УДК 621.314.1

С.В. Классен, Т.С. Классен, С.В. Луфт, С.А. Харитонов, А.Г. Волков

Использование цифрового интерфейса связи CAN для обеспечения параллельной работы преобразователей

Рассмотрен вариант использования цифрового интерфейса связи CAN в рамках метода «ведущий–ведомые» для обеспечения равномерного распределения мощности между модулями, включенными параллельно на общую нагрузку. Собственный ток преобразователя зашифровывается в идентификатор посылки, проходящей процедуру арбитража доступа устройства к сети, в результате которой на шине остается посылка, содержащая данные о максимальном токе преобразователей. Доказана устойчивость системы, состоящей из десяти преобразователей, а также проведены эксперименты с имитационной моделью и физическим макетом. Проведенные эксперименты подтверждают устойчивость системы и работоспособность рассмотренного способа выбора ведущего преобразователя с помощью использования арбитража доступа к сети, характерного для интерфейса связи CAN.

Ключевые слова: цифровой интерфейс связи, параллельная работа, устойчивость, модульность.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-102-108

Одним из наиболее перспективных способов реализации систем со средними и большими мощностями является параллельное включение преобразователей на общую нагрузку. Использование параллельных систем позволяет снизить стоимость и уменьшить размеры составляющих системы электропитания, увеличить ее надежность при использовании системы резервирования $N+1$. Модульность позволяет обеспечить простоту обслуживания, удобство сборки и широкий выбор выходных параметров системы электропитания.

Основная проблема при параллельной работе преобразователей заключается в обеспечении равномерного распределения потребляемой нагрузкой мощности между преобразователями, т.к. при параллельном включении преобразователей, являющихся стабилизаторами напряжения, практически всегда наблюдается эффект «перетягивания тока» одной из ячеек. Результатом неравномерности распределения нагрузки может стать перегрев и выход из строя одного или нескольких преобразователей.

Все способы обеспечения равномерного распределения мощности можно разделить на пассивные и активные. При использовании пассивных способов распределение мощности достигается за счет формирования «мягкой» (наклонной) выходной характеристики преобразователей на основе информации только о собственном токе [1–7]. Основное преимущество систем данного вида – простота реализации, а существенный недостаток – неточное распределение токов между параллельными модулями.

Отличительной особенностью систем активного распределения мощности является обмен информацией о собственных токах между параллельными модулями. На основе данной информации вычисляется ток, который в дальнейшем используется каждым модулем в качестве сигнала задания на собственный ток. Существует два основных подхода к вычислению сигнала задания. Первый подход предполагает усреднение собственных токов по количеству параллельных модулей, усредненный ток явля-

ется сигналом задания для каждого модуля [8–13]. Главным недостатком такого подхода является необходимость отслеживать количество работающих преобразователей, а также одновременно иметь информацию о токе всех преобразователей. Вторым подход в литературе называют методом «ведущий–ведомые». В рамках данного метода в качестве сигнала задания на ток выбирается ток одного из модулей, выбранный модуль становится ведущим, а остальные – ведомыми. Ведущий преобразователь может быть выбран заранее и не меняться в процессе работы [14, 15]. Также в качестве ведущего преобразователя может быть выбран модуль, обладающий наибольшим собственным током [16–18], при этом если ведущий преобразователь выходит из строя, выбирается новый ведущий и работа системы продолжается.

В данной работе способ обеспечения параллельной работы преобразователей, основанный на методе «ведущий–ведомые», применяется к системе, состоящей из десяти параллельных модулей. Синтез системы управления для каждого преобразователя был описан в предыдущей работе [19]. Целью данной работы является проверка устойчивости параллельной системы, а также ее работоспособности и эффективности при имитационном моделировании и на физическом макете. Для проверки устойчивости системы воспользуемся методом анализа устойчивости каскадно-включенных систем с помощью передаточной функции, характеризующей взаимное влияние N -параллельно работающих источников и потребителя. На физическом макете для реализации обмена информацией между модулями будет использоваться цифровой интерфейс связи CAN, с помощью которого осуществляется выбор ведущего преобразователя непосредственно на шине. Благодаря этому нет необходимости использовать централизованный контроллер, управляющий всеми модулями; каждый модуль может работать и как отдельный преобразователь, и в составе параллельной системы без внесения изменений в систему управления. По-

мимо этого, предлагаемая система обладает хорошей отказоустойчивостью – если ведущий модуль выйдет из строя, из работающих преобразователей выберется новый ведущий и система продолжит работать.

