

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-408-420>

УДК 621.311.6

Повышение надежности вторичного источника питания постоянного тока резервированием сигналов обратной связи

В. А. Шпенст¹⁾, Е. А. Орел¹⁾

¹⁾Санкт-Петербургский горный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье рассматривается проблема повышения надежности импульсных источников вторичного электропитания постоянного тока. Актуальность работы связана со значимостью электропитания в современной электронной технике, поскольку от исправности источников напрямую зависит качество работы электроприборов-потребителей, в том числе критически важных. Объектом исследования являются цепи обратной связи, осуществляющие стабилизацию параметров электропитания потребителей. Выход из строя указанных цепей чаще всего происходит из-за деградации электронных компонентов схемы в жестких условиях эксплуатации и при сильных механических перегрузках и опасен бесконтрольным увеличением выходного напряжения и тока источника. Чтобы этого избежать, авторами предложен способ резервирования сигналов обратной связи по напряжению, реализованный на базе источника, выполненного по обратноточковой топологии. Сигналы обратной связи формируются с оптрона, расположенного на стороне нагрузки, и с дополнительной обмотки силового трансформатора, вместе образуя два независимых контура регулирования выходного напряжения. В каждый момент времени стабилизацию осуществляет только один контур. При выходе из строя первого контура второй способен заменить его работу. Представленный способ не требует цифровой обработки сигналов и микропроцессорного управления и может быть реализован на базе доступных аналоговых микросхем, осуществляющих широтно-импульсное регулирование выходного напряжения источника. В результате решается проблема аварийного отказа цепей обратной связи, повышается надежность работы электрооборудования. Правильность предлагаемого подхода подтверждена результатами имитационного компьютерного моделирования в программе MatLab-Simulink. Полученные результаты могут использоваться при проектировании отказоустойчивых вторичных источников электропитания для работы в жестких условиях эксплуатации.

Ключевые слова: источник вторичного электропитания, обратноточковой преобразователь, надежность, резервирование, обратная связь, автоматическое регулирование

Для цитирования: Шпенст, В. А. Повышение надежности вторичного источника питания постоянного тока резервированием сигналов обратной связи / В. А. Шпенст, Е. А. Орел // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 5. С. 408–420. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-408-420>

Адрес для переписки

Шпенст Вадим Анатольевич
Санкт-Петербургский горный университет
Васильевский остров, 21 линия, 2,
199106, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Тел.: +7 812 328-84-69
shpenst@spmi.ru

Address for correspondence

Shpenst Vadim A.
Saint-Petersburg Mining University
2, 21st Line, Vasilievsky Ostrov,
199106, Saint-Petersburg, Russian Federation
Tel.: +7 812 328-84-69
shpenst@spmi.ru

Improving the Reliability of DC-DC Power Supply by Reserving Feedback Signals

V. A. Shpenst¹⁾, E. A. Orel¹⁾

¹⁾Saint-Petersburg Mining University (Saint-Petersburg, Russian Federation)

Abstract. The paper deals with the problem of improving the reliability of DC-DC power supplies with pulse-width modulation. The topicality of the work is related to the importance of power supply issues in modern electronics, since the quality of operation of consumer electrical appliances, including critical ones, directly depends on the serviceability of sources. The object of the study is feedback circuits aimed at stabilization of the parameters of power supply of consumers. Failures of the mentioned feedback circuits most often occurs due to the electronic components degradation under harsh operating conditions as well as under severe mechanical overloads. Such failures are dangerous for uncontrolled increase of power supply output voltage and output current. To avoid this, a new method of reserving voltage feedback signals is presented in the paper which is implemented on the basis of flyback supply topology. Feedback signals are formed from the optocoupler located on the load side and from the auxiliary winding of the power transformer, together forming two independent output voltage control circuits. Only one circuit performs stabilization at any given moment of time. If one of these circuits fails, the second one can simply replace it in its operation. The proposed method does not require any digital signal processing algorithms or microprocessor control modules and can be implemented on the basis of cheap, widely available analog chips that perform pulse-width control of the output voltage. As a result, the problem of sudden feedback loop failure is solved and the reliability of electrical equipment is increased. The validity of the proposed method is confirmed by the results of computer simulation with the use of MatLab-Simulink environment. The obtained results can be used in design of fault-tolerant secondary power supplies that operate in harsh operating conditions.

Keywords: secondary DC-DC power supply, flyback converter, reliability, reserving, feedback, automatic control

For citation: Shpenst V. A., Orel E. A. (2021) Improving the Reliability of DC-DC Power Supply by Reserving Feedback Signals. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (5), 408–420. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-408-420> (in Russian)

Введение

Проблема надежности – одна из ведущих в современной электронной технике. Ключевым ее фактором является качественное электропитание. Любой электроприбор имеет в своем составе источник вторичного электропитания (ИВЭП), осуществляющий преобразование параметров электрической энергии первичного источника (аккумулятора, сети переменного тока и т. д.) к значениям, необходимым для функционирования конкретного устройства-потребителя. Неполадки именно в этих устройствах чаще всего вызывают отказ электроаппаратуры.

