

(12) МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗАЯВКА, ОПУБЛИКОВАННАЯ В СООТВЕТСТВИИ С
ДОГОВОРом О ПАТЕНТНОЙ КООПЕРАЦИИ (РСТ)

(19) Всемирная Организация
Интеллектуальной Собственности
Международное бюро



(10) Номер международной публикации
WO 2012/169931 A1

(43) Дата международной публикации
13 декабря 2012 (13.12.2012)

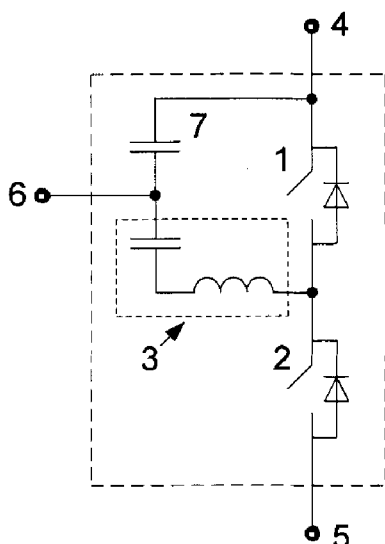
WIPO | РСТ

- (51) Международная патентная классификация:
H02M 1/16 (2006.01)
- (21) Номер международной заявки: PCT/RU2012/000313
- (22) Дата международной подачи:
24 апреля 2012 (24.04.2012)
- (25) Язык подачи: Русский
- (26) Язык публикации: Русский
- (30) Данные о приоритете:
2011116247 24 апреля 2011 (24.04.2011) RU
- (71) Заявитель (для всех указанных государств, кроме US):
**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ОБЪЕДИНЕНИЕ "ЭНЕРГОМОДУЛЬ" (ОАО НПО
"ЭНЕРГОМОДУЛЬ") (OTKRYTOE AKTSION-
ERNOE OBNHCHESTVO NAUCHNO-PROIZVOD-
STVENNOE OVEDINENIE "ENERGOMODUL"
ОАО НПО "ENERGOMODUL")** [RU/RU]; ул.
Победы, 30, Краснознаменск, Московская обл., 143090,
Krasnoznamensk (RU).
- (72) Изобретатели; и
- (75) Изобретатели/Заявители (только для US):
**ВОРОНИН, Игорь Павлович (VORONIN, Igor
Pavlovich)** [RU/RU]; ул. Колодезная, 7-2-109, Москва,
107076, Moscow (RU). **ВОРОНИН, Павел
Анатольевич (VORONIN, Pavel Anatolievich)**
[RU/RU]; ул. Колодезная, 7-2-109, Москва, 107076,
Moscow (RU).
- (81) Указанные государства (если не указано иначе, для
каждого вида национальной охраны): AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ,
CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,
HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME,
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,
OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD,
SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) Указанные государства (если не указано иначе, для
каждого вида региональной охраны): ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ,

[продолжение на следующей странице]

(54) Title: POWER MODULE WITH A MULTI-RESONANT CIRCUIT (VARIANT EMBODIMENTS)

(54) Название изобретения : СИЛОВОЙ МОДУЛЬ С МУЛЬТИ-РЕЗОНАНСНЫМ КОНТУРОМ (ВАРИАНТЫ)



Фиг. 1

(57) Abstract: The invention relates to power electronics. The use of said invention in autonomous inverter and pulse regulator circuits makes it possible to reduce dynamic losses and additional losses of conductivity in mains switches and to prevent high-frequency interference during switching of said switches. The power module has a positive, a negative and an output power terminal and comprises a first and a second switch, each having an antiparallel diode of the same type, and an LC series circuit. The technical result is achieved by the introduction of a capacitor, the first and second plates of which are respectively connected to the output power terminal of the module and to the positive or negative power terminal of the module.

(57) Реферат: Изобретение относится к силовой электронике. Его использование в схемах автономных инверторов и импульсных регуляторов позволяет снизить динамические потери и дополнительные потери проводимости в основных ключах и исключить высокочастотные помехи при их переключении. Силовой модуль имеет положительный, отрицательный и выходной силовые выводы и содержит первый и второй ключи, каждый с одноимённым встречно-параллельным диодом, и последовательный LC

контур. Технический результат достигается благодаря введению конденсатора, первая и вторая обкладки которого соединены, соответственно, с выходным силовым выводом модуля и с положительным или отрицательным силовым выводом модуля.



WO 2012/169931 A1



UG, ZM, ZW), евразийский (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), европейский патент (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Опубликована:

- с отчётом о международном поиске (статья 21.3)
- до истечения срока для изменения формулы изобретения и с повторной публикацией в случае получения изменений (правило 48.2(h))

СИЛОВОЙ МОДУЛЬ С МУЛЬТИ-РЕЗОНАНСНЫМ КОНТУРОМ (ВАРИАНТЫ)

5 Изобретение относится к силовой электронике, в частности к преобразователям с пониженными динамическими потерями в силовых полупроводниковых ключах и может быть использовано в схемах автономных инверторов и импульсных регуляторов.

 Известна схема преобразователя, в которой обеспечивается мягкое
10 выключение основных транзисторов при нулевом токе с помощью двух дополнительных ключей и последовательного LC контура (см. патент США № 5486752, опубл. 23.01.1996).

 Недостатком данного решения является то, что включение основных транзисторов остаётся жёстким, что значительно увеличивает динамические
15 потери в схеме.

 Наиболее близким по технической сути является решение (см. патент США № 6172882, опубл. 09.01.2001), включающее в себя силовой модуль, содержащий два ключа со встречно-параллельными диодами и последовательный LC контур, соединённые таким образом, что вывод первого ключа, соединённый с катодом встречно-параллельного диода, подключён к
20 положительному силовому выводу модуля, а вывод второго ключа, соединённый с анодом встречно-параллельного диода, подключён к отрицательному силовому выводу модуля, причём к точке соединения ключей подключён первый вывод последовательного LC контура, второй вывод которого соединён с выходным силовым выводом модуля.
25

 В данном решении обеспечивается мягкое включение основных ключей преобразователя при нулевом напряжении и их мягкое выключение при нулевом токе, что существенно снижает энергию динамических потерь. Однако мягкое включение основных ключей при нулевом напряже-

нии основано на использовании инерционных свойств их противофазных диодов и не является устойчивым при увеличении тока нагрузки. При этом скорость изменения напряжения на основных ключах является относительно большой, что приводит к дополнительным потерям мощности на
5 этапах динамического насыщения и остаточного тока. Ещё одним недостатком данной схемы являются высокочастотные помехи по напряжению, возникающие при переключении основных ключей.

Технический результат устройства по настоящему изобретению заключается в следующем:

10 1. Условие мягкого переключения основных ключей при изменении тока нагрузки обеспечивается вновь установленным критерием.

2. Снижение динамических потерь в основных ключах на этапах установления обеспечивается относительно медленным изменением фронта
15 напряжения на данных ключах за счёт подключения дополнительного конденсатора.

3. Уменьшение дополнительных потерь проводимости в основных ключах обеспечивается за счёт снижения амплитуды тока в обратных диодах данных ключей на этапе их мягкого выключения при применении
20 дополнительного конденсатора.

4. Исключение высокочастотных помех при переключении основных ключей обеспечивается уменьшением резонансной частоты колебательного процесса между выходными ёмкостями данных транзисторов и элементами
25 мульти-резонансного контура при подключении дополнительного конденсатора.

Указанный технический результат достигается благодаря тому, что в силовой модуль, содержащий первый и второй ключи, каждый с одним
имённым встречно-параллельным диодом, и последовательный LC контур, причём вывод первого ключа, соединённый с катодом первого встречно-параллельного диода, подключён к положительному силовому выводу мо-

дуля, а вывод второго ключа, соединенный с анодом второго встречно-параллельного диода, подключён к отрицательному силовому выводу модуля, к точке соединения первого и второго ключей подключён первый вывод последовательного LC контура, второй вывод которого соединён с
5 выходным силовым выводом модуля, в соответствии с первым объектом настоящего изобретения введён конденсатор, первая и вторая обкладки которого соединены, соответственно, с выходным силовым выводом модуля и с положительным силовым выводом модуля.