Устойчивость параллельной системы

Чтобы убедиться в том, что предлагаемая в [19] параллельная система, расширенная до десяти модулей, устойчива, воспользуемся методом анализа устойчивости каскадно-включенных систем с помощью передаточной функции, характеризующей взаимное влияние N параллельно работающих источников и потребителя, как описано в [18, 20]. В рамках данного метода для проверки устойчивости анализируется передаточная функция

$$T_m(s) = Y_c(s) \cdot Z_H(s). \quad (1)$$

В (1) Z_H – сопротивление нагрузки, в нашем случае $Z_H = R_H$, Y_c – общая выходная проводимость параллельной системы, которая определяется как сумма выходных проводимостей отдельных преобразователей при замкнутых контурах регулирования: $Y_c = Y_{ип1}^{зам} + Y_{ип2}^{зам} + \dots + Y_{ипi}^{зам}$.

На рис. 1 изображена структурная схема двух преобразователей, включенных параллельно, на которой $Y_{ип1}$ и $Y_{ип2}$ – проводимости отдельных преобразователей при разомкнутых контурах регулирования. Выходная проводимость при разомкнутых контурах регулирования – это величина, обратная выходному сопротивлению при разомкнутых контурах:

$$Y_{ип} = \frac{1}{Z_{вых_ип}}.$$

Рис. 1. Структурная схема преобразователей, включенных параллельно

Выходное сопротивление преобразователя с учетом паразитных параметров при разомкнутых контурах регулирования было найдено с помощью малосигнальной модели преобразователя [21]

$$Z_{вых_ип} = \frac{sL + (R_L + R_{vt}D + R_{vd}(1-D))}{s^2LC + sC(R_L + R_{vt}D + R_{vd}(1-D)) + 1},$$

где L и R_L – индуктивность и активное сопротивление дросселя, R_{vt} – сопротивление транзистора в открытом состоянии, R_{vd} – сопротивление диода в открытом состоянии, C – емкость выходного конденсатора, D – коэффициент заполнения.

Далее необходимо определить выходную проводимость отдельных преобразователей при замкнутых контурах регулирования. Для выбранного способа управления необходимо рассмотреть два слу-

чая – для ведущего и для ведомого преобразователей отдельно. Такая необходимость возникает, так как у ведущего преобразователя, в отличие от ведомого, не работает контур по распределению тока.

Пусть импульсный преобразователь 1 на рис. 1 в какой-то период времени является ведущим, а преобразователь 2 – ведомым. Проводимости при разомкнутых и замкнутых контурах регулирования для ведущего преобразователя связаны следующим образом [18]:

$$Y_{ип1}^{зам}(s) = Y_{ип1}(s) \cdot (1 + T_u(s)), \quad (2)$$

где $T_u(s)$ – это передаточная функция скомпенсированного контура по напряжению.

Связь проводимостей при разомкнутых и замкнутых контурах регулирования для ведомого преобразователя [17]:

$$Y_{ип2}^{зам}(s) = \frac{Y_{ип2}(s) \cdot (1 + T_u(s)) + Y_{ип1}^{зам}(s) \cdot T_{cs}(s)}{1 + T_{cs}(s)}. \quad (3)$$

Проанализируем (3). В пределах полосы пропускания контура распределения тока передаточная функция скомпенсированного контура распределения тока $T_{cs}(s) \gg 1$. Тогда (3) можно преобразовать к виду

$$Y_{ип2}^{зам}(s) = \frac{Y_{ип1}^{зам}(s) \cdot T_{cs}(s)}{T_{cs}(s)} = Y_{ип1}^{зам}(s).$$

За пределами полосы пропускания (3) принимает вид

$$Y_{ип2}^{зам}(s) = \frac{Y_{ип2}(s) \cdot (1 + T_u(s))}{1} = Y_{ип2}(s) \cdot (1 + T_u(s)).$$

По результатам анализа (2) и (3) видно, что при замкнутых контурах регулирования в пределах полосы пропускания контура по распределению тока ЛАЧХ проводимостей ведущего и ведомых преобразователей близки друг к другу. Исходя из этого, можем принять, что

$$Y_{ип1}^{зам}(s) = Y_{ип2}^{зам}(s) = Y_{ип}^{зам}(s).$$

Тогда общая проводимость системы определяется как:

$$Y_c(s) = N_m \cdot Y_{ип}^{зам}(s),$$

где N_m – количество модулей, включенных параллельно.