Электропитание напрямую влияет на качество технологических процессов [1–3]. Для некоторых видов промышленного производства сбои в работе аппаратуры критически недопустимы [4]. Поэтому надежность ИВЭП важна как на этапе проектирования, так и при эксплуатации электронной техники.

На надежность ИВЭП оказывают влияние множество факторов: конструкция, используемая элементная база, условия эксплуатации, режи-

мы работы, параметры нагрузки, качество работы первичного источника и др. Грамотное проектирование ИВЭП должно учитывать все эти обстоятельства.

Цель исследований авторов – предложить способ повышения надежности ИВЭП. Объектом являлись цепи обратной связи (ОС), осуществляющие стабилизацию параметров электропитания потребителей. Актуальность работы связана со значимостью электропитания в современной электронной технике, поскольку от исправности ИВЭП напрямую зависит качество функционирования электроприборов-потребителей, в том числе критически важных для повседневной жизни.

Теоретические предпосылки решения проблемы

Классический подход к повышению надежности ИВЭП заключается в резервировании его основных рабочих узлов [5], которое можно организовать как в силовой схеме, так и в маломощных цепях управления.

Резервирование силовой схемы предполагает параллельную архитектуру ее построения, т. е. основывается на параллельном по входу и выходу соединении нескольких однотипных энергопреобразующих ячеек. Организовать их совместную работу можно двумя основными способами: удерживать часть ячеек неактивными, вводя их в работу в случае аварии на замену сгоревшим, как это реализовано, например, в источниках питания с горячим резервированием [6], либо держать включенными все ячейки, но нагружать их на неполную рабочую мощность, чтобы в случае аварии в отдельных ячейках была возможность безопасного ее перераспределения между оставшимися каналами. Как правило, мощность распределяют равномерно, поскольку тогда КПД преобразования максимален [7]. С этой целью прибегают к специальным схемотехническим решениям: добавляют в силовые цепи ячеек токоуравнивающие резисторы или диоды [8], применяют специализированные микросхемы [9], вводят дополнительные контуры ОС [10] и т. д. Благодаря параллельной архитектуре легко добиться, чтобы выход из строя одной ячейки не влиял на работоспособность всей системы. Для этого достаточно отделить ячейки по выходу развязывающими диодами и дополнить цепями токовой защиты, включая предохранители или защитные ключи [11].

При параллельной архитектуре разработчик получает возможность управлять значительным количеством одновременно работающих ячеек, вводя новые или отключая их по команде в зависимости от текущих условий. Таким образом, можно организовывать различные варианты функционирования всего источника.

В отличие от силовых цепей, дублирование элементов в схемах управления встречается гораздо реже. В отказоустойчивом ИВЭП схема управления в обязательном порядке строится на элементной базе, стойкой к воздействию внешних дестабилизирующих факторов. При этом она гальванически изолируется от силовой части источника, все ее цепи являются

слаботочными. По этой причине микросхемы цепи управления, такие как ШИМ-контроллеры, драйверы, логические элементы, операционные усилители и т. д., не резервируют (в этом нет необходимости из-за минимальных рисков их поражения), а стремятся ни при каких обстоятельствах не допускать сбоев в их работе: зависаний, ложных срабатываний, паразитных наводок, самовозбуждений. В данном случае руководствуются простыми эмпирическими правилами: чем проще схема, тем она надежней; вместо одного многозадачного микроконтроллера лучше несколько простых цифровых автоматов.

Отдельного внимания с точки зрения надежности заслуживают цепи ОС источника. Сигнал ОС необходим для построения замкнутого контура регулирования и является, по сути, связующим между силовой частью и схемой ее управления. В источниках со стабилизацией выходного напряжения сигнал ОС несет информацию о его текущем значении, т. е. прямо ему пропорционален. Поэтому цепи ОС строятся на базе чувствительных, высокоточных элементов управления для обеспечения максимальной точности измерения и регулировки. Исчезновение сигнала ОС чревато неконтрольным увеличением выходного напряжения и тока источника, что способно нанести урон питаемому от него потребителю. При этом на практике отказы цепей ОС происходят регулярно из-за деградации резисторов, конденсаторов, микросхем со временем [12]. Чаще всего это случается при работе источника в жестких условиях эксплуатации и при сильных механических нагрузках.

Классический ИВЭП со стабилизацией выходного напряжения имеет одну цепь ОС. Наиболее точную регулировку выходного напряжения обеспечивает сигнал ОС с оптрона, поэтому его применяют в большинстве ИВЭП с гальванической развязкой входной сети от нагрузки [13]. Несмотря на хорошие регулировочные характеристики, цепь ОС с оптроном не лучшее решение. Оptron – хрупкое, высокочувствительное устройство, которое в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов, например мощных электромагнитных импульсов, становится самым уязвимым местом всего источника (ухудшаются яркость и КПД свечения светодиода, снижается коэффициент пропускания оптического канала) [14].

