

2. Stepanov P.D., Farvazdinov A.F., Zotov K.N. Podavlenie signalov mobil'noy svyazi standarta GSM 900/1800 [The suppression of signals of mobile communication of standard GSM 900/1800]. *XVI MNTK «Problemy tekhniki i tekhnologii telekommunikacij»: tez. dokl.* [Problems of telecommunications engineering and technology: 16th international scientific and technical conference: proceedings], Ufa, 2015, pp. 95–99. (In Russian).
3. Romanov B.N. *Teoriya elektricheskoy svyazi. Ustroystva formirovaniya i preobrazovaniya signalov: metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam* [Theory of Telecommunication. Devices for Generating and Converting Signals: Guidelines for Laboratory Work]. Ul'yanovsk: Ul'yanovsk State Technical University, 2010, 28 p. (In Russian).
4. Zyuko A.G. et al. *Teoriya elektricheskoy svyazi* [Theory of telecommunication]. Moscow: Radio i svyaz', 1999, 432 p. (In Russian).
5. *Rekomendatsiya ITU-R V.431-7. Nomenklatura diapazonov chastot i dlin voln, ispol'zuemykh v elektrosvyazi* [Recommendation ITU-R V. 431-7. Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications]. Available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-7-200005-S!!PDF-R.pdf (accessed: 23.08.2019). (In Russian).
6. Gennadieva E.G. et al. *Kratkiy entsiklopedicheskiy slovar' po radioelektronike i radiopromышленности. Pod redaktsiyey V.N. Sablina* [A brief encyclopedic dictionary of electronics and radio industry. Ed. by V.N. Sablin]. Moscow: Divo, 2006, 276 p. (In Russian).
7. Kuznetsov I.V. et al. *Razrabotka differentsial'nogo OFDM-preobrazovaniya s koordinirovannym predskazyvaniem dlya energodefitsitnykh system svyazi* [Development of Differential OFDM-Converter with Coordinated Signal Prediction for Energy-Deficient Communication Systems]. *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2016, no. 12, pp. 59–63. (In Russian).
8. Soshnikov A., Migalyov I., Titov E. Principles of functioning of technological module for danger estimation of combined electromagnetic field. *Procedia Engineering*, 2016, no. 165, pp. 1027–1034.

Received 15.10.2019

УДК 621. 314

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ИНВЕРТОРОВ И РАВНОЗНАЧНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Осипов О.В., Гейтенко А.Е.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: oo@psuti.ru*

Электропитание телекоммуникационных систем осуществляется посредством резервируемых установок, среди которых важнейшее положение занимают инверторы и источники бесперебойного питания. Преобразователи на основе параллельно соединенных широтно-импульсных инверторов позволяют осуществить резервирование без коммутации. Для моделирования и исследований преобразователей на основе широтно-импульсных инверторов с равнозначным управлением предлагается дискретно-нелинейная модель, обладающая более высокой адекватностью в сравнении с линеаризованной. Модель позволяет повысить достоверность результатов исследований и расширить число исследуемых характеристик преобразователя. Среди важнейших результатов моделирования следует выделить влияние фазовых задержек задающего сигнала инверторов, которые приводят к неравномерному распределению их выходных токов. При этом увеличивается реактивная мощность, генерируемая инверторами, и уменьшается их энергетическая эффективность. Для снижения влияния такого внешнего воздействия предлагается увеличить обратную связь по разностному сигналу среднего значения тока инверторов и действительным значением тока каждого инвертора. Глубина обратной связи определяется допустимым для практики уровнем реактивной мощности в инверторах.

Ключевые слова: телекоммуникации, резервирование, коэффициент готовности, преобразователь напряжения, широтно-импульсная модуляция, параллельное соединение инверторов, дискретно-нелинейная модель, многоконтурная обратная связь, переменные состояния, задержка фазы, Simulink