Все составляющие передаточной функции (1) определены. Для проверки устойчивости параллельной системы к (1) применяется критерий Найквиста. Для того, чтобы параллельная система была устойчивой, годограф Найквиста должен охватывать точку $(-1; j0)$ в направлении против часовой стрелки столько раз, сколько положительных полюсов присутствует в (1) [18, 20]. Среди корней исследуемой передаточной функции нет положительных, значит, система, состоящая из десяти параллельных преобразователей, должна быть устойчивой.

Использование цифрового интерфейса связи CAN

Для реализации автоматического выбора ведущего преобразователя будет использоваться цифро-

вой интерфейс CAN, так как он обладает особым способом получения устройством доступа к сети, с помощью которого возможно выбрать ведущий преобразователь, т.е. преобразователь, проводящий наибольший ток непосредственно на шине.

Арбитраж доступа к сети происходит следующим образом. При свободной шине любой узел может начинать передачу в любой момент. В случае одновременной передачи информации двумя или более узлами происходит арбитраж доступа.

Для проведения арбитража каждое сообщение, называемое кадром данных, содержит свой код арбитража (идентификатор) (рис. 2). Передавая идентификатор, узел одновременно проверяет состояние шины. Если при передаче рецессивного бита (аналог – логическая «1») принимается доминантный (аналог – логический «0»), считается, что другой узел передает сообщение с большим приоритетом, и текущая передача откладывается до момента освобождения шины (рис. 3). Таким образом, доступ к шине получает устройство с наименьшим идентификатором.

Рис. 2. Структура кадра данных

Рис. 3. Процедура арбитража доступа к сети

Для реализации автоматического выбора ведущего преобразователя необходимо знать токи всех модулей и среди них выбрать наибольший. С помощью интерфейса CAN это можно реализовать следующим образом. Величина тока преобразователя инвертируется и помещается в поле идентификатора при отправке сообщения.

Сообщения от разных ячеек, содержащие идентификаторы с информацией о токе, одновременно отправляются на шину. Арбитраж выигрывает ячейка, имеющая наименьший идентификатор, т.е. наибольший ток. Ячейки, проигравшие арбитраж, больше не пытаются отправить это же сообщение. Таким образом, нет необходимости обрабатывать информацию о токах всех модулей, входящих в па-

раллельную систему, что улучшает динамику работы системы. Все ячейки считывают сообщение с шины, снова инвертируют идентификатор для получения максимального тока и используют его в качестве сигнала задания на собственные токи. При этом у ячейки, выигравшей арбитраж, разница между током задания и собственным током равна нулю. После приема сообщения с шины все ячейки снова одновременно отправляют обновленную информацию о собственном токе на шину.

Чтобы исключить коллизию на шине при возникновении ситуации, когда несколько ячеек проводят одинаковый ток, в конец идентификатора добавляется серийный номер устройства. Тогда из всех ячеек, проводящих одинаковый ток, арбитраж выигрывает ячейка с наименьшим серийным номером.

Результаты экспериментов

В предыдущей работе [19] в качестве модуля использовался понижающий преобразователь со следующими параметрами:

- Выходная мощность: $P_{\text{вых}} = 15 \text{ Вт}$.
- Выходное напряжение: $U_{\text{вых}} = 15 \text{ В}$.
- Входное напряжение: $U_{\text{вх}} = 24 \text{ В}$.
- Частота коммутации: $f_k = 100 \text{ кГц}$.
- Индуктивность демпфирующей цепи входного фильтра: $L_1 = 22 \text{ мкГн}$.
- Сопротивление демпфирующей цепи входного фильтра: $R_1 = 2,55 \text{ Ом}$.
- Индуктивность входного фильтра: $L_2 = 47 \text{ мкГн}$.
- Емкость входного фильтра: $C_1 = 40 \text{ мкФ}$.
- Индуктивность дросселя выходного фильтра: $L_3 = 330 \text{ мкГн}$.
- Емкость конденсатора выходного фильтра: $C_2 = 33 \text{ мкФ}$.