Благодаря особенностям обратноточковой схемы сигнал ОС может быть получен не только с оптрона, но и с дополнительной обмотки силового трансформатора, на которой в каждом рабочем цикле наводится напряжение, прямо пропорциональное напряжению на нагрузке (напряжение обратного хода). Эту особенность можно использовать для формирования второго, резервного сигнала ОС источника.

Методы исследования

В работе излагается идея резервирования сигналов ОС по напряжению в источнике питания, выполненном по обратноточковой топологии.

На основе анализа публикаций других авторов выведены теоретические предпосылки реализации идеи, обоснованы примененные схмотехнические решения. Экспериментальная проверка идеи проведена с помощью имитационной компьютерной модели. Полученные результаты проанализированы.

На первом этапе разрабатывали принципы совместного функционирования ведущего и резервного контуров ОС с учетом, что сигналы ОС должны быть независимы и не препятствовать работе друг друга. На втором этапе в программной среде MatLab R2017a Simulink строили имитационную компьютерную модель вторичного источника питания.

Объект исследования – работа цепей ОС. В рамках экспериментальной модели ведущим контуром выбрана цепь ОС с оптроном, резервным – цепь ОС с дополнительной обмотки силового трансформатора. Имитационное моделирование воссоздавало ситуацию исчезновения сигнала ОС с оптрона. Правильность предложенного авторами способа резервирования контуров ОС подтверждается ситуацией, когда при выходе из строя ведущего контура ОС функцию стабилизации напряжения нагрузки берет на себя резервный.

Предлагаемая идея

Резервный контур ОС должен осуществлять две функции: 1) не препятствовать работе ведущего контура ОС с оптроном, когда оптрон исправен; 2) становиться ведущим, подхватывая управление, когда оптрон выходит из строя. Для этого в схеме предусматривается специальный алгоритм переключения между контурами ОС, основанный на принципе, что каждый контур должен иметь собственный порог срабатывания к величине сигнала ОС для вступления в работу. В качестве порогового элемента идеально подходит операционный усилитель, на инверсном входе которого выставлено некоторое пороговое опорное напряжение. При этом он может совмещать функции порогового элемента и усилителя ошибки. Пример такого элемента показан на рис. 1а. Сигнал ОС U_{OC} сравнивается с пороговым напряжением $U_{порог}$, задаваемым резистивным делителем R_1-R_2 . Их разница формирует сигнал ошибки. Резистор R и конденсатор C задают коэффициент усиления сигнала ошибки, формируя его итоговую величину $U_{ош}$. Для цепи ОС с оптроном такой усилитель встроен внутрь традиционно применяемой микросхемы параметрического стабилизатора наподобие TL431; для цепи ОС с обмотки силового трансформатора в качестве порогового элемента используются встроены в микросхемы ШИМ-контроллеров усилители ошибки.

При указанном алгоритме переключения между контурами ОС работа схемы управления осуществляется следующим образом. Контур ОС должны иметь разные пороги срабатывания, т. е. быть настроены на различные значения напряжения нагрузки. В каждый момент времени стабилизация выходного напряжения осуществляется с помощью только одного, ведущего контура ОС с самым низким порогом срабатывания, тогда как другой контур, для которого порог срабатывания сигналом ОС не пройден,

остается в резерве. При потере сигнала от ведущего контура ОС бесконтрольно увеличивающееся напряжение нагрузки ИВЭП преодолест порог срабатывания для вступления в работу резервного контура. Если пороги срабатывания контуров расположить максимально близко (рис. 1b), напряжение нагрузки после переключения между контурами останется почти неизменным и стабилизированным. На рис. 1b сигнал U_{OC1} с оптрона с порогом срабатывания, обеспечивающим напряжение на нагрузке $U_n = 12$ В, заменяется сигналом U_{OC2} с дополнительной обмотки силового трансформатора W_{OC} с порогом срабатывания, обеспечивающим напряжение нагрузки $U_n = 12,2$ В.

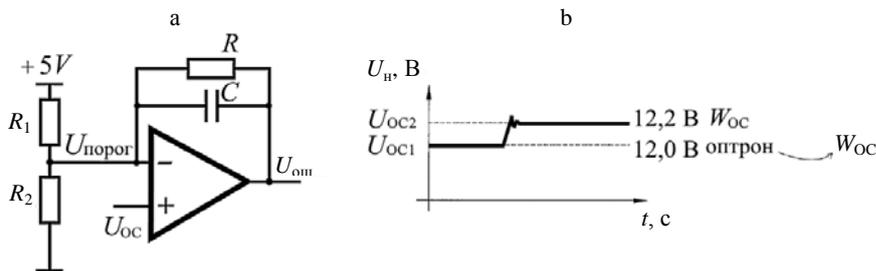


Рис. 1. Реализация переключения между контурами обратной связи: а – пороговый элемент для сигнала обратной связи; б – переход от ведущего контура обратной связи к резервному при разнице в порогах срабатывания 0,2 В

Fig. 1. Implementation of switching between feedback loops: а – threshold voltage element for the feedback signal; б – transition from the main feedback loop to the reserving feedback loop with a difference in thresholds of 0.2 V

