

Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость

ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ С АВТОНОМНЫМИ СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Часть II. Обзор и систематизация известных структур и схем основных узлов. Приближенные критерии оценки элементов

Данная статья продолжает цикл, посвященный выбору способов и схемотехнических решений, обеспечивающих сохранение качества электроэнергии питающей сети и допустимого уровня генерируемых электромагнитных помех при работе вторичных источников импульсного питания (ВИИП) с емкостным накопителем в составе автономных систем (АСЭС), в частности транспортных [1].

**Станислав Резников, д. т. н.
Владимир Бочаров, к. т. н.
Евгений Парфенов
Николай Гуренко
Александр Корнилов**

Обзор и систематизация известных структур и схем основных узлов ВИИП

Помимо своего прямого функционального назначения — циклической зарядки выходного емкостного накопителя, ВИИП обязан обеспечить сохранение качества электроэнергии питающей сети, параметры которого рассмотрены в [1].

В связи с этим рассматриваются только такие структуры ВИИП, с помощью которых принципиально возможно решение основной задачи — локализации импульсных возмущений со стороны импульсных потребителей в автономных системах централизованного электроснабжения переменного тока ограниченной мощности. Они отличаются массо-габаритными, энергетическими и другими характеристиками, и важно сделать обоснованный выбор конкретных схем ВИИП в зависимости от технических требований и условий применения [2–10].

Структурные схемы ВИИП с постоянным входным током

Классификация и анализ схем показали, что рациональными структурами ВИИП, обеспечивающими постоянство входного сопротивления, то есть сохранение качества напряжения сети, являются (рис. 1–5):

- ВИИП с электромашинным преобразователем;
- ВИИП с индуктивно-емкостным преобразователем;
- ВИИП с дозатором энергии (емкостным или индуктивным), шунтируемым на время паузы с помощью активного, индуктивного или емкостного элемента;
- комбинированные ВИИП с промежуточным емкостным накопителем, содержащие стабилизатор входного тока и зарядный преобразователь.

ВИИП с электромашинным преобразователем (рис. 1) содержит асинхронный двигатель АД и синхронный генератор Г с электромагнитным или магнитоэлектрическим возбуждением, выпрямитель В и накопительный конденсатор C_n (конденсаторы C_k применены для продольной или поперечной емкостной компенсации реактивности генератора).

К преимуществам таких ВИИП следует отнести относительно малые величины модуляции и нелинейных искажений питающего напряжения, к недостаткам — низкую надежность, ограниченный ресурс из-за вращающихся частей, наличие шума и вибраций, относительно низкие КПД и коэффициент мощности.

В состав ВИИП с индуктивно-емкостным преобразователем (ИЕП) (рис. 2), помимо ИЕП, входит повышающий трансформатор Тр, выпрямитель В, шунтирующий ключ К и накопительный конденсатор C_n .

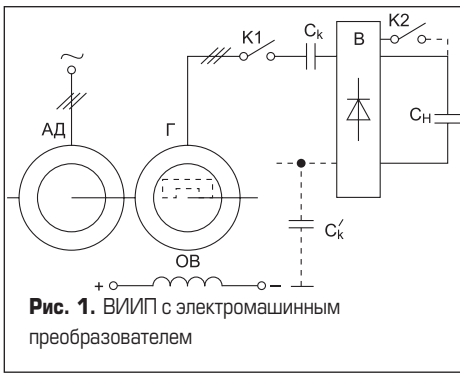


Рис. 1. ВИИП с электромашинным преобразователем

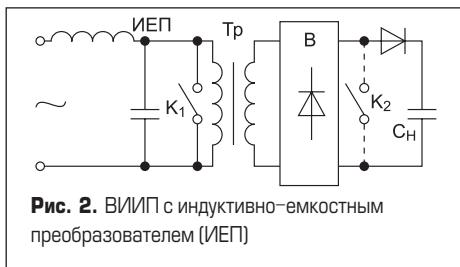


Рис. 2. ВИИП с индуктивно-емкостным преобразователем (ИЕП)

Указанная структура характеризуется отсутствием демпфирующего промежуточного накопителя. Сглаживание низкочастотных возмущений в сети из-за зарядных процессов осуществляется путем перераспределения потребляемой мощности между активной и реактивной составляющими.

Шунтирование ИЕП может выполняться как в цепи переменного (ключ K_1), так и постоянного тока (ключ K_2).

Достоинствами ВИИП с ИЕП являются простота, надежность и высокий КПД, недостатками — низкий коэффициент мощности и наличие модуляции потребляемой активной мощности.