Результаты, полученные с помощью имитационного моделирования

В программном пакете Simulink была создана модель десяти параллельно работающих понижающих преобразователей. В каждой ячейке содержится силовой преобразователь, изображенный на рис. 4, и система управления, изображенная на рис. 5. Модель для понижающего преобразователя была создана с учетом паразитных параметров элементов, таких как активное сопротивление индуктивности, активные сопротивления транзистора и диода в открытом состоянии, падение напряжения на диоде в открытом состоянии. В состав преобразователя также включен входной демпфируемый фильтр для сглаживания входного тока. Цифровые задержки учитываются с помощью блока ZOH.

Для того чтобы внести неидеальность в идеальную модель параллельной системы, был введен разброс в коэффициентах передачи датчиков напряжений: у всех ячеек разный коэффициент передачи, но разница не превышает 1%.

На рис. 6 представлены эпюры выходного напряжения 1 и действующих значений токов индуктивности 2 каждого преобразователя при сбросе нагрузки 50–100–50%, полученные в результате моделирования. На представленных эпюрах шаг сетки по оси времени составляет 5 мс. Время

переходных процессов составляет 1 мс, при этом при сбросе нагрузки происходит выброс напряжения на 0,8 В, а при набросе нагрузки напряжение просаживается на 0,6 В. Токи с небольшими колебаниями

выходят на установившийся режим. Распределение токов силовых ячеек производится с точностью не менее 20% при 50% нагрузке, и с точностью не менее 10% при нагрузке, близкой к номинальной.

Рис. 4. Модель понижающего преобразователя в программном пакете Simulink

Рис. 5. Реализованная система управления

Рис. 6. Этюры выходного напряжения и токов индуктивности ячеек при сбросе-набросе нагрузки 50–100–50%, полученные в результате моделирования

Результаты, полученные на физическом макете

Для подтверждения результатов имитационного моделирования был собран физический макет, состоящий из десяти одинаковых понижающих преобразователей, включенных параллельно – от общего источника питания к общей нагрузке. Для обмена информацией ячейки объединены с помощью интерфейса CAN.

На рис. 7 и 8 представлены осциллограммы выходного напряжения и выходных токов ячеек соответственно при сбросе-набросе нагрузки 50–100–50%, полученные в результате физического эксперимента. На представленных осциллограммах шаг сетки по горизонтальной оси составляет 0,5 мс, по вертикальной оси для напряжения 1 – 5 В в клетке,

для токов 2 – 20 мВ в клетке. Время переходных процессов составляет около 1 мс. Просадка и выброс напряжения в момент изменения нагрузки составляют не более 1 В. Токи с небольшими колебаниями выходят на установившийся режим.

Рис. 7. Осциллограммы выходного напряжения 1 и выходных токов 2 при набросе нагрузки

Рис. 8. Осциллограммы выходного напряжения 1 и выходных токов 2 при сбросе нагрузки

Осциллограммы, полученные на физическом макете, соответствуют эпюрам, полученным при имитационном моделировании.

Разброс между самым большим и самым маленьким током в случае 50% нагрузки составляет 18%, а в случае 100% нагрузки – 10%.

Заключение

В данной работе проведена проверка на устойчивость параллельной системы, состоящей из десяти модулей. Также предложен способ реализации автоматического выбора ведущего преобразователя с помощью цифрового интерфейса связи CAN непосредственно на шине. Работоспособность предлагаемого способа обеспечения параллельной работы подтверждается экспериментом, проведенным в имитационной модели и на физическом макете.

Результаты экспериментов показали, что предлагаемая система управления обеспечивает распределение токов силовых ячеек с точностью не менее 20% при 50% нагрузки, а при нагрузке, близкой к номинальной, – не менее 10%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00224.

