### УДК 621.31

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСКОНТАКТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА АВТОНОМНЫЙ ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ

В.А. Герасимов<sup>1</sup>, М.В. Красковский<sup>2</sup>, Г.Е. Кувшинов<sup>2</sup>, А.Ю. Филоженко<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет<sup>2</sup>

Рассмотрена структура системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата. Показана актуальность использования бесконтактного способа передачи электроэнергии. Отмечена особенность такого способа, связанная с применением высокочастотного трансформатора, первичная и вторичная обмотки которого разделены немагнитным зазором, обусловливающего низкий коэффициент магнитной связи и значительный ток намагничивания. Исследованы проблемы снижения выходного тока инвертора и уменьшения тепловых потерь его транзисторных ключей. Предложен способ разгрузки силовых ключей автономного инвертора напряжения за счёт включения последовательной резонансной цепи параллельно первичной обмотке трансформатора. Это решение позволило снизить ток силовых ключей инвертора примерно в три раза и при этом сохранить уровень передаваемой мощности. Представлены результаты схемотехнического моделирования и экспериментального исследования режимов работы бесконтактной системы энергообеспечения автономного подводного аппарата с применением резонансной цепи, включённой на выходе автономного инвертора. Отмечено хорошее совпадение результатов моделирования и эксперимента. Проведён анализ зависимости мощностей реактивных элементов резонансной цепи и инвертора от относительной резонансной частоты, определяемой отношением собственной частоты резонансной цепи к частоте коммутации ключей инвертора. Показан подход к формированию компромиссного решения, позволяющего определить значение относительной резонансной частоты и дать рекомендации по выбору конденсатора последовательной резонансной цепи.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Применение бесконтактного способа передачи электроэнергии на борт автономного подводного аппарата (АНПА) для зарядки его аккумуляторных батарей становится особенно актуальным при необходимости осуществления этой операции в подводном положении [1].

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: +7 (902) 522-38-24. E-mail: gerasimov@ marine.febras.ru.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Тел.: +7 (950) 293-71-11. E-mail: mikhail 51289 @yandex.ru.



Рис. 1. Функциональная схема системы энергообеспечения АНПА бесконтактным способом

Типовая структура системы бесконтактного заряда аккумуляторных батарей АНПА, показанная на рис. 1, представлена следующими элементами: аккумуляторная батарея (АБ), автоматическое зарядное устройство (АЗУ), высокочастотный трансформатор (ВчТ) с разделёнными первичной (ВчТ1) и вторичной (ВчТ2) обмотками и автономный инвертор напряжения (АИН).

Такая система энергоснабжения позволяет в автоматическом режиме заряжать аккумуляторные батареи АНПА под водой без подъёма аппарата на борт суднаносителя. Кроме того, при бесконтактном способе передачи энергии возможно использование АНПА в режиме его длительного подводного базирования с зарядкой АБ от доковой станции [2, 3].

Для осуществления максимальной передачи электроэнергии первичная и вторичная части трансформатора должны находиться на одной оси и располагаться на минимальном расстоянии друг относительно друга [4]. Смещение между частями трансформатора, которое может произойти при их стыковке, снизит эффективность процесса передачи, что, в свою очередь, приведёт к увеличению времени заряда аккумуляторных батарей аппарата. Принципиальная работоспособность самого процесса при этом сохранится, если напряжение на вторичной стороне трансформатора превышает напряжение аккумуляторных батарей.

Представление о соотношениях габаритов элементов системы и значения передаваемой мощности дает рис. 2, где показан один из вариантов конструктивного исполнения ВчТ и прочного контейнера с автономным инвертором напряжения. При диаметре корпусов частей трансформатора 100 мм и габаритах контейнера АИН 500×150 мм, передаваемая мощность достигает порядка 0,5 кВт. Увеличение мошности легко обеспечивается увеличением числа ВчТ, обмотки которых включаются последовательно или параллельно в зависимости от заданных электрических параметров передаваемой электроэнергии. При этом габариты АИН могут остаться неизменными или возрасти незначительно.