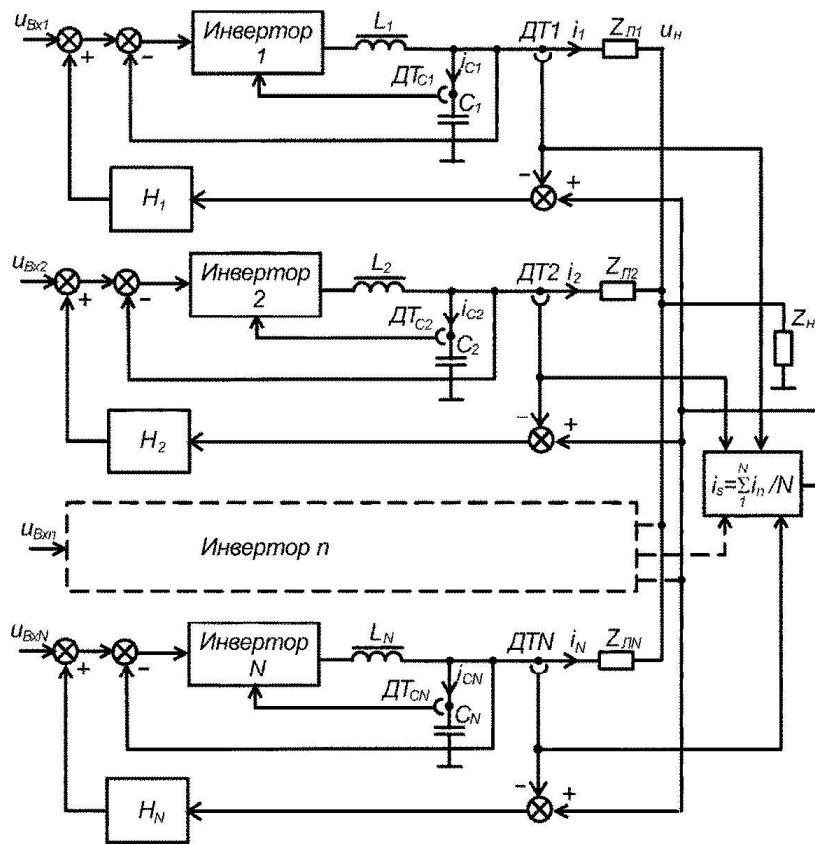


Рисунок 1. Преобразователь на основе параллельно соединенных инверторов с равнозначным управлением

Введение

Электропитание оборудования телекоммуникаций, в том числе систем и устройств телевидения, должно обладать высокими показателями надежности, которые достигаются применением источников бесперебойного питания переменного тока и инверторов [1]. Модульное исполнение устройств бесперебойного питания и параллельное соединение модулей позволяет осуществить резервирование без коммутаций и повысить надежность систем бесперебойного питания, которое можно оценить с помощью коэффициента готовности для обслуживаемых систем. Повышение коэффициента готовности осуществляется путем сокращения времени восстановления. Одновременно модульное исполнение устройств электропитания позволяет добиться нового качества – масштабирования, которое дает возможность путем подбора числа параллельных устройств получить необходимую мощность системы и степень ее резервирования.

Уравнения состояния инвертора

Для электропитания оборудования радиотехнических и телевизионных систем целесообразно применение устройств бесперебойного питания на основе преобразователей с параллельно соединенными инверторами и «равнозначным»

принципом управления, в котором выравнивание выходных токов модулей осуществляется по их среднему значению на высокой несущей частоте преобразования [2]. Равенство выходных токов является обязательным условием функционирования параллельно соединенных инверторов – преобразователей напряжения. Формирование напряжения квазисинусоидальной формы осуществляется путем широтно-импульсной модуляции второго рода на несущей частоте, значительно превышающей частоту огибающей.

На рисунке 1 приведена функциональная схема преобразователя на основе параллельно соединенных широтно-импульсных (ШИ) инверторов с равнозначным управлением.

Преобразователь содержит несколько параллельно включенных выходами и входами идентичных инверторов напряжения (инвертор 1 – инвертор N). Входные, задающие напряжения инверторов, равны: $u_{Bx1} = u_{Bx2} = \dots = u_{BxN}$. Силовая часть инверторов построена по мостовой схеме и состоит из четырех транзисторных ключей на основе полевых транзисторов и диодов рекуперации. Управление ключами осуществляется с помощью ШИ-модулятора в составе блока управления инвертора.