Тот же технический результат достигается благодаря тому, что в си-
10 ловой модуль, содержащий первый и второй ключи, каждый с одноимённым встречно-параллельным диодом, и последовательный LC контур, причём вывод первого ключа, соединённый с катодом первого встречно-параллельного диода, подключён к положительному силовому выводу модуля, а вывод второго ключа, соединенный с анодом второго встречно-
15 параллельного диода, подключён к отрицательному силовому выводу модуля, к точке соединения первого и второго ключей подключён первый вывод последовательного LC контура, второй вывод которого соединён с выходным силовым выводом модуля, в соответствии со вторым объектом настоящего изобретения введён конденсатор, первая и вторая обкладки ко-
20 торого соединены, соответственно, с выходным силовым выводом модуля и с отрицательным силовым выводом модуля.

Изобретение иллюстрируется приложенными чертежами, на которых одинаковые элементы обозначены одними и теми же ссылочными пози-
циями.

25 На Фиг. 1 представлен силовой модуль с мульти-резонансным контуром по первому варианту осуществления.

На Фиг. 2 представлен силовой модуль с мульти-резонансным контуром по второму варианту осуществления.

На Фиг. 3 представлена схема ближайшего аналога.

На Фиг. 4 представлен силовой модуль с мульти-резонансным контуром, подключённый к базовой переключающей схеме преобразователя.

На Фиг. 5 представлен силовой модуль с мульти-резонансным контуром, подключённый к преобразователю постоянного напряжения (импульсному регулятору повышающего типа).

На Фиг. 6 представлен силовой модуль с мульти-резонансным контуром, подключённый к инвертору напряжения на стороне постоянного тока.

На Фиг. 7 представлен силовой модуль с мульти-резонансным контуром, подключённый к инвертору напряжения на стороне переменного тока.

На Фиг. 8 представлен силовой модуль с мульти-резонансным контуром, подключённый к активному выпрямителю на стороне постоянного тока.

На Фиг. 9 представлен силовой модуль с мульти-резонансным контуром, подключённый к трёхуровневому инвертору напряжения.

На Фиг. 10 представлена осциллограмма мягкого включения одного из основных ключей преобразователя при применении силового модуля с мульти-резонансным контуром.

На Фиг. 11 представлена осциллограмма мягкого включения одного из основных ключей преобразователя в отсутствие конденсатора.

На Фиг. 12 представлена осциллограмма мягкого выключения одного из основных ключей преобразователя при применении силового модуля с мульти-резонансным контуром по настоящему изобретению.

На Фиг. 13 представлена осциллограмма мягкого выключения одного из основных ключей преобразователя в отсутствие конденсатора.

На Фиг. 14 представлена осциллограмма мягкого переключения ключа 1 силового модуля с мульти-резонансным контуром по настоящему изобретению.

На Фиг. 15 представлена осциллограмма мягкого переключения ключа 2 силового модуля с мульти-резонансным контуром по настоящему изобретению.

Силовой модуль (Фиг. 1) содержит: первый ключ 1 и второй ключ 2, каждый из которых имеет одноимённый встречно-параллельный диод, последовательный LC контур 3, положительный силовой вывод 4, отрицательный силовой вывод 5, выходной силовой вывод 6 и конденсатор 7.

Вывод первого ключа 1, соединённый с катодом первого встречно-параллельного диода, подключён к положительному силовому выводу 4, а вывод второго ключа 2, соединённый с анодом второго встречно-параллельного диода, подключён к отрицательному силовому выводу 5. К точке соединения первого и второго ключей 1, 2 подключён первый вывод последовательного LC контура 3, второй вывод которого соединён с выходным силовым выводом 6. Первая обкладка конденсатора 7 соединена с выходным силовым выводом 6, а вторая обкладка конденсатора 7 соединена с положительным силовым выводом 4. Вторая обкладка конденсатора 7, как показано на Фиг. 2, может быть соединена также и с отрицательным силовым выводом 5.

Предложенное устройство работает следующим образом.

Любой преобразователь электрической энергии представляет собой устройство, получающее энергию от входного источника и передающее её в нагрузку. При этом передача энергии от входа к выходу должна предусматривать возможность регулирования потока энергии.

Совокупность минимального количества элементов, образующих схему для решения задачи регулирования, называется базовой переключающей моделью преобразователя. Известно, что два ключа, дроссель (источник тока) и конденсатор (источник напряжения) образуют минимально необходимый набор для любой базовой схемы регулирования.

Рассмотрим работу силового модуля с мульти-резонансным контуром, при его подключении к базовой переключающей схеме преобразователя (Фиг. 4).

Предположим, что источник ток J от источника тока протекает к точке соединения основных ключей $S1$ и $S2$ преобразователя. При выключённом втором основном ключе $S2$ данный ток J замыкается через встречно-параллельный диод первого основного ключа $S1$, который является противофазным по отношению ко второму основному ключу $S2$.

Тогда выходная ёмкость основного ключа $S2$ заряжена до напряжения E источника питания, а выходная ёмкость противофазного (первого) основного ключа $S1$ полностью разряжена. При этом конденсатор 7 также разряжен до нуля.

Начальное напряжение на конденсаторе в LC контуре 3 будем считать равным U_{0+} с полярностью, показанной на схеме. Абсолютное значение напряжения U_{0+} будет определено ниже на одном из интервалов периода коммутации.

Перед включением первого основного ключа (транзистора) $S2$ включается первый ключ 1.

1. Интервал перезаряда конденсатора в LC контуре.

Через открытый первый ключ 1 и встречно-параллельный диод первого основного ключа $S1$ за счёт колебательного процесса конденсатор в LC контуре перезаряжается до начального напряжения U_{0+} , но с обратной полярностью. Время этого перезаряда равно половине периода резонансной частоты LC контура:

$$\Delta t_1 = \pi \sqrt{L_k C_k}; \quad (1)$$

где L_k – индуктивность дросселя в LC контуре; C_k – ёмкость конденсатора в LC контуре.

После интервала времени Δt_1 ток дросселя в LC контуре будет протекать через встречно-параллельный диод первого ключа 1, при этом сигнал управления с данного ключа может быть снят.

2. Интервал коммутации встречно-параллельного диода первого основного ключа S1.

После перезаряда конденсатора ток дросселя в LC контуре начинает нарастать встречно току встречно-параллельного диода первого основного ключа S1, и при достижении величины тока J данный диод запирается. Длительность интервала коммутации Δt_2 определяется уравнением:

$$\Delta t_2 = \sqrt{L_k C_k} \arcsin(\rho_k J / U_{0+}); \quad (2)$$

где $\rho_k = \sqrt{L_k / C_k}$ – волновое сопротивление последовательного LC контура.

В конце интервала коммутации напряжение на конденсаторе C_k в LC контуре становится равным U_0 , которое определяется уравнением:

$$U_0 = \sqrt{U_{0+}^2 - (J\rho_k)^2}. \quad (3)$$

3. Интервал резонансного разряда выходной ёмкости второго основного ключа S2.

Выходная ёмкость C_T второго основного ключа S2 определяется ёмкостью C_x конденсатора 7, которая выбирается много больше, чем собственная выходная ёмкость второго основного ключа S2:

$$C_T = C_x. \quad (4)$$

После запираания встречно-параллельного диода первого основного ключа S1 в схеме образуется параллельный резонансный контур, в который входят источник тока J, конденсатор C_x , а также дроссель в LC контуре с последовательным эквивалентным источником напряжения:

$$E_{\text{экв}} = E - u_{Ck}(t); \quad (5)$$

где $u_{Ck}(t)$ – напряжение на конденсаторе в LC контуре.