Рис. 2. Элементы системы бесконтактного заряда: а – высокочастотный трансформатор; б – герметичный контейнер

При передаче электроэнергии ток первичной обмотки трансформатора, а значит, и ток инвертора повышен за счёт наличия в трансформаторе немагнитного зазора, определяемого толщиной контактных стенок этого устройства. Существуют способы разгрузки силовых ключей АИН за счет применения резонансных цепей. Представляет интерес оценка эффективности использования резонансных явлений для решения задачи токовой разгрузки ключей инвертора, которая должна выполняться путем исследования режимов работы АИН совместно с резонансной цепью.

## Автономный инвертор напряжения с резонансной цепью

Автономный инвертор напряжения преобразует напряжение постоянного тока в выходное напряжение переменного тока, которое имеет прямоугольную форму и подводится к первичной обмотке трансформатора. При проектировании инвертора важной задачей является обеспечение его зашиты от перенапряжений, уровень которых зависит от паразитных индуктивностей монтажа и частоты переключений. Определение типа снабберных цепей и их параметров также является неотъемлемой частью проектировки АИН [5]. Для управления электронными ключами (транзисторами) инвертора применяются драйверы. Во избежание прохождения сквозного тока через одну из стоек моста драйвер управления должен формировать необходимый интервал, известный как «мёртвое время». Способы гальванической развязки драйвера и ключа инвертора могут быть различными. Это, например, может быть бутстрепная схема или оптическое разделение изолированных каналов для верхнего и нижнего плеча каждой стойки инвертора. Общее требование, предъявляемое к любому из этих способов, заключается в обеспечении смещения уровня управления верхними ключами стоек моста. Структурная электрическая схема системы бесконтактной передачи электроэнергии на АНПА представлена на рис. 3.

Одним из возможных вариантов энергоснабжения АИН может быть сеть доковой станции. От этой сети питание поступает на первичный преобразователь напряжения (ППН), который формирует необходимое напряжение на входе АИН. Конденсатор С<sub>пи</sub>, подключённый параллельно входным зажимам АИН, необходим для сглаживания коммутационных выбросов и защиты инвертора от перенапряжений. На выходе инвертора подключен трансформатор с разделёнными первичной (ВчТ1) и вторичной (ВчТ1) частями. К вторичной обмотке трансформатора ВчТ2 подключено автоматическое зарядное устройство (АЗУ), которое обеспечивает заряд аккумуляторной батареи (АБ). При этом, как следует из рис. 3, преобразователь напряжения, инвертор и первичная часть ВчТ1 расположены на доковой станции, а вторичная часть ВчТ2, зарядное устройство и аккумуляторная батарея - на ΑΗΠΑ.

Как было отмечено, в рабочем режиме для обеспечения максимальной передачи электроэнергии бесконтактным способом необходимо расположить первичную и вторичную части трансформатора на одной оси и на минимальном расстоянии друг относительно друга, что соответствует максимальному значению коэффициента k магнитной связи между обмотками трансформатора. Этот коэффициент определяется выражением

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},\tag{1}$$

где M – взаимная индуктивность между первичной и вторичной обмотками трансформатора,  $L_1$  и  $L_2$  – собственные индуктивности первичной и вторичной обмоток.

Если пренебречь падениями напряжений в транзисторах и диодах инвертора, то форма и амплитудные значения токов первичной и вторичной обмоток трансформатора определятся формой выходного напряжения инвертора и двумя индуктивностями. Первая из них – это индуктивность  $L_{1K}$ первичной обмотки при замкнутой накоротко вторичной обмотке трансформатора, которую можно определить с помощью метода ненаправленных графов из схемы замещения [4, 6, 7]:

$$L_{1K} = L_1 - \frac{M^2}{L_2},$$
 (2)



Рис. 3. Структурная электрическая схема бесконтактной передачи электроэнергии на АНПА