Обязательным узлом параллельно соединяемых инверторов (стабилизированных преоб-

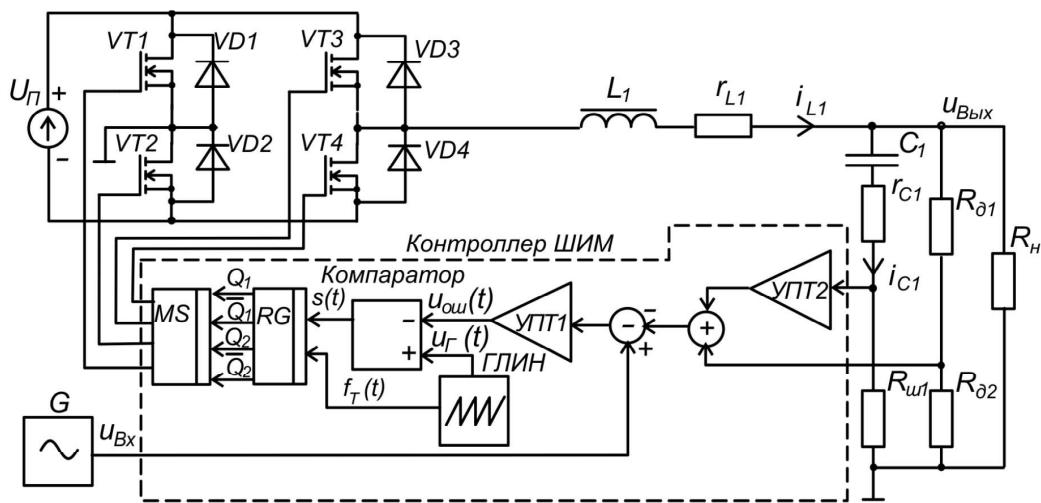


Рисунок 2. Широтно-импульсный инвертор

разователей напряжения) является система выравнивания выходных токов. С помощью такой системы (блок) $i_s = \sum_1^N i_n / N$ осуществляется суммирование выходных токов i_n всех инверторов и деление на число N инверторов. Измерение токов производится с помощью соответствующих датчиков тока ДТ1-ДТН.

В каждом инверторе осуществляется сравнение собственного выходного тока i_n и среднего значения i_s , которое является задающим по току сигналом управления. Разностный сигнал $i_s - i_n$ увеличивается, фильтруется (H_n) с целью подавления высокочастотных помех и подается на вход инвертора.

Исследования ШИ-преобразователя с равнозначным управлением можно проводить посредством линеаризации его передаточной функции [3; 4]. Для этого используется метод фазовых переменных по усредненным параметрам преобразователя. Даже при значительных упрощениях основные соотношения для выходного напряжения $u_{\text{Вых}}$ и выходных токов i_n оказываются весьма сложными для анализа.

Метод усреднения и линеаризации является приближенным методом. Линеаризация передаточной функции преобразователя не позволяет осуществить учет нелинейности ШИ-модуляции, исследование импульсных внешних деструктивных воздействий, а также отклонений внутренних параметров инверторов [3]. С целью повышения достоверности результатов исследований разработана дискретно-нелинейная модель преобразователя, обладающая более высокой адекватностью и одновременно расширяющая число исследуемых параметров. Основой преобразователя можно считать ШИ-инвертор с многоконтурной обратной связью. Структурная схема инвертора приведена на рисунке 2.

В схеме приняты следующие обозначения: MS – мультиплексор; RG – регистр; G – генератор задающего сигнала (синусоидального); $ГЛИН$ – генератор линейно изменяющегося напряжения u_Γ с периодом T_Γ ; $УПТ$ – усилитель постоянного тока; $u_{\text{Вх}}(t)$, $u_{\text{Вых}}(t)$ – входное (задающее) и выходное напряжения широтно-импульсного инвертора напряжения соответственно; r_{L1} , r_{C1} – сопротивления потерь в элементах фильтра L_1 , C_1 ; R_{d1} , R_{d2} – делитель напряжения с коэффициентом передачи $\alpha = R_{d2}/(R_{d1} + R_{d2})$ для обеспечения обратной связи по выходному напряжению; $u_{\text{Ош}}(t)$ – сигнал ошибки, равный разности задающего напряжения и суммарного напряжения обратной связи; $s(t)$ – выходной сигнал компаратора (0; 1); f_T – сигнал сброса импульсов ШИ-модулятора; $R_{шт}$ – сопротивление шунта для обеспечения обратной связи по току конденсатора фильтра C_1 . Переменные состояния силовой части инвертора: ток в индуктивности $x_1 = i_{L1}$ и напряжение на емкости $x_2 = u_{C1}$ для случая индуктивно-емкостного фильтра с учетом потерь описываются матричными уравнениями и составляются на основании законов Кирхгофа для напряжений и токов.