При этом напряжение на втором основном ключе S2 будет изменяться в соответствии с уравнением:

$$u_{S2}(t) = E - U_0(1 - \cos(\omega_0 t)) + \frac{J}{C_k} t; \quad (6)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{L_k C_x}$ – круговая частота резонансного процесса перед включением второго основного ключа S2.

Напряжение на конденсаторе в LC контуре при этом будет равно:

$$u_{Ck}(t) = U_0 - U_0 \frac{C_x}{C_k} (1 - \cos(\omega_0 t)) - \frac{J}{C_k} t. \quad (7)$$

Из уравнения (6) следует условие, при котором в результате резонанса на втором основном ключе S2 реализуется нулевое напряжение:

$$U_0 \geq \frac{E}{2} \left(1 + \frac{C_x}{C_k}\right) + \pi \sqrt{L_k C_x} \frac{J}{2C_k}. \quad (8)$$

Таким образом, условие нулевого напряжения на втором основном ключе S2 определяется величиной напряжения на конденсаторе в последовательном LC контуре в момент коммутации встречно-параллельного диода первого ключа S1 при заданных параметрах электрического режима работы схемы (E и J) и выбранных параметрах мульти-резонансного контура (L_k , C_k и C_x).

Длительность Δt_3 интервала резонанса определим из уравнения (6) при $u_{S2}(t) = 0$:

$$\Delta t_3 = \sqrt{L_k C_x} \arccos(1 - E/U_0). \quad (9)$$

После интервала Δt_3 второй основной ключ S2 можно включить при нулевом напряжении.

4. Интервал сброса энергии из коммутирующего дросселя в LC контуре.

Напряжение на конденсаторе в LC контуре после разряда выходной ёмкости второго основного ключа S2 становится равным:

$$U_* = U_0 - E \frac{C_x}{C_k} - J \frac{C_x + C_k}{C_k^2} \Delta t_3. \quad (10)$$

Ток в дросселе LC контура после разряда выходной ёмкости второго основного ключа S2 становится равным:

$$I_* = J + (U_0 / \rho_0) \sin(\omega_0 \Delta t_3); \quad (11)$$

где $\rho_0 = \sqrt{L_k / C_x}$ – волновое сопротивление мульти-резонансного контура при включении второго основного ключа S2.

После включения второго основного ключа S2 последовательный LC контур через встречно-параллельный диод первого ключа 1 оказывается нагруженным на источник питания схемы. Решая уравнение колебательного процесса в LC контуре без потерь, для тока в дросселе LC контура получаем:

$$i_{Lk}(t) = \sqrt{I_*^2 + [(E - U_*) / \rho_k]^2} \cos(\omega_k t + \beta); \quad (12)$$

где $\beta = \arctg[(E - U_*) / (\rho_k I_*)]$.

Интегрируя (12) по времени, для напряжения на конденсаторе Cк соответственно получаем:

$$u_{Ck}(t) = E - \sqrt{(\rho_k I_*)^2 + (E - U_*)^2} \sin(\omega_k t + \beta). \quad (13)$$

Разность тока J и тока в дросселе LC контура протекает вначале через встречно-параллельный диод второго основного ключа S2, а затем и через сам второй основной ключ S2.

Когда ток транзистора второго основного ключа S2 достигает величины тока J, ток дросселя в LC контуре становится равным нулю.

Приравнивая (12) к нулевому значению для интервала сброса энергии Δt_4 получаем:

$$\Delta t_4 = \sqrt{L_k C_k} (\pi/2 - \beta). \quad (14)$$

Напряжение на конденсаторе в LC контуре при этом оказывается равным:

$$U_{0-} = E - \sqrt{(\rho_k I_*)^2 + (E - U_*)^2}; \quad (15)$$

где $U_{0-} = u_{Ck}(\Delta t_4)$.

Напряжение на конденсаторе в LC контуре, равное U_{0-} с полярностью, противоположной начальному напряжению U_{0+} , далее может быть

использовано для мягкого выключения второго основного ключа S2 при нулевом токе.

5. Интервал проводимости тока нагрузки.

Данный Δt_5 интервал времени определяется длительностью открытого состояния второго основного ключа S2.

6. Интервал резонансного выключения второго основного ключа S2.

Перед выключением второго основного ключа S2 подают сигнал управления на второй ключ 2, и ток $i_{Lk}(t)$ колебательного LC контура начинает нарастать встречно току J, проходящему через открытый второй основной ключ S2:

$$i_{Lk}(t) = (U_{0-} / \rho_k) \sin(\omega_k t). \quad (16)$$

При этом напряжение на конденсаторе в LC контуре будет изменяться по закону:

$$u_{Ck}(t) = U_{0-} \cos(\omega_k t). \quad (17)$$

Поскольку второй основной ключ S2 находится в открытом состоянии, напряжение на конденсаторе 7 будет неизменным. Тогда круговая частота резонансного процесса при выключении второго основного ключа S2 будет определяться частотой ω_k последовательного LC контура, которая отличается от резонансной частоты ω_0 .

Таким образом, колебательный контур в силовом модуле, состоящий из последовательного LC контура 3 и конденсатора 7, является мульти-резонансным, поскольку имеет различные резонансные частоты при включении и выключении первого и второго основных ключей S1, S2 преобразователя.

Выключение второго основного ключа S2 при нулевом токе возможно только при выполнении условия:

$$U_{0-} \geq \rho_k J. \quad (18)$$

В момент равенства тока в LC контуре и тока J включается встречно-параллельный диод второго основного ключа S2, через который затем про-

текает разность указанных токов. Очевидно, что сигнал управления со второго основного ключа S2 необходимо снять до того, как вновь наступит равенство данных токов. После чего обратный (встречно-параллельный) диод запирается, и рассматриваемый интервал мягкой коммутации закан-

5 чивается.

Длительность Δt_6 интервала определяется из уравнения (16) для заданного тока J:

$$\Delta t_6 = \sqrt{L_k C_k} (\pi/2 + \arccos(\rho_k J / U_{0-})) . \quad (19)$$

В момент времени, когда ток в LC контуре достигает максимального значения, напряжение на конденсаторе в LC контуре вновь изменяет свою

10 полярность и затем возрастает до величины U_x . Данное напряжение определяется из уравнения (17) при подстановке в него интервала Δt_6 времени:

$$U_x = \sqrt{(U_{0-})^2 - (\rho_k J)^2} . \quad (20)$$

Напряжение U_x зависит от тока J, однако оно всегда будет ниже первоначального напряжения, равного U_{0+} . Для обеспечения устойчивости циклов мягких переключений необходимо поднять уровень напряжения на конденсаторе в LC контуре до начальной величины U_{0+} . С этой целью после выключения второго основного ключа S2 и запираания его обратного (встречно-параллельного) диода второй ключ 2 оставляют в открытом со-

15

20 стоянии.

7. Интервал дозаряда конденсатора в LC контуре до напряжения источника питания.

Поскольку напряжение U_x на конденсаторе C_k меньше напряжения E питания, противофазный (встречно-параллельный) диод первого основного

25 ключа S1 к началу интервала будет находиться в выключённом состоянии. Таким образом, единственный путь для замыкания тока J лежит через последовательный LC контур и открытый второй ключ 2. При этом ток J будет практически линейно заряжать конденсатор C_k :

$$u_{Ck}(t) = U_x + \frac{J}{C_k} t. \quad (21)$$

Длительность интервала Δt_7 дозаряда определяется из уравнения (21) при напряжении на конденсаторе, равном E :

$$\Delta t_7 = \frac{(E - U_x)C_k}{J}. \quad (22)$$

5 8. Интервал резонансного восстановления начального напряжения на конденсаторе в LC контуре.

