Ю.А. Левашов, Е.В. Аксенюк. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2006. – 76 с.

© Белоус И.А., 2016

Для цитирования: Белоус, И.А. Моделирование схем импульсных устройств электропитания в пакете NI Multisim / И.А. Белоус // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2016. – № 3. – С. 129–136.

For citation: Belous, I.A. Modeling of schemes of pulse devices of power supply in a NI Multisim package / I.A. Belous // The Territory Of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service. – 2016. – № 3. – P. 129–136.

Дата поступления: 04.05.2016.