Переменные состояния на интервале проводимости ключей $VT3$, $VT2$ (диагонали инвертора) определяются уравнением

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1 \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}, \quad (1)$$

на интервале выключенного (закрытого) состояния ключей уравнением

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_2 \mathbf{x} + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}. \quad (2)$$

Матрицы коэффициентов переменных состояния \mathbf{A}_1 и \mathbf{A}_2 и матрицы коэффициентов вынужденного (внешнего) воздействия \mathbf{B}_1 и \mathbf{B}_2 для инвертора с однозвездным фильтром имеют вид:

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_1}(r_{L1} + \frac{R_H r_{C1}}{R_H + r_{C1}}) & -\frac{R_H}{L_1(R_H + r_{C1})} \\ \frac{R_H}{C_1(R_H + r_{C1})} & -\frac{1}{C_1(R_H + r_{C1})} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Приведенные выражения (1)–(3) для матричных коэффициентов \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_2 , \mathbf{B}_1 и \mathbf{B}_2 соответствуют режиму непрерывного (или безразрывного) тока индуктивности инвертора.

В переходных режимах (при запуске инвертора, резком уменьшении тока нагрузки), учет особенностей режима прерывистого тока индуктивности силовая часть инвертора характеризуется матричными коэффициентами \mathbf{A}_3 , \mathbf{B}_3 :

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_1(R_H + r_{C1})} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

На компаратор системы управления инвертора подаются два сигнала: сигнал ошибки $u_{\text{ош}}(t)$ и сигнал пилообразного напряжения $u_{\Gamma}(t)$.

В зависимости от их соотношения для положительных значений сигнала ошибки $u_{\text{ош}}(t) \geq 0$ на выходе компаратора формируются сигналы управления $s(t)$ генерируемием импульсов положительного, а для $u_{\text{ош}}(t) \leq 0$ отрицательного напряжения $u_{y1,y2} = 0; 1$:

$$\begin{aligned} s(t) = u_{\text{ош}}(t) - [+u_{\Gamma}(t)] = \\ = k_y u_{\text{вх}} - [\alpha k_y u_{\text{вых}}(t) + \\ + k_i i_{C1}(t)] - [+U_{\Gamma_{\max}}] \frac{t_{\text{modT}}}{T_{\Gamma}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где k_y – коэффициент усиления усилителя напряжения постоянного тока в цепи обратной связи; k_i – коэффициент усиления усилителя постоянного тока в цепи обратной связи; t_{modT} – остаток от деления длительности импульса на период модуляции $t_{\text{и}}/T_{\Gamma}$; $U_{\Gamma_{\max}}$ – размах линейно изменяющегося напряжения.

Уравнения (1)–(5) представляют собой дискретно-нелинейные уравнения модели инвертора с использованием метода переменных состояния по мгновенным значениям параметров. При применении этого метода переменных состояния на каждом шаге вычислений определяется сигнал $s(t)$ и в зависимости от его значения решаются уравнения состояния либо для цепи с открытым ключом, либо для цепи с закрытым ключом.

Дискретно-нелинейная модель преобразователя

С помощью программного модуля SimPower-Systems интерактивной среды Simulink построена дискретно-нелинейная модель преобразователя на основе параллельно соединенных инверторов с равнозначным управлением [5] (см. рисунок 3).

Задающий сигнал напряжения преобразователя поступает на вход In1 каждого из широтно-импульсных инверторов InvPWM1, InvPWM2 и InvPWM3. Общий выход инверторов подключен к блоку Load нагрузок (индуктивной, емкостной, нелинейной и других). В каждом инверторе имеется главная обратная связь по напряжению (цепь ULoad). Одновременно в инверторах содержится цепь отрицательной обратной связи по току емкости выходного фильтра (I_{c1} в первом инверторе и так далее). В преобразователе используется генератор BSG пилообразного сигнала несущей частоты (3 кГц) и генератор Gen задающего (в данном случае синусоидального) сигнала.

Для выравнивания выходных токов инверторов (ШИ-преобразователей напряжения, соединенных параллельно) используется схема, которая включает отрицательную обратную связь по току, равному разности между задающим средним значением выходного тока I_s и действительным значением тока инвертора (для первого инвертора I1). Таким образом, сигнал i_{dn} обратной связи по разностному току n -го инвертора равен

$$i_{dn} = \sum_1^N i_n / N - i_n, \quad (6)$$

где i_n – выходной ток n -го инвертора; N – число инверторов в преобразователе.

В преобразователе применяются блоки задержек Delay для моделирования деструктивных возмущений типа «фазовых отклонений» управляющих сигналов. Кривые напряжений и токов в различных точках преобразователя выводятся с помощью блоков согласования VID1 и VID2 на осциллограф Scope.

Вместе с этим на схеме не показаны измерительные устройства действующих значений выходного напряжения и токов инверторов, его коэффициента нелинейных искажений и спектра, измерители активной и реактивной мощности и сервисные устройства (генераторы, таймеры, коммутаторы), используемые для моделирования и исследования различных режимов работы преобразователя.