Литература

1. A classification and evaluation of paralleling methods for power supply modules / S. Luo, Z. Ye, R.L. Lin, F. Lee // IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC) Proc. – 1999. – P. 901–908.
2. Huang Y. Circuit Theoretic Classification of Parallel Connected DC-DC Converters / Y. Huang, C.K. Tse // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2007. – P. 1099–1108.
3. Glaser J.S. Output Plane Analysis of Load-Sharing in Multiple-Module Converter Systems / J.S. Glaser, A.F. Witulski // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1994. – Vol. 9, No. 1. – P. 43–50.
4. Irving B.T. Analysis, design, and performance evaluation of droop current-sharing method / B.T. Irving, M.M. Jovanovic // Proc. IEEE APEC. – 2000. – P. 235–241.
5. Panov Y. Stability and dynamic performance of current-sharing control for paralleled voltage regulator modules / Y. Panov, M. Jovanovic // IEEE Trans. on Power Electronics. – 2002. – Vol. 17, No. 2. – P. 172–179.
6. Siri K. Analysis and Evaluation of Current-Sharing Control for Parallel-Connected Dc-Dc Converters Taking into Account Cable Resistance / K. Siri, J. Banda // Record of the IEEE Aerospace Application Conference. – 1995. – P. 29–48.
7. An overview of the control scheme for distributed power systems / Z. Moussaoui, I. Batarseh, H. Lee, C. Kennedy // Southcon 96. – 1996. – P. 584–591.
8. Rinne K. A Novel Digital Single-Wire Quasi-Democratic Stress Share Scheme For Paralleled Switching Converters / K. Rinne, K. Anthony, E.O. Malley // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2010. – P. 328–335.
9. Rinne K. Masterless multirate control of parallel DC-DC converters / K. Rinne, K. Anthony, E.O. Malley // Applied Power Electronics Conference and Exposition. – 2010. – P. 2189–2193.
10. Gray M.S. Distributed, Masterless Control of Modular DC-DC Converters / M.S. Gray, Z. Gao, R.M. Button // 2nd International Energy Conversion Engineering Conference. – 2004. – P. 1–9.
11. Zhang Y. Current Sharing in Digitally Controlled Masterless Multi-Phase DC-DC Converters / Y. Zhang, R. Zane, D. Maksimovic // Power Electronics Specialists Conference. – 2005. – P. 2722–2728.
12. Borodin N.I. Optimization of the control system of parallel connected stabilized constant-voltage power supplies / N.I. Borodin, A.I. Mitryashkina // Siberian Russian Workshop and Tutorial on Electron Devices and Materials. – 2007. – P. 144–149.
13. Digital state feedback control and feed-forward compensation for a parallel module DC-DC converter using the pole placement technique / H.S. Bae, J.H. Yang, J.H. Lee, B.H. Cho // Applied Power Electronics Conference and Exposition. – 2008. – P. 1722–1727.
14. Zhang X. Digitally Controlled Distributed Multi-phase DC-DC Converters / X. Zhang, L. Corradini, D. Maksimovic // Energy Conversion Congress and Exposition. – 2009. – P. 36–42.
15. Sheng Y.O. Design and Implementation of a Four-Phase Converter with Digital Current Sharing Control for Battery Charger / Y.O. Sheng, Y.L. Liang // Telecommunications Energy Conference (INTELEC). – 2015. – P. 1–6.
16. Digital load share controller design of paralleled phase-shifted full-bridge converters referencing the highest current / H. Seong, J. Cho, G. Moon, M. Youn // Energy Conversion Congress and Exposition. – 2010. – P. 796–801.

17. Panov Y. Analysis and Design of N Paralleled DC-DC Converters with Master-Slave Current-Sharing Control / Y. Panov, J. Rajagopalan, F.C. Lee // *Applied Power Electronics Conference and Exposition*. – 1997. – P. 436–442.

18. Modeling and Dynamic Analysis of Paralleled dc-dc Converters with Master-Slave Current Sharing Control / J. Rajagopalan, K. Xing, Y. Guo, F.C. Lee, B. Manners // *Applied Power Electronics Conference and Exposition*. – 1996. – P. 678–684.

19. Луфт С.В. Синтез системы управления преобразователями, работающими параллельно на общую нагрузку / С.В. Луфт, Т.С. Классен, С.В. Классен // Труды XIV Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». – Новосибирск: НГТУ, 2018. – Т. 7. – С. 163–170.