Вторая, передаточная, индуктивность  $L_{12}$  определяет ток короткозамкнутой вторичной обмотки трансформатора при подведении напряжения к первичной обмотке (или, наоборот, ток короткозамкнутой первичной обмотки при подведении напряжения к вторичной обмотке). Эта индуктивность также находится с помощью метода ненаправленных графов [4, 6, 7]:

$$L_{12} = \frac{L_1 L_2}{M} - M,$$
 (3)

Амплитудные значения токов первичной и вторичной обмоток трансформатора в режиме короткого замыкания определятся как

$$I_{1K3A} = \frac{U_1}{4f L_{1K}}; I_{2K3A} = \frac{U_1}{4f L_{12}}, \quad (4)$$

где f – частота переменного импульсного напряжения на выходе инвертора.

Действующие значения токов в режиме короткого замыкания связаны с параметрами системы следующими выражениями:

$$I_{1K3} = \frac{U_1}{4\sqrt{3}f L_1(1-k^2)};$$

$$I_{2K3} = \frac{MU_1}{8f L_1 L_2(1-k^2)}.$$
(5)

Режим холостого хода является вторым крайним режимом работы АИН. Этот режим возникает при отключённой цепи нагрузки. Амплитудное значение тока первичной обмотки в этом режиме определится следующим выражением:

$$I_{1XXA} = \frac{U_1}{4f L_1}.$$
 (6)

Действующее значение тока первичной обмотки трансформатора определится как

$$I_{1XX} = \frac{U_1}{f L_1 \cdot 4\sqrt{3}}.$$
 (7)

Заключение о свойствах системы энергоснабжения АНПА можно слелать на основании расчёта. где в качестве исходных данных следует принять параметры из проведённого экспериментального исследования, описание которого приведено ниже. Использование их в расчёте даст возможность более наглядно сопоставить результаты исследования системы в натурном эксперименте и на математической модели. Исходные данные для расчёта имеют следующие значения: напряжение источника постоянного тока  $U_1 = 50$  В, частота выходного напряжения инвертора f = 11,1 кГц, «мёртвое время» T<sub>DZ</sub> = 4 мкс, взаимная индуктивность между обмотками трансформатора M = 31,3 мкГн, индуктивность первичной обмотки трансформатора  $L_1 = 58,4$  мкГн, активное сопротивление первичной обмотки трансформатора, включающее сопротивление проводов,  $R_1 = 61,3$  мОм, индуктивность вторичной обмотки трансформатора  $L_2 = 52,7$  мкГн, активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора, включающее сопротивление проводов,  $R_2 = 53,5$  мОм, коэффициент связи между обмотками *k* = 0.564.

По формулам (5) и (7) были получены следующие численные значения токов обмоток трансформатора:  $I_{1K3} = 16,3$  А,  $I_{2K3} = 8,4$  А,  $I_{1XX} = 11,1$  А, что свидетельствует об увеличенном токе первичной обмотки трансформатора и соответственно повышенном выходном токе АИН, а также повышенных тепловых потерях на его ключах.

Таким образом, задача снижения тока инвертора является актуальной и сводится к определению такой структуры АИН, при которой произойдут компенсация намагничивающей составляющей тока трансформатора и разгрузка ключей АИН. Поскольку эта составляющая имеет индуктивный характер, то компенсацию следует выполнять элементом, имеющим емкостной характер нагрузки. Применение конденсатора в чистом виде здесь невозможно, т.к. на выходе инвертора формируется напряжение прямоугольной формы.

Одним из известных способов разгрузки силовых ключей инвертора является включение резонансной цепи на его выходе [8]. Возможно также использование решения, заключающегося в подключении последовательной резонансной цепи параллельно первичной обмотке трансформатора (точки *а* и *б* на рис. 3). На этот способ разгрузки силовых ключей инвертора авторами статьи был получен патент на изобретение [9].