Когда напряжение на конденсаторе в LC контуре увеличивается до напряжения E , открывается встречно-параллельный диод первого основного ключа S1. Через данный диод последовательный LC контур подключается к источнику питания, и в нём начинается ещё один резонансный процесс с круговой частотой ω_k . Ток в дросселе и напряжение на конденсаторе в LC контуре описываются при этом системой уравнений:

$$\begin{cases} i_{Lk}(t) = J \cos(\omega_k t) \\ u_{Ck}(t) = E + \rho_k J \sin(\omega_k t) \end{cases} \quad (23)$$

15 Через четверть периода колебательного процесса ток дросселя переходит во встречно-параллельный диод второго ключа 2.

Ещё через половину периода этот встречно-параллельный диод автоматически запирается при снижении тока дросселя в LC контуре до нуля. Таким образом, полная длительность Δt_8 интервала составляет три четверти от периода резонанса, равного $2\pi\sqrt{L_k C_k}$:

$$20 \quad \Delta t_8 = \frac{3}{2} \pi \sqrt{L_k C_k}. \quad (24)$$

Подставляя Δt_8 в уравнение (23) для напряжения на конденсаторе в LC контуре в конце интервала получаем:

$$u_{Ck}(\Delta t_8) = E - \rho_k J = U_{0+}. \quad (25)$$

25 Таким образом, можно считать, что полный цикл одного периода коммутации завершён. И, начиная с напряжения U_{0+} , можно начинать очередной такт.

После определения аналитической формы начального напряжения U_{0+} напряжение на конденсаторе в LC контуре в момент коммутации противофазного (встречно-параллельного) диода первого основного ключа S1, которое обозначено как U_0 , удобнее выразить в иной форме. Для этого, подставляя U_{0+} из (25) в формулу (3), получаем:

$$U_0 = \sqrt{E(E - 2\rho_k J)}. \quad (26)$$

Тогда формула для критерия включения второго основного ключа S2 при нулевом напряжении (8) преобразуется к виду, в который входят только параметры, задающие электрический режим схемы, и параметры мульти-резонансного контура:

$$\sqrt{1 - \frac{2J}{E/\rho_k}} \geq \frac{1}{2} \left(1 + \frac{C_x}{C_k}\right) + \frac{\pi}{2} \frac{J}{E/\rho_k} \sqrt{\frac{C_x}{C_k}}. \quad (27)$$

Введём параметр χ , который назовём коэффициентом нагрузки схемы:

$$\chi = \frac{\rho_k J}{E}. \quad (28)$$

Фактически параметр χ равен отношению тока J к максимальному току первого и второго ключей 1 и 2.

Введём также параметр q , который назовём коэффициентом отношения резонансных частот мульти-резонансного контура при выключении второго основного ключа S2 при нулевом токе и при включении второго основного ключа S2 при нулевом напряжении:

$$q = \frac{f_{pHT}}{f_{pHH}} = \sqrt{\frac{C_x}{C_k}}. \quad (29)$$

Перепишем неравенство (26) с учётом введённых коэффициентов:

$$\sqrt{1 - 2\chi} \geq \frac{1}{2}(1 + q^2) + \frac{\pi}{2}\chi q. \quad (30)$$

Отметим, что при выполнении неравенства (30) автоматически выполняется критерий мягкого выключения при нулевом токе по уравнению (18). А в граничном режиме данные уравнения тождественно равны.

Таким образом, неравенство (30) является вновь установленным критерием мягкой коммутации основных ключей преобразователя, который в отличие от ближайшего аналога не зависит от инерционных свойств применяемых в схеме диодов.

Чем больше ток J , тем сложнее выполнить критерии мягкого переключения. Поэтому выбор номиналов элементов мульти-резонансного контура, удовлетворяющих указанным ограничениям, следует проводить для максимального тока нагрузки. Для всех других значений тока J ниже максимального условия мягкого переключения основных ключей будут выполняться автоматически.

Динамические процессы в первом и втором ключах 1 и 2 рассматриваемого устройства также носят мягкий характер, поскольку изменение тока в них определяется плавным изменением тока в колебательном LC контуре. В первом и втором ключах 1 и 2 не происходит предварительного разряда их выходных ёмкостей перед включением, что в общем случае ведет к добавочным потерям. Однако, поскольку работа данных ключей происходит на относительно коротких интервалах времени, используются приборы, среднее значение тока которых меньше, чем для основных ключей. По этой причине и выходные ёмкости первого и второго ключей 1 и 2 значительно меньше, чем для первого и второго основных ключей $S1$ и $S2$.

Применение конденсатора 7 приводит к большему разряду конденсатора в LC контуре 3 при включении основного ключа. С одной стороны это несколько усложняет выполнение критерия мягкой коммутации. С другой стороны, это позволяет снизить дополнительные потери проводимости в основных ключах, поскольку одновременно снижаются амплитуды токов в обратных диодах основных ключей на этапах их мягкого выключения.

С изменением направления тока J , т.е. при его протекании от точки соединения первого и второго основных ключей $S1$ и $S2$, при выключённом первом основном ключе $S1$ данный ток будет замыкаться через встречно-параллельный диод второго основного ключа $S2$. Аналогично
5 рассмотренным этапам мягкого переключения второго основного ключа $S2$ теперь можно проводить мягкую коммутацию тока нагрузки при переключении первого основного ключа $S1$. С этой целью перед включением первого основного ключа $S1$ отпирают второй ключ 2. Тогда в предложенном устройстве протекают процессы, симметричные ранее рассмотренным и
10 обеспечивающие включение первого основного ключа $S1$ при нулевом напряжении. Далее перед выключением первого основного ключа $S1$ включают первый ключ 1, что обеспечивает условия для выключения первого основного ключа $S1$ при нулевом токе.

Вторая обкладка конденсатора 7 может быть соединена также и с отрицательным силовым выводом 5. Поскольку выходная ёмкость второго
15 основного ключа $S2$ остаётся при этом неизменной, неизменными будут также и электрические процессы в схеме по сравнению с решением, когда вторая обкладка конденсатора подключена к положительному силовому выводу 4.

20 Принцип работы устройства и критерии мягкого переключения не изменяются при применении различных типов ключей (биполярных и полевых транзисторов, а также тиристоров и биполярных транзисторов с изолированным затвором – IGBT).

Далее рассмотрим примеры конкретного применения предложенного
25 устройства.

На Фиг. 5 представлен силовой модуль с мульти-резонансным контуром по настоящему изобретению, подключённый к преобразователю постоянного напряжения (импульсному регулятору повышающего типа).

Мягкая коммутация в данном преобразователе заключается в том, что положительный и отрицательный силовой вывод модуля подключаются соответственно к положительному и отрицательному полюсу источника постоянного напряжения в преобразователе, роль которого выполняет конденсатор C_f выходного фильтра, а выходной силовой вывод модуля 5 подключается к полюсу источника постоянного тока в преобразователе, роль которого выполняет входной дроссель L_0 .

На Фиг. 6 представлен силовой модуль с мульти-резонансным контуром по настоящему изобретению, подключённый к инвертору напряжения на стороне постоянного тока. 10

Мягкая коммутация в данном преобразователе заключается в том, что положительный и отрицательный силовой вывод модуля подключаются соответственно к положительному и отрицательному полюсу источника постоянного напряжения в преобразователе, роль которого выполняет источник напряжения E питания инвертора, а выходной силовой вывод модуля 15 подключается к полюсу источника постоянного тока в преобразователе, роль которого выполняет входной ток инвертора.

На Фиг. 7 представлен силовой модуль с мульти-резонансным контуром по настоящему изобретению, подключённый к инвертору напряжения на стороне переменного тока. 20

В данном случае количество вспомогательных силовых модулей с мульти-резонансным контуром равно трём по количеству фаз инвертора. Мягкая коммутация в данном преобразователе заключается в том, что положительные и отрицательные силовые выводы трёх модулей 25 подключаются соответственно к положительному и отрицательному полюсу источника постоянного напряжения в преобразователе, роль которого выполняет источник напряжения E питания инвертора, а выходные силовые выводы модулей подключаются к соответствующим полюсам источников пере-

менного тока в преобразователе, роль которых выполняют фазные токи инвертора.