20. A method of defining the load impedance specification for a stable distributed power system / C.M. Wildrick, F.C. Lee, B.H. Cho, B. Choi // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 1995. – P. 280–285.

21. Erickson R. Fundamentals of Power Electronics. Second Edition. – Secaucus, NJ, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000. – 877 p.

Классен Сергей Владимирович

Аспирант каф. электроники и электротехники (ЭЭ) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)

К. Маркса пр-т, 20, корп. 4,
г. Новосибирск, Россия, 630073
ORCID 0000-0002-8649-2805
Тел.: +7-913-720-08-05
Эл. почта: pismo.92@mail.ru

Классен Татьяна Сергеевна

Магистр каф. ЭЭ НГТУ
К. Маркса пр-т, 20, корп. 4,
г. Новосибирск, Россия, 630073
ORCID 0000-0003-2820-9781
Тел.: +7-913-701-80-04
Эл. почта: nebofan@mail.ru

Луфт Сергей Валерьевич

Аспирант каф. ЭЭ НГТУ
К. Маркса пр-т, 20, корп. 4,
г. Новосибирск, Россия, 630073
ORCID 0000-0002-5784-4170
Тел.: +7-923-138-21-23
Эл. почта: luft92crack@yandex.ru

Харитонов Сергей Александрович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ЭЭ,
директор Института силовой электроники (ИСЭ) НГТУ
К. Маркса пр-т, 20, корп. 4,
г. Новосибирск, Россия, 630073
ORCID 0000-0001-6483-9460
Тел.: +7-913-379-23-26
Эл. почта: Kharit1@yandex.ru

Волков Александр Геннадьевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ЭЭ НГТУ
К. Маркса пр-т, 20, корп. 4,
г. Новосибирск, Россия, 630073
ORCID 0000-0002-9518-6658
Тел.: +7-923-249-39-52
Эл. почта: _bismark_@mail.ru

Klassen S.V., Klassen T.S., Luft S.V.,
Kharitonov S.A., Volkov A.G.

Using of the Digital Communication Interface CAN to Provide Parallel Operation of Converters

This paper presents a way of using the CAN digital communication interface as part of the master-slave method to ensure a uniform power distribution between the modules connected in parallel. The converter's own current is encrypted into the message ID that goes through the arbitration procedure of the device's access to the network. As a result, the message containing the data of the maximum current of the converters remains on the bus. The stability of the system has been proven, and experiments with a simulation model and a physical prototype have been carried out. The experiment results confirm the system stability and the operability of the method considered for selecting the master converter using the arbitration procedure, which is intrinsic to the CAN communication interface.

Keywords: digital communication interface, parallel operation, stability, modularity.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-102-108

References

1. Luo S., Ye Z., Lin R.L., Lee F. A classification and evaluation of paralleling methods for power supply modules. *IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC)*, 1999, pp. 901–908.
2. Huang Y., Tse C.K. Circuit Theoretic Classification of Parallel Connected DC-DC Converters. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2007, pp. 1099–1108.
3. Glaser J.S., Witulski A.F. Output Plane Analysis of Load-Sharing in Multiple-Module Converter Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1994, vol. 9, no. 1, pp. 43–50.
4. Irving B.T., Jovanovic M.M. Analysis, design, and performance evaluation of droop current-sharing method. *IEEE APEC*, 2000, pp. 235–241.
5. Panov Y., Jovanovic M. Stability and dynamic performance of current-sharing control for paralleled voltage regulator modules. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2002, vol. 17, no. 2, pp. 172–179.
6. Siri K., Banda J. Analysis and Evaluation of Current-Sharing Control for Parallel-Connected Dc-Dc Converters Taking into Account Cable Resistance. *Record of the IEEE Aerospace Application Conference*, 1995, pp. 29–48.
7. Moussaoui Z., Batarseh I., Lee H., Kennedy C. An overview of the control scheme for distributed power systems. *Southcon 96*, 1996, pp. 584–591.
8. Rinne K., Anthony K., Malley E.O. A Novel Digital Single-Wire Quasi-Democratic Stress Share Scheme For Paralleled Switching Converters. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2010, pp. 328–335.
9. Rinne K., Anthony K., Malley E.O. Masterless multi-rate control of parallel DC-DC converters. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2010, pp. 2189–2193.
10. Gray M.S., Gao Z., Button R.M. Distributed, Masterless Control of Modular DC-DC Converters. *2nd International Energy Conversion Engineering Conference*, 2004, pp. 1–9.
11. Zhang Y., Zane R., Maksimovic D. Current Sharing in Digitally Controlled Masterless Multi-Phase DC-DC Converters. *Power Electronics Specialists Conference*, 2005, pp. 2722–2728.
12. Borodin N.I., Mitryashkina A.I. Optimization of the control system of parallel connected stabilized constant-