В состав ВИИП с дозатором энергии, шунтируемым в паузе, входят: входной выпрямитель с L_C -фильтром (Φ), дозатор энергии — емкостный C_d (ЕДЭ) или индуктивный L_d (ИДЭ), шунтирующий элемент — активный ($R_{ш}$), емкостный ($C_{ш}$) или индуктивный ($Dp2$) и емкостный накопитель C_n .

Дозатор энергии обычно представляет собой вторичный источник постоянной мощности, который при фиксированной частоте коммутации ключей (K_1 — ЕДЭ, K_2 — ИДЭ) и при обеспечении полной отдачи энергии дозирующего элемента в нагрузку потребляет из сети постоянную мощность, а следовательно — постоянный ток независимо от изменения нагрузки. Рассмотрим особенности работы каждого из дозаторов при различных шунтирующих элементах.

Емкостный дозатор (рис. 3а) не требует применения схем запирания тиристоров в случае их использования в качестве ключей K_1 и K_2 . КПД емкостного дозатора определяется, в основном, добротностями дросселей $Dp1$ и $Dp2$ и может быть достаточно высоким. При шунтировании с помощью ключа K_4 дроссель $Dp2$ выполняет роль индуктивного накопителя. Частично ту же роль дроссель $Dp2$ выполняет в начальной стадии зарядки емкостного накопителя C_n , что способствует повышению КПД. Установка повышающего трансформатора

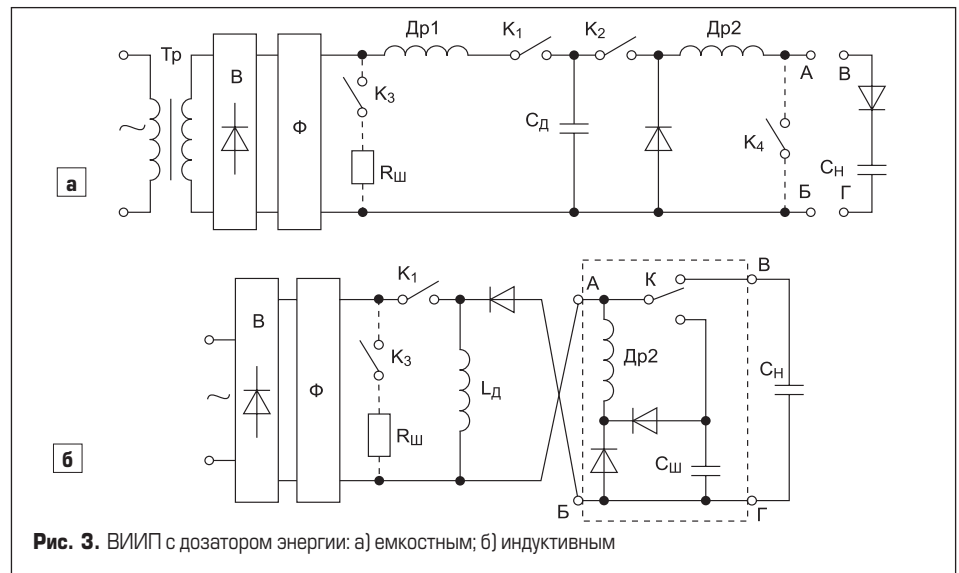


Рис. 3. ВИИП с дозатором энергии: а) емкостным; б) индуктивным

на выходе емкостного дозатора (с целью использования в качестве ключей K_1 и K_2 низковольтных тиристоров) вызывает снижение КПД, связанное с существенными потерями в стали при ступенчатом напряжении и большими потерями в меди из-за разрядки относительно малой емкости на большую.

Индуктивный дозатор энергии (рис. 3б) отличается простотой и надежностью, однако его применение ограничивается в связи такими недостатками, как:

- а) необходимость специальной схемы запирания тиристора в случае его использования в качестве ключа K_1 ;
- б) низкий КПД и большая установленная мощность элементов при существенных величинах емкостей рабочего накопителя и шунтирующего конденсатора ($C_{ш}$) в связи с необходимостью выбора малой величины L_d , а следовательно — большой величины тока I_d , соответствующего дозе энергии $L_d I_d^2 / 2$;
- в) невозможность накопления энергии в индуктивности дросселя (при фиксированной частоте коммутации) во время зарядной паузы и начальной стадии зарядки, что дополнительно снижает КПД.

Применение емкостного шунтирующего элемента $C_{ш}$ при прочих равных условиях повышает КПД системы, но может существенно повысить ее массу при относительно большой величине послеразрядной паузы. Роль дозатора энергии может выполнять также любой модулятор или инвертор с отрицательной обратной связью по потребляемому току, то есть авторегулируемый стабилизатор входного тока.