На Фиг. 8 представлен силовой модуль с мульти-резонансным контуром по настоящему изобретению, подключённый к активному выпрямителю на стороне постоянного тока.

Мягкая коммутация в данном преобразователе заключается в том, что положительный и отрицательный силовой вывод модуля подключаются соответственно к положительному и отрицательному полюсу источника постоянного напряжения в преобразователе, роль которого выполняет конденсатор C_f выходного фильтра выпрямителя, а выходной силовой вывод модуля подключается к полюсу источника постоянного тока в преобразователе, роль которого выполняет выходной ток активного выпрямителя.

На Фиг. 9 представлен силовой модуль с мульти-резонансным контуром по настоящему изобретению, подключённый к трёхуровневому инвертору напряжения.

Показано подключение для одной фазы трёхуровневого инвертора. Количество вспомогательных силовых модулей с мульти-резонансным контуром для отдельной фазы равно двум по количеству эквивалентных полумостовых схем, к работе которых сводится работа трёхуровневой схемы. Мягкая коммутация в данном преобразователе заключается в том, что положительные и отрицательные силовые выводы модулей подключаются соответственно к положительным и отрицательным полюсам источников постоянного напряжения в преобразователе, роль которых выполняют конденсаторы входных фильтров инвертора, а выходные силовые выводы модулей подключаются к полюсу источника переменного тока в преобразователе, роль которого выполняет фазный ток инвертора.

Рассмотрим пример конкретного исполнения устройства по настоящему изобретению.

Предложенное устройство было исполнено и применено для трёх-фазного инвертора напряжения.

Напряжение источника питания $E = 500 \text{ В}$.

Ток нагрузки $J = 40 \text{ А}$.

- 5 Основные ключи инвертора – тип PT-IGBT, класс напряжения 1200 В, средний ток коллектора 100 А, напряжение насыщения 2,5 В, выходная ёмкость 1 нФ.

Ключи силового модуля с мульти-резонансным контуром – тип PT-IGBT, класс напряжения 1200 В, средний ток коллектора 50 А, импульс-
10 ный ток коллектора 400 А, напряжение насыщения 2,0 В, выходная ёмкость 0,2 нФ.

Дроссель последовательного LC контура – индуктивность 2,0 мкГн.

Конденсатор последовательного LC контура – ёмкость 0,15 мкФ, на-
пряжение 1000 В.

- 15 Конденсатор 7 – ёмкость 8,2 нФ, напряжение 1000 В.

На Фиг. 10 представлена осциллограмма мягкого включения одного из основных ключей такого преобразователя при применении силового модуля с мульти-резонансным контуром по настоящему изобретению. Ос-
20 новной ключ включается при нулевом напряжении, энергия динамических потерь при включении практически равна нулю.

Масштаб по вертикали:

Напряжение (канал 3) – 200 В/дел.

Ток (канал 4) – 20 А/дел.

- 25 Мощность (канал М) – 1000 Вт/дел.

Масштаб по горизонтали:

Время – 1 мкс/дел.

На Фиг. 11 представлена осциллограмма мягкого включения одного
30 из основных ключей преобразователя без конденсатора 7 в устройстве (как

в ближайшем аналоге). На осциллограмме видны сильные высокочастотные помехи в процессе переключения основного транзистора (основного ключа). Данные помехи обусловлены высокой резонансной частотой колебаний из-за относительно небольшой величины выходной ёмкости основного транзистора.

Масштаб по вертикали:

Напряжение (канал 3) – 200 В/дел.

Ток (канал 4) – 20 А/дел.

Мощность (канал М) – 1000 Вт/дел.

Масштаб по горизонтали:

Время – 1 мкс/дел.

На Фиг. 12 представлена осциллограмма мягкого выключения одного из основных ключей преобразователя при применении силового модуля с мульти-резонансным контуром по настоящему изобретению. Основной ключ выключается при нулевом токе, энергия динамических потерь при выключении практически равна нулю.

Масштаб по вертикали:

Напряжение (канал 3) – 200 В/дел.

Ток (канал 4) – 20 А/дел.

Мощность (канал М) – 1000 Вт/дел.

Масштаб по горизонтали:

Время – 1 мкс/дел.

На Фиг. 13 представлена осциллограмма мягкого выключения одного из основных ключей преобразователя без конденсатора 7 в устройстве (как в ближайшем аналоге). На осциллограмме видны сильные высокочастотные помехи в процессе выключения основного транзистора. Данные помехи обусловлены высокой резонансной частотой колебаний из-за относительно небольшой величины выходной ёмкости основного транзистора.

Амплитуда тока в обратном диоде ключа увеличена по сравнению с осциллограммой на Фиг. 12.

Масштаб по вертикали:

Напряжение (канал 3) – 200 В/дел.

5 Ток (канал 4) – 20 А/дел.

Мощность (канал М) – 1000 Вт/дел.

Масштаб по горизонтали:

Время – 1 мкс/дел.

10 На Фиг. 14 представлена осциллограмма мягкого переключения ключа 1 силового модуля с мульти-резонансным контуром по настоящему изобретению. Первый ключ 1 включается и выключается при нулевом токе, энергия динамических потерь при переключении практически равна нулю.

Масштаб по вертикали:

15 Напряжение (канал 3) – 200 В/дел.

Ток (канал 4) – 50 А/дел.

Мощность (канал М) – 1000 Вт/дел.

Масштаб по горизонтали:

Время – 1 мкс/дел.

20 На Фиг. 15 представлена осциллограмма мягкого переключения второго ключа 2 силового модуля с мульти-резонансным контуром по настоящему изобретению. Второй ключ 2 включается и выключается при нулевом токе, энергия динамических потерь практически равна нулю.

25 Масштаб по вертикали:

Напряжение (канал 3) – 200 В/дел.

Ток (канал 4) – 50 А/дел.

Мощность (канал М) – 1000 Вт/дел.

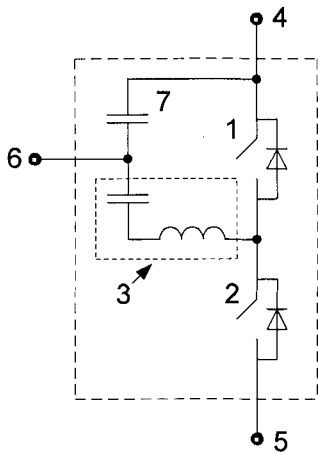
Масштаб по горизонтали:

30 Время – 2 мкс/дел.

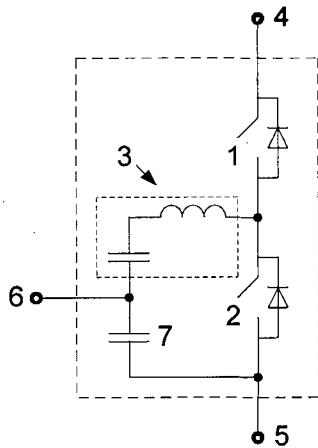
Формула изобретения

1. Силовой модуль, содержащий первый и второй ключи, каждый с
одноимённым встречно-параллельным диодом, и последовательный LC
контур, причём вывод первого ключа, соединённый с катодом первого
5 встречно-параллельного диода, подключён к положительному силовому
выводу модуля, а вывод второго ключа, соединённый с анодом второго
встречно-параллельного диода, подключён к отрицательному силовому
выводу модуля, к точке соединения первого и второго ключей подключён
первый вывод последовательного LC контура, второй вывод которого со-
10 единён с выходным силовым выводом модуля, *отличающийся* тем, что
введён конденсатор, первая и вторая обкладки которого соединены, соот-
ветственно, с выходным силовым выводом модуля и с положительным си-
ловым выводом модуля.