Методика моделирования и исследований преобразователя посредством дискретно-нели-

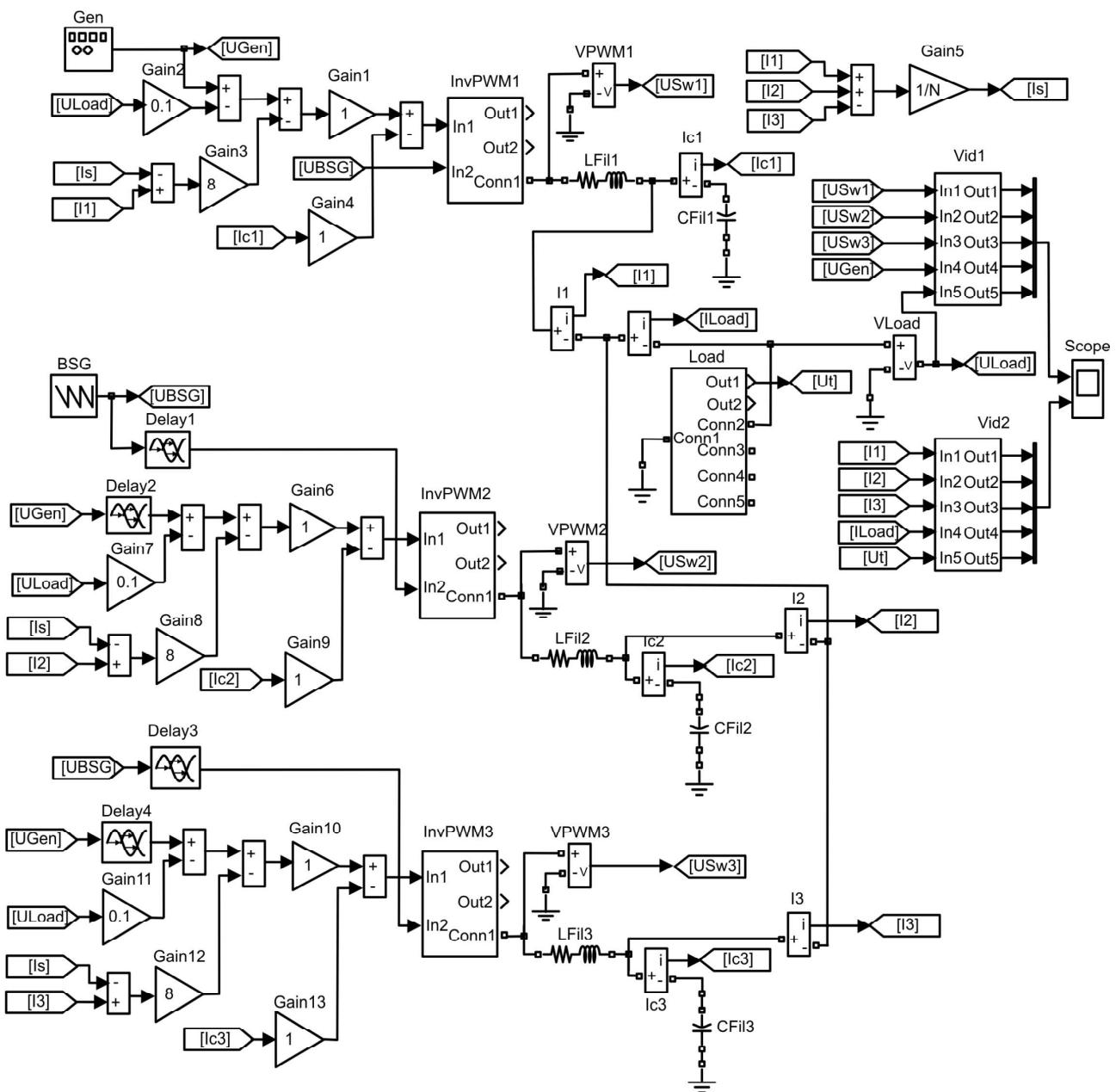


Рисунок 3. Структурная схема дискретно-нелинейной модели преобразователя с равнозначным принципом управления

нейных моделей включает три основные группы исследований [6; 7]

- исследование динамических свойств;
- исследование устойчивости к деструктивным внешним воздействиям;
- исследование устойчивости к отклонениям внутренних параметров преобразователей.