Характерной особенностью рассмотренных ВИИП является невозможность регулирования зарядного тока в процессе зарядки при обеспечении постоянства потребляемой мощности.

Недостатки ВИИП с ИЕП и дозаторами энергии устраняются в комбинированных ВИИП (таблица), в которых функции обеспечения постоянства потребляемой мощности и повышения КПД за счет постоянства зарядного тока разделены путем введения дополнительного промежуточного накопителя.

Комбинированные ВИИП содержат: стабилизатор входного тока с выпрямителем, про-

межуточный емкостный накопитель ($C_{ш}$), зарядный преобразователь и рабочий емкостный накопитель.

В качестве нерегулируемого стабилизатора входного тока могут быть использованы: индуктивно-емкостный преобразователь (ИЕП); дозатор энергии — емкостный или индуктивный (ДЭ); токоограничительный дроссель ($Dp_{огр.}$). Регулируемый стабилизатор входного тока может быть выполнен в виде: дросселя насыщения (ДН), магнитного усилителя (МУ), трансформатора с перераспределением напряжения (ТРПН), полупроводникового фазового регулятора (ПФР), инвертора (И) или широтно-импульсного модулятора (ШИМ). Функцией стабилизатора входного тока является регулируемая или нерегулируемая стабилизация либо демпфирование резких изменений входного тока при относительно небольшом изменении напряжения на промежуточном накопителе энергии ($C_{ш}$).

Задача зарядного преобразователя — повышение КПД зарядного процесса за счет равномерности временного распределения токов и минимизации производной изменения напряжения на промежуточном емкостном накопителе. В качестве зарядного преобразователя целесообразно использовать: дозатор энергии (ДЭ); зарядный дроссель с цепью отсечки; инвертор (И) или широтно-импульсный модулятор. При использовании ДЭ и И возможно обеспечение непрерывного регулирования напряжения на рабочем накопителе (по эталону), что позволяет исключить предразрядную паузу, необходимая величина которой определяется нестабильностью параметров элементов ВИИП и питающей сети.

Послеразрядная пауза может быть исключена с помощью (рис. 1–4):

- а) поочередного переключения полярности напряжения рабочего накопителя после каждой его разрядки;
- б) установки полупроводникового коммутатора в разрядной цепи рабочего накопителя;
- в) использования секционирования рабочего накопителя по схеме умножения напряжения.

Таблица. Комбинированные ВИИП

	Стабилизатор входного тока	Промежуточный накопитель	Зарядный преобразователь (ЗП)	Рабочий накопитель
Нерегулируемый	ИЕП	[Схема]	ДЭ	Без коммутатора
	ДЭ		С переключением полярности	
	Дрогр		С коммутацией в разрядной цепи и источником дежурной дуги	
Регулируемый	ДН, МУ, ТРПН	[Схема]	Зарядный дроссель с цепью отсечки	С секционированием
	ПФР		Инвертор (ШИМ)	
	И (ШИМ)			

Недостатком двух последних схем является необходимость установки высоковольтных мощных тиристоров (на токи порядка 1000 А и более).

Указанная комбинированная структура ВИИП, несмотря на сложную зарядную цепь, во многих случаях имеет наилучшие энергетические и массо-габаритные показатели.

Схемы силовой части статических ВИИП

Схема силовой части ВИИП с индуктивно-емкостным преобразователем (ИЕП) показана на рис. 4.

В качестве ИЕП может применяться Г-образная схема Бушера с предвключенными индуктивностями, Т-образная или мостовая схемы с взаимоиндукцией между фазными дросселями ($L_{A,B,C}$ и $L_{a,b,c}$).

Преимущества Г-образной схемы: простота, относительно малая масса, малое воздействие на первичный источник (малая модуляция

питающего напряжения) и практическое отсутствие передачи нелинейных искажений в сеть; недостатки — низкий коэффициент мощности и более низкий КПД.

Т-образная и мостовая схемы существенно выигрывают по коэффициенту мощности и КПД, но проигрывают по массе и влиянию на качество первичного напряжения. При этом особенно высокими энергетическими показателями обладает мостовая схема.

С точки зрения снижения массы ВИИП более рациональным представляется объединение повышающего трансформатора и дросселей ИЕП на одном сердечнике с воздушным зазором.

На рис. 4 показаны два варианта схем шунтирующего коммутатора — с симисторами на переменном токе ($VS_{ab, bc, ca}$) и с тиристорами за выпрямителем ($VS1$ и $VS2$). Для симисторного коммутатора в данной схеме необходима синхронизация его включения с моментом прохождения выходных линейных напряжений ИЕП через ноль.