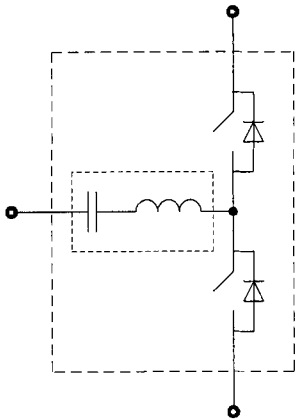
2. Силовой модуль, содержащий первый и второй ключи, каждый с
15 одноимённым встречно-параллельным диодом, и последовательный LC
контур, причём вывод первого ключа, соединённый с катодом первого
встречно-параллельного диода, подключён к положительному силовому
выводу модуля, а вывод второго ключа, соединённый с анодом второго
встречно-параллельного диода, подключён к отрицательному силовому
20 выводу модуля, к точке соединения первого и второго ключей подключён
первый вывод последовательного LC контура, второй вывод которого со-
единён с выходным силовым выводом модуля, *отличающийся* тем, что
введён конденсатор, первая и вторая обкладки которого соединены, соот-
ветственно, с выходным силовым выводом модуля и с отрицательным си-
25 ловым выводом модуля.



Фиг. 1

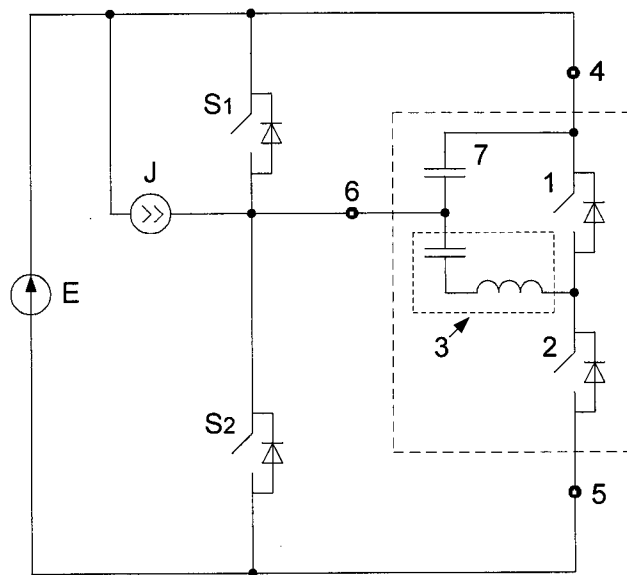


Фиг. 2

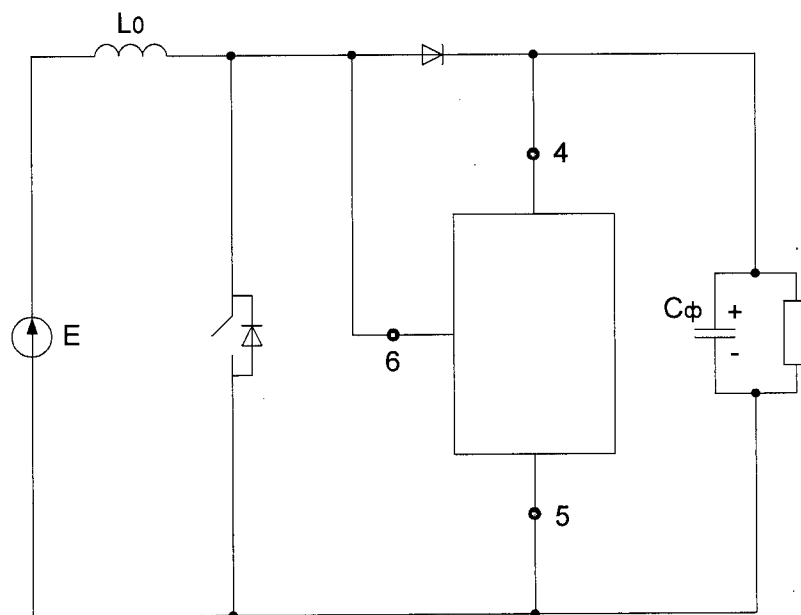


Фиг. 3

2/7

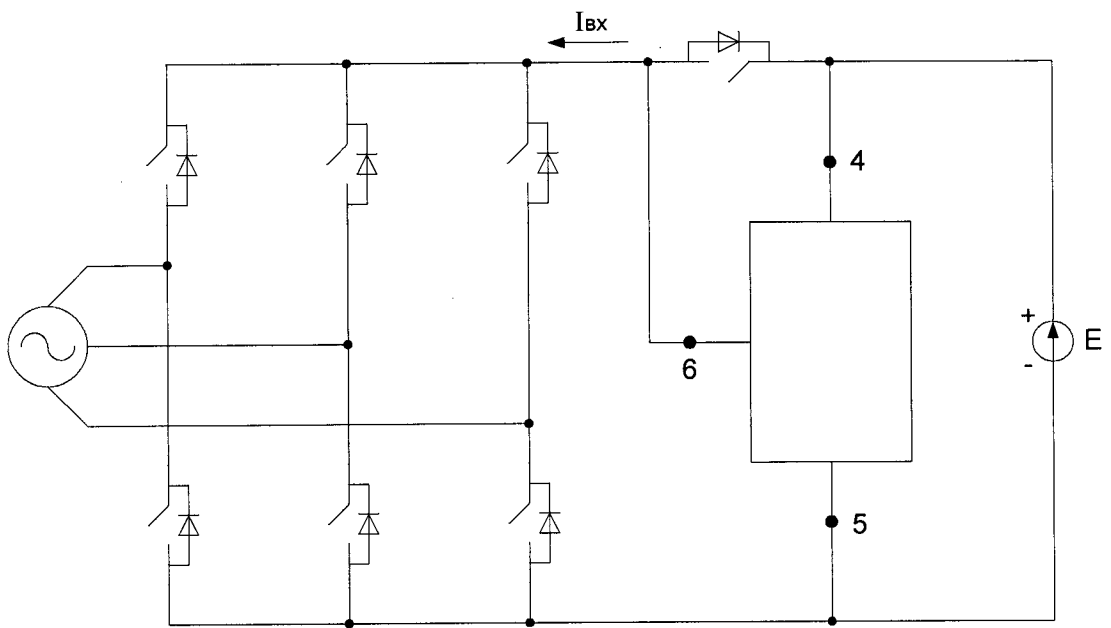


Фиг. 4

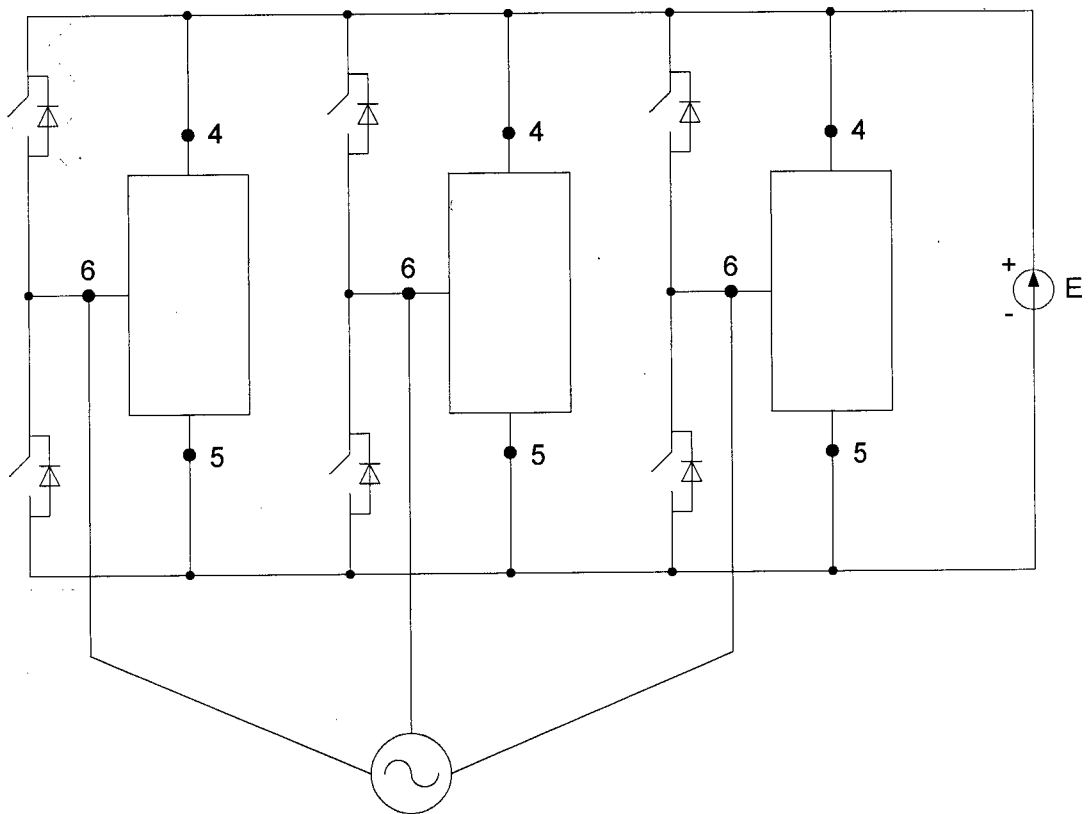


Фиг. 5

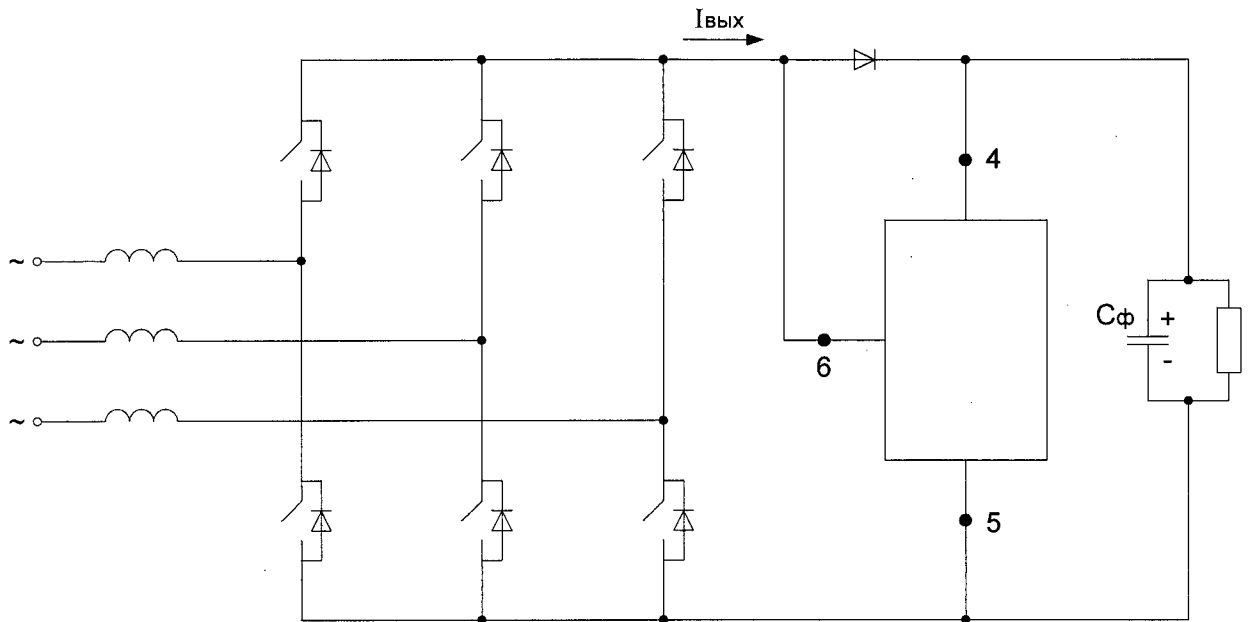
3/7



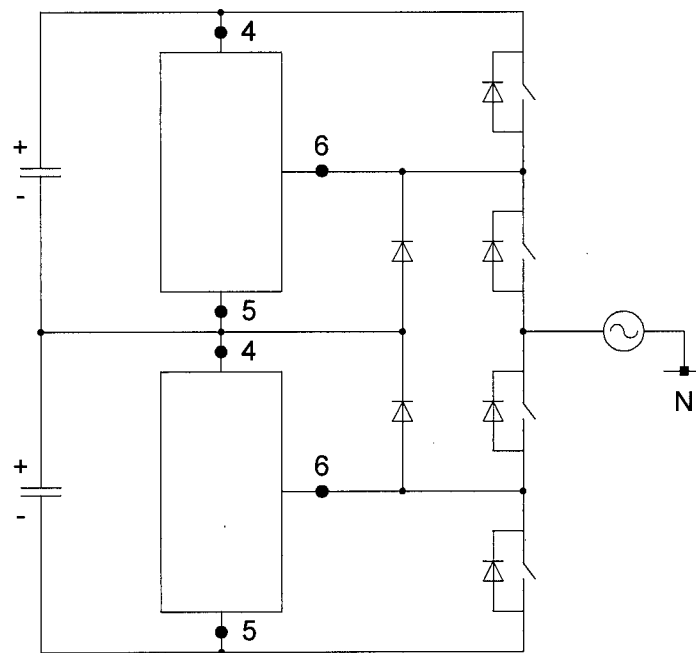
Фиг. 6



Фиг. 7

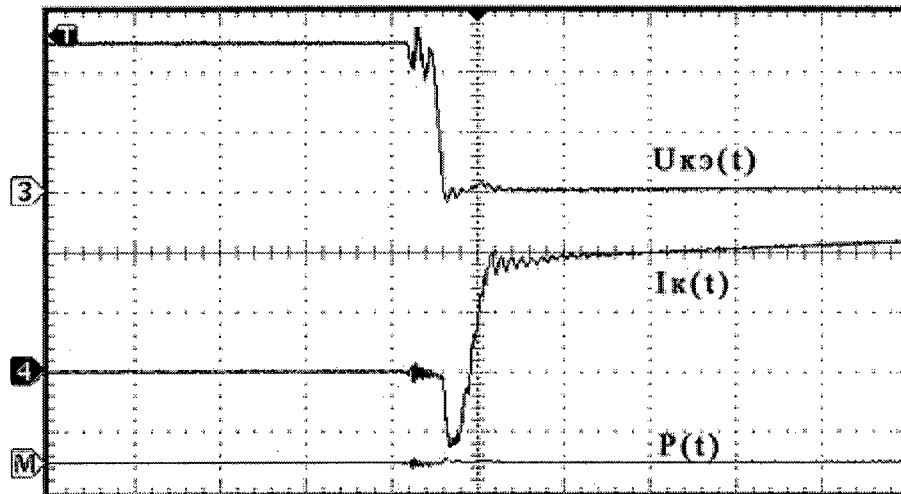


Фиг. 8

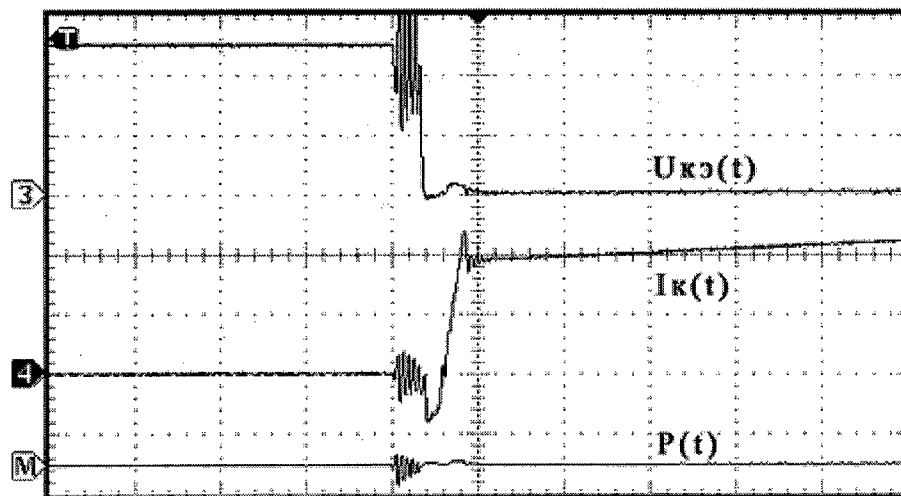


Фиг. 9

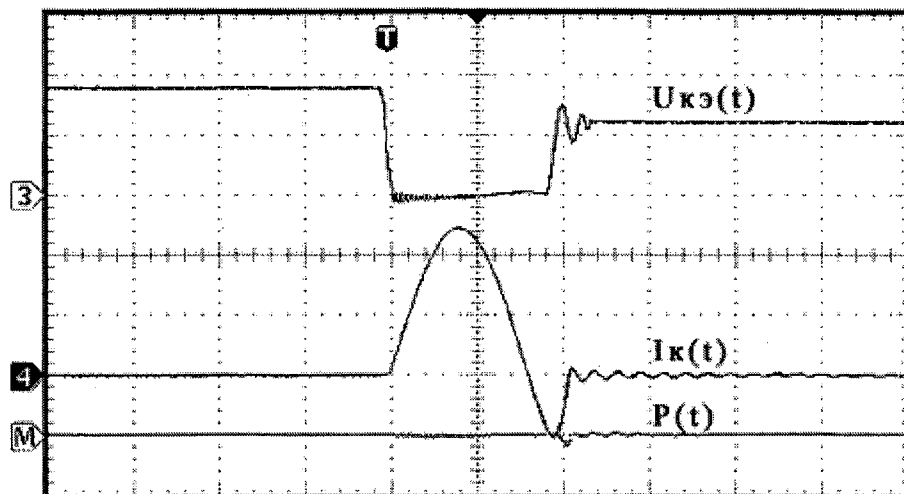
5/7



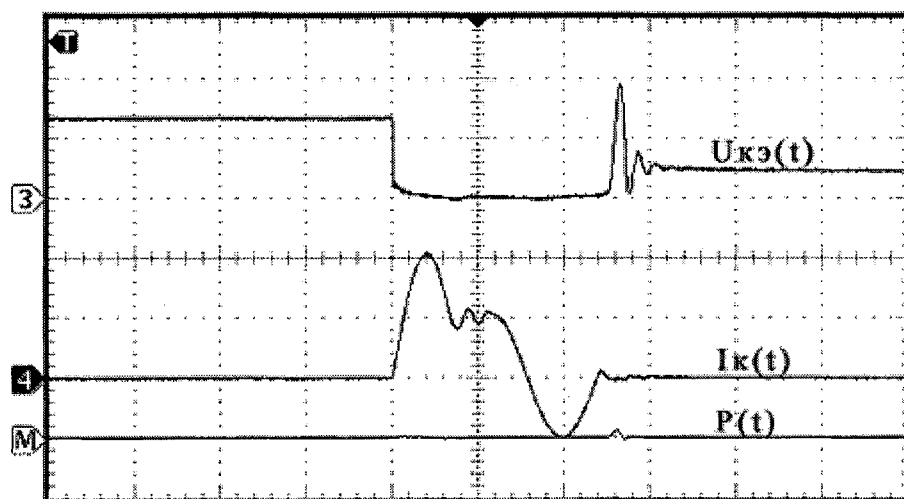
Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 14



Фиг. 15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/RU 2012/000313

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02M 1/16 (2006.01)

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02M 1/16, 3/24-3/338

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

PAJ, Esp@senet, WIPO, K-PION, USPTO DB, PatSearch