voltage power supplies. *Siberian Russian Workshop and Tutorial on Electron Devices and Materials*, 2007, pp. 144–149.

13. Bae H.S., Yang J.H., Lee J.H., Cho B.H. Digital state feedback control and feed-forward compensation for a parallel module DC-DC converter using the pole placement technique. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2008, pp. 1722–1727.

14. Zhang X., Corradini L., Maksimovic D. Digitally Controlled Distributed Multiphase DC-DC Converters. *Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, pp. 36–42.

15. Sheng Y.O., Liang Y.L. Design and Implementation of a Four-Phase Converter with Digital Current Sharing Control for Battery Charger. *Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 2015, pp. 1–6.

16. Seong H., Cho J., Moon G., Youn M. Digital load share controller design of paralleled phase-shifted full-bridge converters referencing the highest current. *Energy Conversion Congress and Exposition*, 2010, pp. 796–801.

17. Panov Y., Rajagopalan J., Lee F.C. Analysis and Design of N Paralleled DC-DC Converters with Master-Slave Current-Sharing Control. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1997, pp. 436–442.

18. Rajagopalan J., Xing K., Guo Y., Lee F.C., Mannens B. Modeling and Dynamic Analysis of Paralleled dc-dc Converters with Master-Slave Current Sharing Control. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1996, pp. 678–684.

19. Luft S.V., Klassen T.S., Klassen S.V. *Sintez sistemy upravleniya preobrazovatel'nykh, rabotajushimi parallel'no na obshchuyu nagruzku* [Synthesis of the control system for parallel operation of converters]. Trudy XIV mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii Aktual'nye problemy jelektronnogo priborostroenija [14th international scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE)]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2018. Vol. 7, pp. 163–170 (in Russ.).

20. Wildrick C.M., Lee F.C., Cho B.H., Choi B. A method of defining the load impedance specification for a stable distributed power system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1995, pp. 280–285.

21. Erickson R. Fundamentals of Power Electronics. Second Edition. Secaucus, NJ, USA, Kluwer Academic Publishers, 2000. 877 p.

Sergey V. Klassen

PhD student, Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University 20, K. Marks pr., bl. 4, Novosibirsk, Russia, 630073
ORCID 0000-0002-8649-2805

Phone: +7-913-720-08-05

Email: pismo.92@mail.ru

Tatiana S. Klassen

Master student, Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University 20, K. Marks pr., bl. 4, Novosibirsk, Russia, 630073
ORCID 0000-0003-2820-9781

Phone: +7-913-701-80-04

Email: nebofan@mail.ru

Sergei V. Luft

PhD student, Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University 20, K. Marks pr., bl. 4, Novosibirsk, Russia, 630073
ORCID 0000-0002-5784-4170

Phone: +7-923-138-21-23

Email: luft92crack@yandex.ru

Sergey A. Kharitonov

Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Electronics and Electrical Engineering Department, Director of Institute of Power Electronics, Novosibirsk State Technical University 20, K. Marks pr., bl. 4, Novosibirsk, Russia, 630073
ORCID 0000-0001-6483-9460

Phone: +7-913-379-23-26

Email: Kharit1@yandex.ru

Alexander G. Volkov

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor, Department of Electronics and Electrical Engineering Novosibirsk State Technical University.

20, K. Marks pr., bl. 4, Novosibirsk, Russia, 630073
ORCID 0000-0002-9518-6658

Phone: +7-923-249-39-52

Email: _bismark_@mail.ru