Особенность отмеченной последовательной резонансной цепи заключается в том, что она практически не изменяет форму и значения токов первичной и вторичной обмоток трансформатора, а влияет на ток инвертора. Такая резонансная цепь имеет собственную резонансную частоту  $f_{RC}$ , которая соответствует резонансу напряжений

$$f_{RC} = \frac{1}{\sqrt{L_{RC} C_{RC}}},\tag{8}$$

где  $L_{RC}$  и  $C_{RC}$  – соответственно индуктивность и ёмкость резонансной цепи.

Рабочая частота коммутации АИН должна соответствовать резонансу токов в первичной обмотке трансформатора, что обеспечит минимальную токовую нагрузку на транзисторные ключи. Частота коммутации *f*, соответствующая резонансу токов в режиме холостого хода, определяется следующим выражением:

$$f = \frac{1}{\sqrt{(L_{RC} + L_1) \cdot C_{RC}}}.$$
 (9)

По известным формулам можно также определить ин-

дуктивность реактора и ёмкость конденсатора последовательной резонансной цепи:

$$L_{RC} = \frac{L_{1}}{m^{2} - 1}; C_{RC} = \frac{m^{2} - 1}{\left(2 \pi m f\right)^{2} L_{1}},$$
(10)

где  $m = f_{RC} / f$  – отношение собственной частоты резонансной цепи к рабочей частоте коммутации АИН. Для расчёта параметр m принят равным 1,5. Ниже будет показано, что это значение обеспечивает сбалансированное соотношение между значениями реактивных мощностей конденсатора и индуктивности резонансной цепи и выходной мощности АИН.

По формулам (10) получены следующие значения параметров резонансной цепи:  $L_{RC} = 44,5$  мкГн,  $C_{RC} = 2$  мкФ.

### Моделирование системы энергообеспечения АНПА

Компьютерное моделирование системы бесконтактной передачи электроэнергии на АНПА, проведённое в программе МАТLАВ приложения Simulink, позволило провести дополнительный анализ её свойств. Общая схема модели, соответствующая принятой структуре, и схемы некоторых отдельных блоков представлены на рис. 4.

В схему модели (рис. 4, *a*) входят источник напряжения (Source); автономный инвертор напряжения (Invertor); блок передачи энергии (LCT), который содержит трансформатор и последовательную резонансную цепь, включённую параллельно его первичной обмотке; выпрямитель напряжения (Rect) и нагрузка (Load).

На рис. 4, б представлена схема модели блока LCT. Численные параметры схемы приведены выше. Для приближения модели к экспериментальным данным были



Рис. 4. Моделирование системы передачи электроэнергии в Simulink MATLAB: а – модель принятой структуры передачи электроэнергии; б – блок передачи электроэнергии LCT; в – модель автономного инвертора напряжения

учтены активные сопротивления проводов трансформатора и резонансной цепи.

Схема модели автономного инвертора напряжения, приведенная на рис. 4, *в*, реализована на дискретных элементах библиотеки приложения MATLAB SPS. Каждое плечо представлено IGBTтранзисторами и включёнными параллельно им диодами. Подобное представление модели позволяет решать более тонкие задачи настройки инвертора. Например,



Рис. 5. Осциллограммы напряжений, соответствующие режиму холостого хода:1 – напряжение на конденсаторе резонансной цепи; 2 – напряжение на реакторе резонансной цепи; 3 – напряжение на выходе АИН



Рис. 6. Осциллограммы токов, соответствующие режиму холостого хода:1 – ток первичной обмотки ВчТ; 2 – ток резонансной цепи; 3 – ток АИН

такая схема позволяет вывести отдельно измеряемые параметры транзисторов и диодов. Кроме того, в схеме присутствует блок формирования импульсов (БФУ) управления затворами транзисторов (PWR2). Для приближения к реальной схеме в модели также учтены паразитные индуктивности и активные сопротивления линий проводов и контактов (Parasitic).

Результаты моделирования системы бесконтактной передачи энергии представлены на рис. 5 и 6 в виде осциллограмм.

Осциллограммы показывают, что напряжение на конденсаторе увеличено по сравнению с напряжением на выходе инвертора. Это необходимо учитывать при выборе конденсатора, входящего в последовательную резонансную цепь.