Однако способ получения сигнала ОС с дополнительной обмотки силового трансформатора имеет существенный недостаток – влияние высокочастотного индуктивного выброса в момент закрытия силового транзисторного ключа, вызванное резким обрывом тока в индуктивности рассеяния силового трансформатора [15]. Выброс не позволяет добиться высокой стабильности выходного напряжения источника, внося свою добавку, а значит, ошибку в снимаемый сигнал ОС. Величину выброса можно уменьшить, уделив внимание качеству обмоток силовых трансформаторов с целью исключения возникновения магнитного потока рассеяния и, следовательно, уменьшения индуктивности рассеяния. Также хорошее воздействие оказывает добавление снабберной цепочки параллельно обмотке ОС. Еще более значительных результатов можно добиться применением планарных трансформаторов [16], силовые обмотки которых представляют собой медные дорожки на поверхности печатной платы. Недостатком планарной технологии является высокая стоимость конечного изделия.

Задача исключения высокочастотного выброса решается также схемотехническим способом – добавлением в цепь ОС схемы коррекции, выполняющей роль фильтрующего выброс элемента. На рис. 2а показан обратноточковой преобразователь напряжения с добавленной схемой коррекции. На вход преобразователя поступает напряжение питания $U_{вх}$. Сигнал ОС снимается с дополнительной обмотки силового трансформатора $U_{W_{OC}}$ и после прохождения токоограничивающего резистора $R_{огр}$ и выпрями-

тельного диода D_3 поступает на схему коррекции. Схема коррекции представляет собой конденсатор C_p и разрядную цепочку, образуемую резистором R_p и транзистором VT_p , которые обеспечивают разряд конденсатора C_p за время открытия транзистора VT_c силовой части схемы. Основное назначение цепочки – направить энергию высокочастотного выброса на заряд фильтрующего конденсатора C_p и уменьшить скорость нарастания переднего фронта выброса (рис. 2b). Вспомогательная цепь из диода D_2 и транзисторов VT_1 , VT_2 служит для согласования уровней напряжения между затвором силового транзистора VT_c и базой биполярного транзистора VT_p . После прохождения разрядной цепочки сигнал ОС сглаживается фильтрующим конденсатором C_{oc} и масштабируется резистивным делителем $R_{вп}-R_{нп}$. Итоговый сигнал ОС U_{oc} снимается в средней точке между резистором верхнего плеча $R_{вп}$ и резистором нижнего плеча $R_{нп}$ делителя.

Принцип работы схемы показан на рис. 2b. Сигнал ОС с дополнительной обмотки силового трансформатора U_{woc} содержит высокочастотный выброс по переднему фронту. Полезная информация об уровне напряжения на нагрузке U_n заключена в амплитуде сигнала $U_n n$, где n – коэффициент трансформации от вторичной силовой обмотки трансформатора к дополнительной обмотке ОС. Сигнал ОС заряжает фильтрующий конденсатор C_p . Скорость изменения напряжения на конденсаторе U_c делает передний фронт выброса пологим и не позволяет выбросу достичь большой величины. При этом пока на затворе силового транзистора VT_c есть напряжение «затвор – исток» $U_{зи-VT_c}$, конденсатор успевает разрядиться, подготовившись к следующему циклу заряда. Чем уже ширина импульсов на затворе VT_c , тем меньше время разряда.

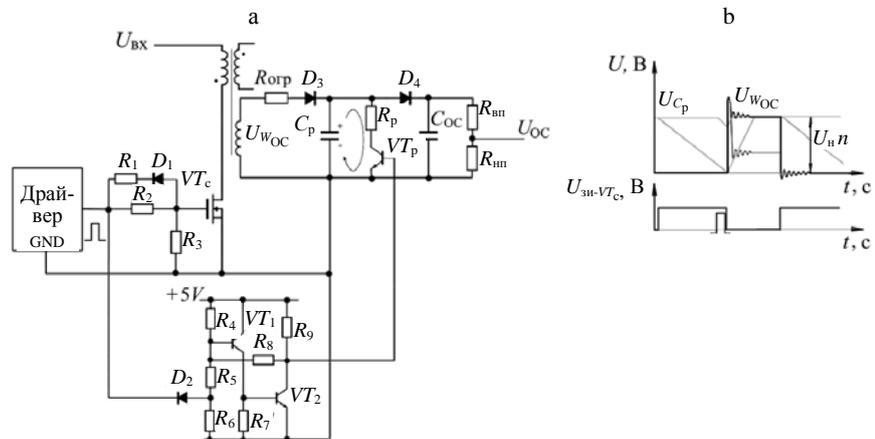


Рис. 2. Коррекция высокочастотного выброса: а – схема; б – принцип работы

Fig. 2. High-frequency voltage peak correction: a – correction circuit; b – principle of its operation

С учетом схемы коррекции выброса полная структурная схема источника питания с одним основным и одним резервным контурами ОС по напряжению примет вид согласно рис. 3, где 1 – силовая часть ИВЭП на основе обратногоходовой топологии; 2 – дополнительная обмотка ОС силового трансформатора; 3 – схема коррекции высокочастотного выброса

с трансформатора; 4 – усилитель ошибки сигнала ОС со своим порогом срабатывания; 5 – развязка контуров ОС, не допускающая их одновременной совместной работы; 6 – ШИМ-компаратор, формирующий импульсы управления силовым транзистором; 7 – резистивный делитель напряжения нагрузки и усилитель ошибки на микросхеме TL431 (или ее аналогах); 8 – оптрон и низкочастотный фильтр для сглаживания сигнала ОС; d – коэффициент заполнения импульсов управления силовым транзисторным ключом; U_n – напряжение на нагрузке.