Для исследований и выявления основных свойств и закономерностей функционирования преобразователей равнозначного типа достаточно использовать модель на основе трех параллельно включенных идентичных широтно-импульсных инверторов [5; 6].

В качестве исследуемого объекта использовался преобразователь с параметрами, приведенны-

Таблица. Основные параметры преобразователя

Наименование параметра преобразователя	Значение параметра
Частота модуляции, f_Γ , Гц	3000
Индуктивность дросселя фильтра L1, Гн	0,075
Емкость фильтра C1, мкФ	10
Коэффициент передачи по напряжению прямого тракта инвертора k_{VT}	1350
Коэффициент передачи ОС по напряжению k_V	0,1
Коэффициент петлевого усиления по напряжению инвертора k_{VP}	135
Коэффициент передачи ОС по току конденсатора фильтра инвертора k_C	1
Коэффициент передачи цепи обратной связи по разностному току инвертора k_{is}	8

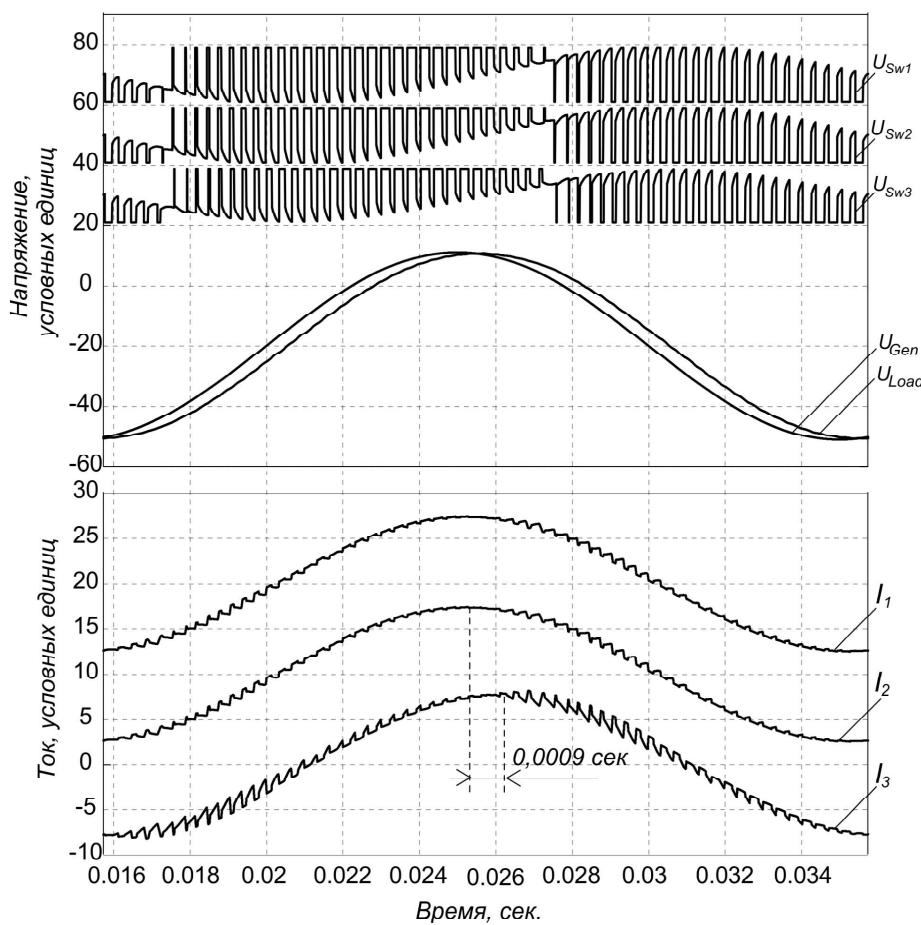


Рисунок 4. Диаграммы выходных токов инверторов преобразователя с равнозначным управлением при задержке задающего сигнала третьего инвертора

ми в таблице. Анализ результатов исследований показал, что наибольшую чувствительность выходные характеристики преобразователя имеют по отношению к фазовым отклонениям выходного тока соединенных параллельно инверторов [8]. При этом существенное значение в снижении влияния фазовых отклонений на энергетическую эффективность преобразователя имеет глубина обратной связи по разностному току $I_s - I_n$.

На рисунке 4 показаны диаграммы выходных токов инверторов преобразователя с равнозначным управлением при задержке задающего сигнала третьего инвертора $\tau_3 = 0,2$ мс (1 % от периода огибающей $T_M = 20$ мс). Здесь U_{Sw1} , U_{Sw2} и U_{Sw3} – выходные напряжения инверторов; U_{Gen} – задающее напряжение; U_{Load} – напряжение нагрузки; I_1 , I_2 и I_3 – выходные токи инверторов.