Представленные на рис. 6 осциллограммы позволяют определить действующие значения токов первичной обмотки  $I_1 = 11,1$  A, инвертора  $I_{INV}$  = 3,64 A и резонансной цепи  $I_{LC} = 11,5$  А, откуда следует, что ток первичной обмотки трансформатора остался неизменным, а ток инвертора снизился примерно в 3 раза. Следовательно, введение последовательной резонансной LC-цепи действительно позволяет разгрузить силовые ключи инвертора и уменьшить тепловые потери, а значит, появляется возможность снижения его массогабаритных показателей в целом.

## • Эксперимент

Эксперимент проводился с целью проверки выполненных расчётов и результатов моделирования. Макетный стенд, представленный на рис. 7, соответствует принятой функциональной схеме.

На рис. 8 и 9 показаны результаты компьютерного моделирования и натурного эксперимента в виде внешних характеристик системы бесконтактной передачи электроэнергии, а также зависимостей тока инвертора от тока нагрузки системы для исходного варианта и для случая введения последовательной резонансной цепи, подключенной параллельно первичной обмотке трансформатора.

Анализ графиков показывает, что натурный эксперимент имеет хорошее совпадение с моделированием, при этом введение последовательной резонансной цепи практически не изменяет внешнюю характеристику системы. Вместе с тем представленные на рис. 9 характеристики свидетельствуют о снижении тока инвертора примерно в 3 раза. Соответственно пропорционально току сни-



Рис. 8. Внешние характеристики системы бесконтактной передачи электроэнергии (сплошные линии – моделирование, маркеры – эксперимент): 1 – без применения резонансной цепи; 2 – с применением резонансной цепи

жаются и потери в ключах АИН, выделяемые в виде тепла. Этот результат наглядно подтверждает эффективность принятого способа токовой разгрузки силовых ключей инвертора.

На рис. 10 представлены результаты определения КПД при моделировании и при экспериментальном исследовании. Анализ графиков показывает, что натурный эксперимент также имеет хорошее совпадение с моделированием, при этом введение дополнительной резонансной цепи обеспечивает увеличение КПД системы бесконтактной передачи электроэнергии примерно на 7%.



Рис. 7. Экспериментальный стенд системы энергообеспечения АНПА: 1 – автономный инвертор напряжения; 2 - выпрямитель напряжения; 3 – высокочастотный трансформатор; 4 – блок электронной нагрузки; 5 – преобразователь напряжения



Рис. 9. Зависимость тока инвертора І<sub>инв</sub> от тока нагрузки І<sub>н</sub> системы бесконтактной передачи электроэнергии (сплошные линии – моделирование, маркеры – эксперимент): 1 – без применения резонансной цепи; 2 – с применением резонансной цепи



Рис. 10. Зависимость КПД η от тока нагрузки I<sub>н</sub> системы бесконтактной передачи электроэнергии (сплошные линии – моделирование, маркеры – эксперимент): 1 – без применения резонансной цепи; 2 – с применением резонансной цепи

Заслуживает внимания вопрос практической реализации требуемой ёмкости конденсатора резонансной цепи. При этом необходимо учитывать, что реактивная мощность этого конденсатора зависит от относительной частоты, определяемой соотношением между частотой резонанса и частотой коммутации инвертора. Следует также учитывать, что напряжение на конденсаторе повышено по отношению к напряжению питания инвертора.

## Выбор конденсатора резонансной цепи

Выбор конденсатора, входящего в последовательную резонансную цепь, необходимо проводить из расчёта его реактивной мощности и допустимого напряжения. Так, допустимое напряжение на