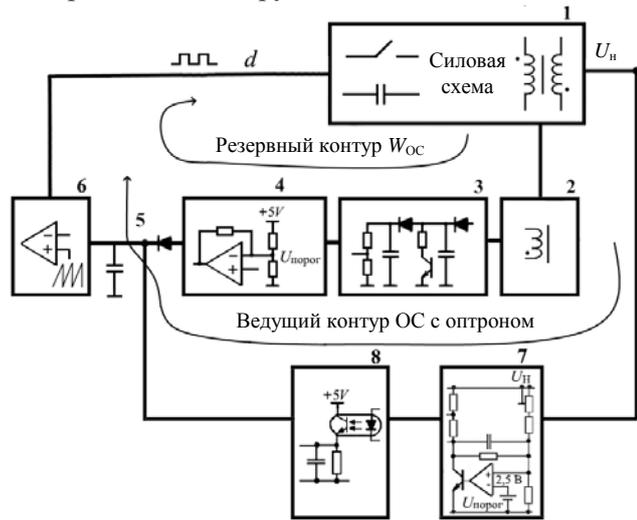


Рис. 3. Структурная схема ведущего и резервного контуров обратной связи

Fig. 3. Block diagram of the primary and reserve feedback loops

Порог срабатывания контура ОС с оптроном определяется внутренним источником опорного напряжения микросхемы TL431 (2,5 В), ниже которого не будет происходить зажигание светодиода оптрона. Порог срабатывания контура ОС с дополнительной обмотки силового трансформатора определяется опорным напряжением $U_{\text{порог}}$ усилителя ошибки.

Экспериментальная модель

Имитационная компьютерная модель в MatLab-Simulink предлагаемого обратноходового преобразователя с резервированием цепи ОС по напряжению представлена на рис. 4.

Функциональные блоки модели: 1 – силовая часть ИВЭП, построенная на основе обратноходовой схемы; R_{snub} , D_{snub} , C_{snub} – снабберная цепочка; R_e , L_{leak} , C_{tr} – паразитные элементы; 2 – блок сброса/наброса нагрузки; 3 – цепь ОС по напряжению с обмотки силового трансформатора (драйвер и цепочка согласования уровней напряжения из диода D_2 и транзисторов VT_1 , VT_2 , приведенные на рис. 2, в имитационной модели для простоты опущены); 4 – цепь ОС по напряжению с оптрона; 5 – блок имитации потери сигнала ОС с оптрона, разрывающий сигнальную цепь; 6 – генератор линейно изменяющегося напряжения для ШИМ-компаратора в диапазоне 0–3 В; max – блок, имитирующий развязку контуров ОС через развязывающий диод; PWM comparator – ШИМ-компаратор.