Задержка фазы выходного тока третьего инвертора существенно превышает величину задержки управляющего сигнала и составляет $\tau_{3u} = 0,9$ мс (4,5 % от периода огибающей T_M). В силу параллельного соединения инверторов задержка выходного напряжения увеличивается в меньшей степени (в данном случае до $\tau_{3u} = 0,6$ мс).

При этом реактивная мощность, вносимая третьим инвертором увеличивается и компенсируется реактивной мощностью остальных инверторов (см. рисунок 4). При уменьшении величины нагрузки указанное превышение задержки возрастает, поэтому на рисунке 4 показаны выходные процессы для резистивной нагрузки $R_H = 100$ Ом (выходная мощность преобразователя $P_{pp} = 432$ Вт). Увеличение коэффициента передачи обратной связи по разностному току значительно снижает сдвиг фазы выходного тока третьего инвертора

Заключение

Для построения сложного преобразователя на основе параллельно соединенных ШИ-инверторов необходимы подробные исследования на основе дискретно-нелинейных моделей высокой адекватности. Параллельное соединение стабилизованных инверторов – непростая задача. Поэтому результаты таких исследований позволяют выделить часто неочевидные особенности таких преобразователей и учесть их на этапе разработок. По результатам исследований разработан и запатентован новый способ управления [9].

Литература

1. ОСТ 45.183-2001 Установки электропитания аппаратуры связи стационарные. Общие технические требования. М.: ЦНТИ «Информсвязь», 2001. 28 с.
2. Sun X., Lee Y.-S., Xu D. Modeling, analysis, and implementation of parallel multi-inverter systems with instantaneous average-current-sharing scheme // IEEE Transactions on Power Electronics. 2003. Vol. 18. № 3. P. 844–856. DOI: 10.1109/TPEL.2003.810867.
3. Анализ однофазного инвертора напряжения с синусоидальной ШИМ при работе на линейную и нелинейную нагрузки / В.Ф. Дмитриков [и др.] // Труды учебных заведений связи. 2005. № 172. С. 168–179.
4. Дмитриков В.Ф., Самылин И.Н., Шушпанов Д.В. Инвертор промышленной частоты, работающий на нелинейную нагрузку // Практическая силовая электроника. 2005. Вып. 20. С. 33–34.
5. Осипов О.В., Гейтенко А.Е. Математические модели преобразователей напряжения централизованного и демократического типов //
- XV НТК «Физика и технические приложения волновых процессов»: тез. докл. Казань, 2017. Т. 4. С. 287.
6. Гейтенко А.Е. Анализ динамических свойств системы параллельно соединенных источников бесперебойного питания // Техника и технология. 2012. № 5 (52). С. 18–25.
7. Осипов О.В., Гейтенко А.Е., Гейтенко Е.Н. Исследование энергетических характеристик параллельных массивов бесперебойного питания при отклонениях параметров отдельных инверторов // ВНТК «Электропитание-2013»: тез. докл. Самара, 2013. С. 3.
8. Гейтенко А.Е., Гейтенко Е.Н. Выходные характеристики параллельной системы бесперебойного питания равнозначного типа // XIII МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов»: тез. докл. Казань, 2015. С. 234–235.
9. Патент РФ 2658621. Способ управления резервированными модулями источника бесперебойного питания / Гейтенко А.Е., Гейтенко Е.Н. Опубл. 22.06.2018. БИ №18.

Получено 01.10.2019

Осипов Олег Владимирович, д.ф-м.н., проректор по науке и инновациям Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел.+7 846 332-21-61. E-mail: o.osipov@psuti.ru

Гейтенко Александр Евгеньевич, инженер АО «ПМК-402». 443099, Российская Федерация, г. Самара, ул. Чапаевская, 114. Тел. +7 927 654-31-67. E-mail: alextaran@list.ru

THE RESEARCH OF UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLIES WITH PARALLEL CONNECTION OF INVERTERS AND EQUIVALENT CONTROL

Osipov O.V., Geitenko A.E.

*Povelzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: oo@psuti.ru*

Telecommunication systems are powered by redundant plants, among which inverters and uninterruptible power supplies occupy the most important position. Converters based on parallel-connected pulse-width inverters allow redundancy without switching. For modeling and research of converters based on pulse-width inverters with equivalent control, a discrete-nonlinear model is proposed that has a higher adequacy in comparison with the linearized one. The model allows increasing the reliability of research results and expanding the number of investigated characteristics of the converter. Among the most important simulation results, it is necessary to highlight the influence of phase delays of the driving signal from the inverters, which lead to an uneven distribution of output currents of the inverters. Thereat the reactive power generated by inverters increases, and their energy efficiency decreases. To reduce the influence of such external action, it is proposed to increase feedback on the difference signal of the average current value of inverters and the actual current value of each inverter. Feedback depth is determined by the level of reactive power acceptable in inverters in practice.

Keywords: telecommunications, redundancy, availability factor, voltage converter, pulse-width modulation, parallel connection of inverters, discrete and nonlinear model, multiple-loop feedback, state variables, phase delay, Simulink

DOI: 10.18469/ikt.2019.17.4.09

Osipov Oleg Vladimirovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Vice-Rector for Science and Innovations, Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Tel. +7 846 332-21-61. E-mail: o.osipov@psuti.ru

Geitenko Alexander Evgenievich, JSC «PMK-402», 114, Chapaevskaya Street, Samara, 443099, Russian Federation; Engineer. Tel. +7 927 654-31-67. E-mail: alextaran@list.ru

References

1. OST 45.183-2001 *Ustanovki elektropitaniya apparatury svyazi stacionarnye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [Stationary Power Supply Installations for Communication Equipment. General Technical Requirements]. M.: CNTI «Informsvyaz», 2001, 28 p.
2. Sun X., Lee Y.-S., Xu D. Modeling, analysis, and implementation of parallel multi-inverter systems with instantaneous average-current-sharing scheme. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, vol. 18, no. 3, pp. 844–856. DOI: 10.1109/TPEL.2003.810867.
3. Dmitrikov V.F. et al. Analiz odnofaznogo invertora napryazheniya s sinusoidal'noj SHIM pri rabote na linejnuyu i nelinejnuyu nagruzki [Analysis of a single-phase voltage inverter with a sinusoidal PWM when working on linear and nonlinear loads]. *Trudy uchebnyh zavedenij svyazi* [Transactions of Educational Institutions of Communication], 2005, no. 172, pp. 168–179.
4. Dmitrikov V.F., Samylin I.N., Shushpanov D.V. Invertor promyshlennoj chastoty, rabotayushchij na nelinejnuyu nagruzku [Industrial frequency inverter operating on a non-linear load]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical Power Electronics], 2005, vol. 20, pp. 33–34.
5. Osipov O.V., Gejtenko A.E. Matematicheskie modeli preobrazovatelej napryazheniya centralizovannogo i demokraticheskogo tipov [Mathematical models of voltage converters of centralized and democratic types]. *XV NTK «Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovyh processov»: tez. dokl.* [XV NTK «Physics and technical applications of wave processes»: proc.], Kazan', 2017, vol. 4, pp. 287.
6. Gejtenko A.E. Analiz dinamicheskikh svojstv sistemy parallel'no soedinennyh istochnikov besperbojnogo pitaniya [Analysis of the dynamic properties of a system of parallel-connected uninterruptible power supplies]. *Tekhnika i tekhnologiya* [Technique and Technology], 2012, no. 5 (52), pp. 18–25.
7. Osipov O.V., Gejtenko, A.E., Gejtenko E.N. Issledovanie energeticheskikh harakteristik parallel'nyh massivov besperebojnogo pitaniya pri otkloneniyah parametrov otdel'nyh invertorov [Investigation of the energy characteristics of parallel uninterruptible power supply arrays with deviations of the parameters of individual inverters]. *VNTK «Elektropitanie-2013»: tez. dokl.* [VNTK «Power Supply-2013»: proc.], Samara, 2013, p. 3.
8. Gejtenko A.E., Gejtenko E.N. Vyhodnye harakteristiki parallel'noj sistemy besperebojnogo pitaniya ravnoznachnogo tipa [Output characteristics of a parallel uninterruptible power supply system of equivalent type]. *XIII MNTK «Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovyh processov»: tez. dokl.* [XIII ISTC «Physics and technical applications of wave processes»: proc.], Kazan', 2015, pp. 234–235.
9. Patent RF 2658621. *Sposob upravleniya rezervirovannymi modulyami istochnika besperebojnogo pitaniya* [A Method for Controlling Redundant Uninterruptible Power Supply Modules]. Gejtenko A.E., Gejtenko E.N. Opubl. 22.06.2018. BI №18.

Received 01.10.2019