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 6172882 B1 (TDK CORPORATION) 09.01.2001, the abstract, fig. 1	1, 2
A	RU 2327274 C1 (OTKRYTOE AKTSIONERNOE OBSHESTVO "VSEROSSYSKY NAUCHNO-ISSLEDOVATELSKY I PROEKTNO-KONSTRUKTORSKY INSTITUT ELEKTROVOZOSTROENIYA) 20.06.2008, p. 4, 5, fig. 1	1, 2
A	US 6016258 A (NORTEL NETWORKS CORPORATION CONCORDIA UNIVERSITY) 18.01.2000, the abstract, fig. 1	1, 2



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

08 October 2012 (08.10.2012)

Date of mailing of the international search report

18 October 2012 (18.10.2012)

Name and mailing address of the ISA/

RU

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

ОТЧЕТ О МЕЖДУНАРОДНОМ ПОИСКЕ

Номер международной заявки

PCT/RU 2012/000313

A. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕДМЕТА ИЗОБРЕТЕНИЯ H02M 1/16 (2006.01) Согласно Международной патентной классификации МПК		
B. ОБЛАСТЬ ПОИСКА Проверенный минимум документации (система классификации с индексами классификации) H02M 1/16, 3/24-3/338 Другая проверенная документация в той мере, в какой она включена в поисковые подборки Электронная база данных, использовавшаяся при поиске (название базы и, если, возможно, используемые поисковые термины) PAJ, Esp@cenet, WIPO, K-PION, USPTO DB, PatSearch		
C. ДОКУМЕНТЫ, СЧИТАЮЩИЕСЯ РЕЛЕВАНТНЫМИ:		
Категория*	Цитируемые документы с указанием, где это возможно, релевантных частей	Относится к пункту №
A	US 6172882 B1 (TDK CORPORATION) 09.01.2001, реферат, фиг. 1	1, 2
A	RU 2327274 C1 (ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОВОЗОСТРОЕНИЯ) 20.06.2008, с. 4, 5, фиг. 1	1, 2
A	US 6016258 A (NORTEL NETWORKS CORPORATION CONCORDIA UNIVERSITY) 18.01.2000, реферат, фиг. 1	1, 2