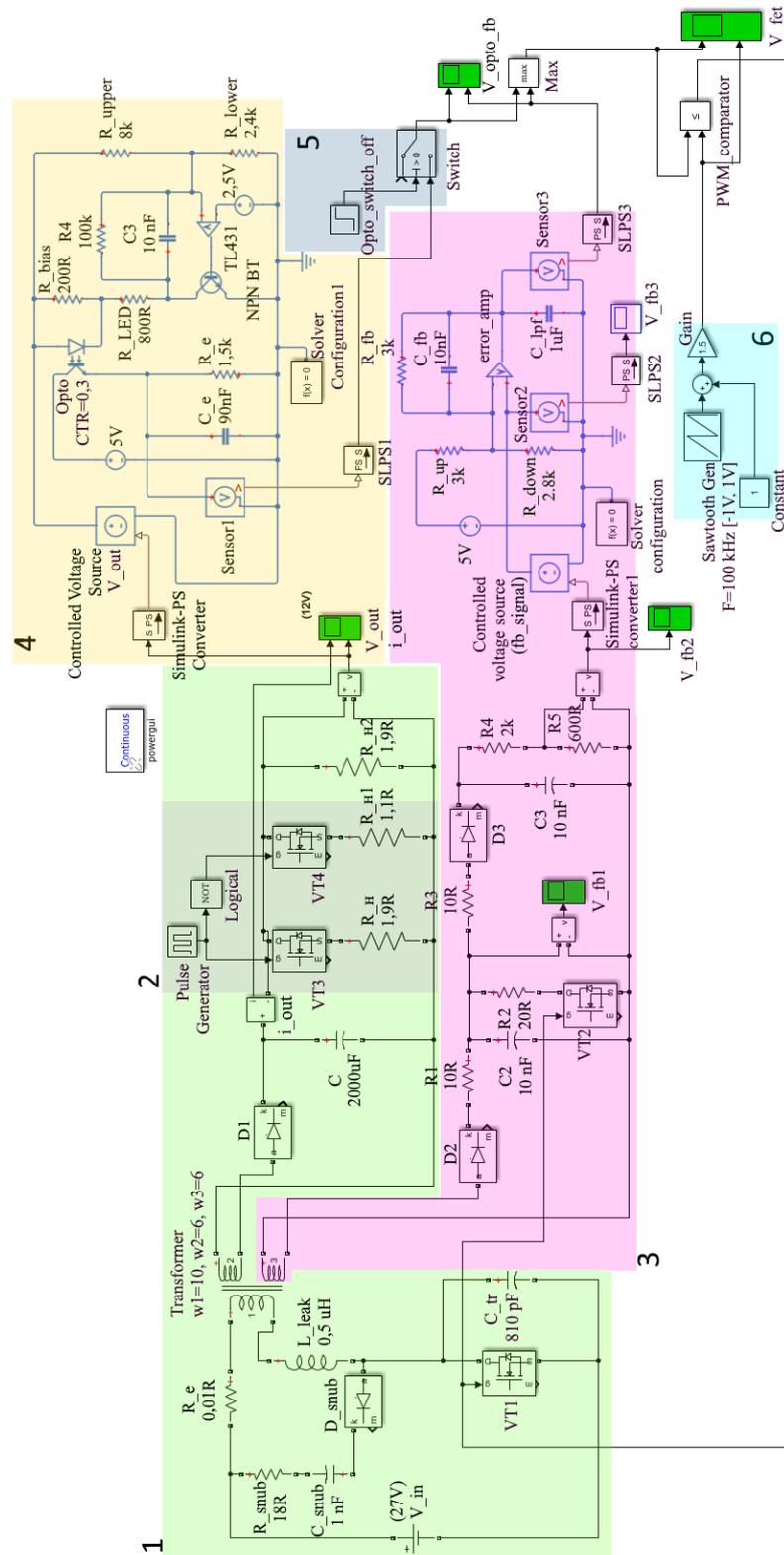


Рис. 4. Имитационная компьютерная модель обратноходового преобразователя с двумя контурами обратной связи по напряжению

Fig. 4. Simulation computer model of the flyback converter with two voltage feedback loops

Входное напряжение питания $V_{in} = 27$ В, выходное напряжение $V_{out} = 12$ В, мощность нагрузки $R_n = (75-150)$ Вт. Для связи элементов библиотеки Simscape с Simulink используются Simulink-PS Converter и PS-Simulink Converter, а также управляемые источники напряжения Controlled Voltage Source, выходное напряжение которых в точности повторяет управляющее входное напряжение. Датчиками напряжения являются элементы Sensor. Схема работает на частоте $f = 100$ кГц, задаваемой генератором пилообразных импульсов Sawtooth Gen.

Результаты исследования и обсуждение

Имитация потери сигнала ОС с оптрона $U_{ОСоптр}$ представлена на рис. 5а. В момент $t = 0,02$ с сигнал ОС пропадает. За этим следует непродолжительное (менее 0,1 мс) бесконтрольное увеличение напряжения U_n и тока I_n нагрузки (рис. 5с, d). Однако после прохождения напряжением U_n некоторого заданного порога контур ОС с дополнительной обмотки силового трансформатора принимает управление на себя. Появляется сигнал ОС с обмотки трансформатора $U_{ОСтрансф}$ (рис. 5b), вновь стабилизирующий напряжение нагрузки.