конденсаторе зависит от частоты, на которой он будет использоваться. При увеличении частоты значение максимально допустимого напряжения на конденсаторе из условия его безопасной эксплуатации уменьшается, причем для типоразмера с меньшим значением ёмкости это уменьшение происходит в меньшей степени. Таким образом, возможна оптимизация массогабаритных показателей ёмкостного элемента резонансной цепи за счет применения нескольких конденсаторов. Анализ показал, что конденсаторы фирмы ЕРСОЅ обладают наилучшими показателями в отношении удельной ёмкости, а также максимально допустимых тока и напряжения. Если, например, максимально допустимое напряжение конденсатора с номиналом в 1 мкФ на рабочей частоте меньше требуемого значения, то для его увеличения возможно параллельное включение двух конденсаторов с номиналами 0,47 мкФ. При этом порог безопасного напряжения конденсатора будет увеличен, а результирующие массогабаритные показатели практически не изменятся. Это подтверждается рис. 11, где показаны два конденсатора фирмы EPCOS с номиналами 1 мкФ и 0,47 мкФ и имеющими одинаковый допустимый уровень напряжения  $U_{don} = 1250$  В на частоте до 1 кГц [10].

Для осуществления компромиссного выбора параметров системы бесконтактной передачи



Рис. 11. Конденсаторы фирмы EPCOS номиналом 1 мкФ и 0,47 мкФ

электроэнергии с резонансной цепью исследованы зависимости относительных реактивных мощностей конденсатора, реактора и выходной мощности АИН от относительной частоты *m*. В результате расчётов определены мощности этих элементов, которые нормированы относительно максимальной мощности на выходе системы бесконтактной передачи и представлены в виде графиков на рис. 12, откуда следует, что наиболее взвешенным значением *m*, при котором обеспечивается некоторый компромисс между потерями на ключах инвертора и значениями мощности реактивных элементов резонансной цепи является диапазон от 1,4 до 1,7. Если принять, например, *m* = 1,5, то выходная мощность инвертора с резонансной цепью уменьшается по отношению к исходному варианту примерно в 3 раза.



Рис. 12. Зависимость относительной мощности S\* от относительной частоты *m*: 1 – конденсатора резонансной цепи; 2 – реактора резонансной цепи; 3 – инвертора

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что одним из возможных вариантов разгрузки силовых ключей инвертора является введение последовательной резонансной LC-цепи, подключённой параллельно первичной обмотке трансформатора. Такая структура позволила снизить ток транзисторов АИН, а соответственно и потери, выделяемые в виде тепла, примерно в 3 раза. Предложенный подход к выбору конденсатора резонансной цепи позволяет увеличить допустимый уровень его напряжения при минимальных массогабаритных показателях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. 304 с.

2. Герасимов В.А., Кувшинов Г.Е., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Исследование режимов работы системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата с бесконтактной передачей электроэнергии // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 2. С. 24–32.

3. Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Структура системы электроснабжения автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3(140). С. 47–55.

4. Герасимов В.А., Копылов В.В., Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Себто Ю.Г., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Математическая модель устройства для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 2. С. 28–33.

5. Колпаков А.И. Проблемы проектирования IGBT-инверторов: перенапряжения и снабберы // Компоненты и технологии. 2008. № 5.

6. Топологические методы анализа в электротехнике и автоматике: учеб. пособие для вузов // Г.Н. Герасимова, Г.Е. Кувшинов, Л.А. Наумов, В.К. Усольцев. Владивосток: Дальнаука, 2001. 232 с.

 Электротехника: в 3-х книгах. Кн.
 Теория электрических и магнитных цепей. Электрические измерения / под ред.
 П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.Л. Шестакова. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. 505 с.

8. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2006. 632 с.

9. Пат. 2558681 Российская федерация, МПК Н20 М7/797. Автономный инвертор напряжения для питания нагрузки через трансформатор с низким коэффициентом связи между его обмотками / Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Себто Ю.Г., Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И., Красковский М.В.; заявитель и патентообладатель ИПМТ ДВО РАН. – № 2014111547/07, заявл. 25.03.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22. – 22 с.: ил.

10. MetallizedPolypropyleneFilmCa pacitors. [Электронный ресурс] // Ай-Си Контракт. URL: http://www.ic-contract.ru/ images/pdf/TDK/MKP\_B32656S.pdf (дата обращения 24.03.2016).