☐ последующие документы указаны в продолжении графы C. ☐ данные о патентах-аналогах указаны в приложении		
* Особые категории ссылочных документов:	"T"	более поздний документ, опубликованный после даты международной подачи или приоритета, но приведенный для понимания принципа или теории, на которых основывается изобретение
"A" документ, определяющий общий уровень техники и не считающийся особо релевантным	"X"	документ, имеющий наиболее близкое отношение к предмету поиска; заявленное изобретение не обладает новизной или изобретательским уровнем, в сравнении с документом, взятым в отдельности
"E" более ранняя заявка или патент, но опубликованная на дату международной подачи или после нее	"Y"	документ, имеющий наиболее близкое отношение к предмету поиска; заявленное изобретение не обладает изобретательским уровнем, когда документ взят в сочетании с одним или несколькими документами той же категории, такая комбинация документов очевидна для специалиста
"L" документ, подвергающий сомнению притязание(я) на приоритет, или который приводится с целью установления даты публикации другого ссылочного документа, а также в других целях (как указано)	"&"	документ, являющийся патентом-аналогом
"O" документ, относящийся к устному раскрытию, использованию, экспонированию и т.д.		
"P" документ, опубликованный до даты международной подачи, но после даты испрашиваемого приоритета		
Дата действительного завершения международного поиска	Дата отправки настоящего отчета о международном поиске	
08 октября 2012 (08.10.2012)	18 октября 2012 (18.10.2012)	
Наименование и адрес ISA/RU: ФИПС, РФ, 123995, Москва, Г-59, ГСП-5, Бережковская наб., 30-1 Факс: (499) 243-33-37	Уполномоченное лицо: И. Головинова Телефон № (495) 531-64-81	