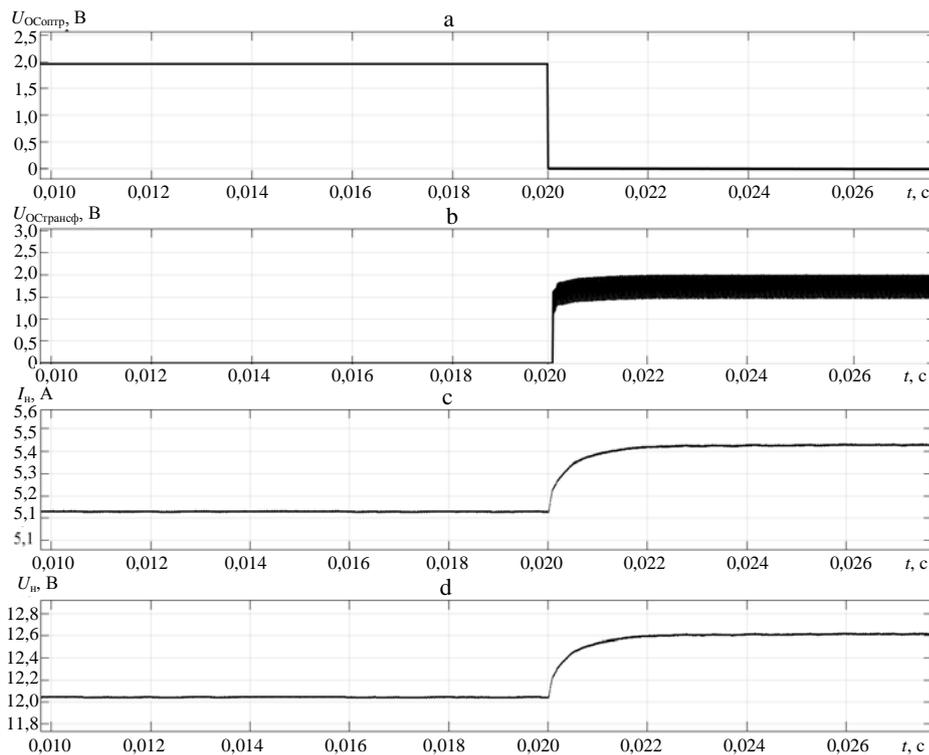


Рис. 5. Результаты моделирования: а – сигнал обратной связи с оптрона; б – сигнал обратной связи с обмотки трансформатора после усилителя ошибки со своим порогом срабатывания; в – ток нагрузки; г – напряжение нагрузки

Fig. 5. Simulation results: a – voltage feedback signal from the optocoupler; b – voltage feedback signal from the transformer winding after the error amplifier with input voltage threshold; c – load current; d – load voltage

Полученные результаты в полной мере подтверждают предлагаемый способ резервирования сигналов ОС. В отличие от общеизвестных вариантов совмещения в одном источнике обратных связей по току и напряжению, данный способ организует совместную работу обратных связей только по одному параметру – напряжению нагрузки. При правильной настройке схемы, заключающейся в задании разных порогов срабатывания контуров, сигналы ОС не препятствуют работе друг друга и соответствуют принципу «ведущий – резервный».

Резервирование сигналов ОС по напряжению при условии, что они получены независимо с разных участков силовой схемы, позволяет повысить надежность вторичных источников питания. В источниках, построенных по обратноходовой топологии, эта возможность легко реализуема. Необходимо лишь добиться стабильного, качественного сигнала ОС с дополнительной обмотки силового трансформатора, сократив высокочастотные выбросы напряжения. Этот факт можно рассматривать как дополнительное преимущество обратноходовой топологии перед другими известными схемами преобразователей.

ВЫВОДЫ

1. В источниках вторичного электропитания из-за деградации электронных компонентов со временем может происходить потеря сигнала обратной связи. Резервирование сигналов обратной связи является дополнительным способом увеличения надежности системы, гарантирующим стабильное напряжение питания потребителям.

2. Предложен способ резервирования сигналов обратной связи по напряжению, реализованный на базе источника, выполненного по обратноходовой топологии. Сигналы обратной связи снимаются с оптрона и дополнительной обмотки силового трансформатора. Разработана имитационная компьютерная модель в программе MatLab-Simulink, демонстрирующая принцип работы схемы.

3. Главная задача при резервировании сигнала обратной связи – сокращение высокочастотного выброса на обмотке обратной связи трансформатора, вносящего ошибку в полезную составляющую сигнала и делающего его непропорциональным выходному напряжению источника. Для ее решения следует максимально уменьшить индуктивность рассеяния трансформатора или применить схемотехнические решения, компенсирующие величину ошибки.

4. Полученные экспериментальные результаты могут использоваться при проектировании отказоустойчивых вторичных источников питания, работающих в жестких условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович, Б. Н. Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности / Б. Н. Абрамович // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 31–40.
2. Повышение энергоэффективности электротехнических комплексов когенерационных установок для электроснабжения объектов нефтегазовых предприятий / И. А. Богда-

- нов [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. Т. 66, № 12. С. 59–63.
3. Источник питания для исследования импульсных электрохимических процессов / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 246–257. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-246-257>.
 4. Бажин, В. Ю. Диагностика технологического процесса мощных алюминиевых электролизеров с помощью прикладных программ / В. Ю. Бажин, П. А. Петров // Записки Горного института. 2011. Т. 192. С. 140–144.
 5. Жежеленко, И. В. Основные направления повышения эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии / И. В. Жежеленко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 28–35. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35>.
 6. Hwu, K. I. Applying Module-Link Method to Multiple Power Supplies Paralleled / K. I. Hwu, J. Shieh // IEEE IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, 2017. P. 901–903.
 7. Stability Analysis of Identical Paralleled DC-DC Converters with Average Current Sharing / P. Cheng [et al.] // 2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (APEEC). Chengdu, 2019. P. 60–64.
 8. Stability Constrained Efficiency Optimization for Droop Controlled DC-DC Conversion System / L. Meng [et al.] // IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, 2013. P. 7222–7227.
 9. Sun, B. How to Parallel Two DC/DC Converters with Digital Controllers / B. Sun, I. Bower // Analog Design Journal. 2018. Iss. 3Q. P. 1–5.
 10. You, J. Loop-Sharing Method Based Current Sharing Controller Design for Parallel DC/DC Converters / J. You, M. Vilathgamuwa, N. Ghasemi // IET Power Electronics. 2018. Vol. 12, Iss. 11. P. 1937–1945.
 11. Datasheet. TPS2475x 12-A eFuse Circuit Protector with Current Monitor TPS24750, TPS24751 // Texas Instruments Inc. 2018. P. 1–39.
 12. Ridley, R. Results of a Power Supply Failure Survey / R. Ridley // Power Systems Design. 2014. P. 1–4.
 13. Panov, Y. Small-Signal Analysis and Control Design of Isolated Power Supplies with Optocoupler Feedback / Y. Panov, M. Jovanovic // IEEE Transactions on Power Electronics. 2005. Vol. 20, Iss. 4. P. 823–832.
 14. El-Hageen, H. Modeling the Performance Characteristics of Optocoupler under Irradiated Fields / H. El-Hageen // Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design. 2019. Vol. 8, Iss. 3. P. 33–39.
 15. Oscillation Effect of Auxiliary Winding in Primary Side Regulated Flyback Converter / T. Zhang [et al.] // IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. 2016. Vol. 11, Iss. 5. P. 640–647.
 16. Савин, М. Расчет и конструирование планарного трансформатора для обратноходового преобразователя / М. Савин, С. Абрамов // Электроника: наука, технология, бизнес. 2019. № 8. С. 40–44.

Поступила 29.03.2021 Подписана в печать 01.06.2021 Опубликована онлайн 30.09.2021

REFERENCES

1. Abramovich B. N. (2018) Uninterrupted Power Supply System for Mining Industry Enterprises. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*, 229, 31–40. <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.31> (in Russian).
2. Bogdanov I. A., Veprikov A. A., Kasyanova A. N., Morenov V. A. (2017) Increase of Energy Efficiency of Electrotechnical Complexes of Cogeneration Plants for Power Supply of Objects of Oil and Gas Enterprises. *Mezhdunarodnyi Nauchno-Issledovatel'skii Zhurnal = International Research Journal*, 66 (12), 59–63. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.144> (in Russian).

3. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E., Soroka E. V., Budnitskiy A. S. (2018) Power Supply for the Investigation of Pulse Electrochemical Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 246–257. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-246-257> (in Russian).
4. Bazhin V. Y., Petrov P. A. (2011). Diagnostics of Technological Process of Powerful Aluminium Pots by Means of Special Programs. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*, 192, 140–144 (in Russian).
5. Zhezhelenko I. V. (2018) The Main Directions of Improving the Efficiency of Production, Transmission and Distribution of Electrical Energy. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 28–35. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35> (in Russian).
6. Hwu K. I., Shieh J. (2017) Applying Module-Link Method to Multiple Power Supplies Paralleled. *IEEE IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Beijing. 901–903. <https://doi.org/10.1109/iecon.2017.8216155>.
7. Cheng P., Ding G., Song C., Chai H., Xu G. (2019) Stability Analysis of Identical Paralleled DC-DC Converters with Average Current Sharing. *2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (APEEC)*. Chengdu. 60–64. <https://doi.org/10.1109/apeec.2019.8720726>.
8. Meng L., Dragicevic T., Guerrero J., Vasquez J. (2013) Stability Constrained Efficiency Optimization for Droop Controlled DC-DC Conversion System. *IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Vienna. 7222–7227. <https://doi.org/10.1109/iecon.2013.6700333>.
9. Sun B., Bower I. (2018) How to Parallel Two DC/DC Converters with Digital Controllers. *Analog Design Journal*, (3Q), 1–5.
10. You J., Vilathgamuwa M., Ghasemi N. (2018) Loop-Sharing Method Based Current Sharing Controller Design for Parallel DC/DC Converters. *IET Power Electronics*, 12 (11), 1937–1945. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2017.0146>.
11. Texas Instruments Inc. (2018) *Datasheet. TPS2475x 12-A eFuse Circuit Protector with Current Monitor TPS24750, TPS24751* [Electronic Resource]. Available at: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps_24751.pdf.
12. Ridley R. (2014) Results of a Power Supply Failure Survey. *Power Systems Design* [Electronic Resource]. Available at: <https://www.powersystemsdesign.com/articles/results-of-a-power-supply-failure-survey/34/6539>.
13. Panov Y., Jovanovic M. (2005) Small-Signal Analysis and Control Design of Isolated Power Supplies with Optocoupler Feedback. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20 (4), 823–832. <https://doi.org/10.1109/tpel.2005.850926>.
14. El-Hageen H. (2019) Modeling the Performance Characteristics of Optocoupler under Irradiated Fields. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 8 (3), 33–39. <https://doi.org/10.1007/s41939-019-00058-x>.
15. Zhang T., Xu M., Qian Q., Sun W., Lu S. (2016) Oscillation Effect of Auxiliary Winding in Primary Side Regulated Flyback Converter. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 11 (5), 640–647. <https://doi.org/10.1002/tee.22282>.
16. Savin M., Abramov S. (2019) Calculation and Design of a Planar Transformer for a Reverse-Flow Converter. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, (8), 40–44 (in Russian).

Received: 29 March 2021

Accepted: 1 June 2021

Published online: 30 September 2021