В ВИИП с дозатором энергии роль нерегулируемого дозатора могут выполнять высокочастотные импульсные преобразователи с емкостным или индуктивным накопителем (дозирующим элементом) при обеспечении полной его разрядки независимо от параметров нагрузки.

По внешнему виду некоторые схемы нерегулируемых дозаторов подобны схемам инверторов, однако принцип работы и конечные эффекты существенно различаются.

В качестве авторегулируемого дозатора могут быть использованы обычные инверторы или широтно-импульсные модуляторы, имеющие цепь обратной связи для стабилизации потребляемого тока (мощности).

Возможные схемы ВИИП с дозаторами энергии весьма разнообразны. Рассмотрим две характерные схемы дозаторов — емкостного и индуктивного (рис. 5 и 6).

Указанные схемы содержат выпрямительно-фильтровой блок (В-Ф), дозатор энергии (ДЭ), шунтирующий элемент (ШЭ), подключаемый на время предразрядной и послеразрядной пауз, и накопительный конденсатор (Н), подключенный к импульсной нагрузке (ИН).

Схема емкостного дозатора (рис. 5) содержит выходной повышающий трансформатор, поэтому тиристоры и дозирующие конденсаторы относительно низковольтные. Однако КПД схемы по отношению к обычным инверторам несколько снижен, а масса трансформатора завышена из-за постоянной составляющей тока и несинусоидальности напряжения первичных обмоток трансформатора.

Установка обратных диодов параллельно дозирующим конденсаторам и соответственно коммутирующего конденсатора (C_k), показанных на рис. 6 пунктиром, позволяет исключить нежелательную частичную перезарядку дозирующих конденсаторов, связанную с ограниченностью значения индуктивности намагничивания трансформатора.

Схема индуктивного дозатора (рис. 5б) содержит два дозирующих трансреактора ($Tr1, Tr2$). КПД у индуктивного дозатора несколько ниже, чем у емкостных. Это связано с необходимостью обеспечения условия, при котором время разрядки дозирующих

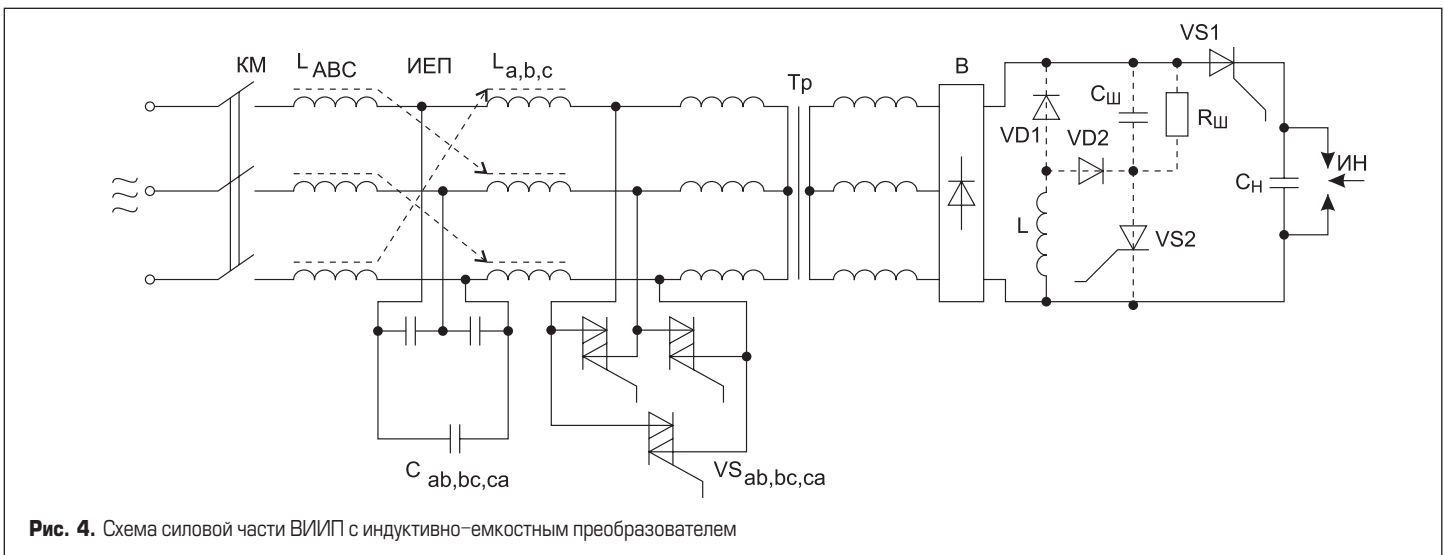


Рис. 4. Схема силовой части ВИИП с индуктивно-емкостным преобразователем

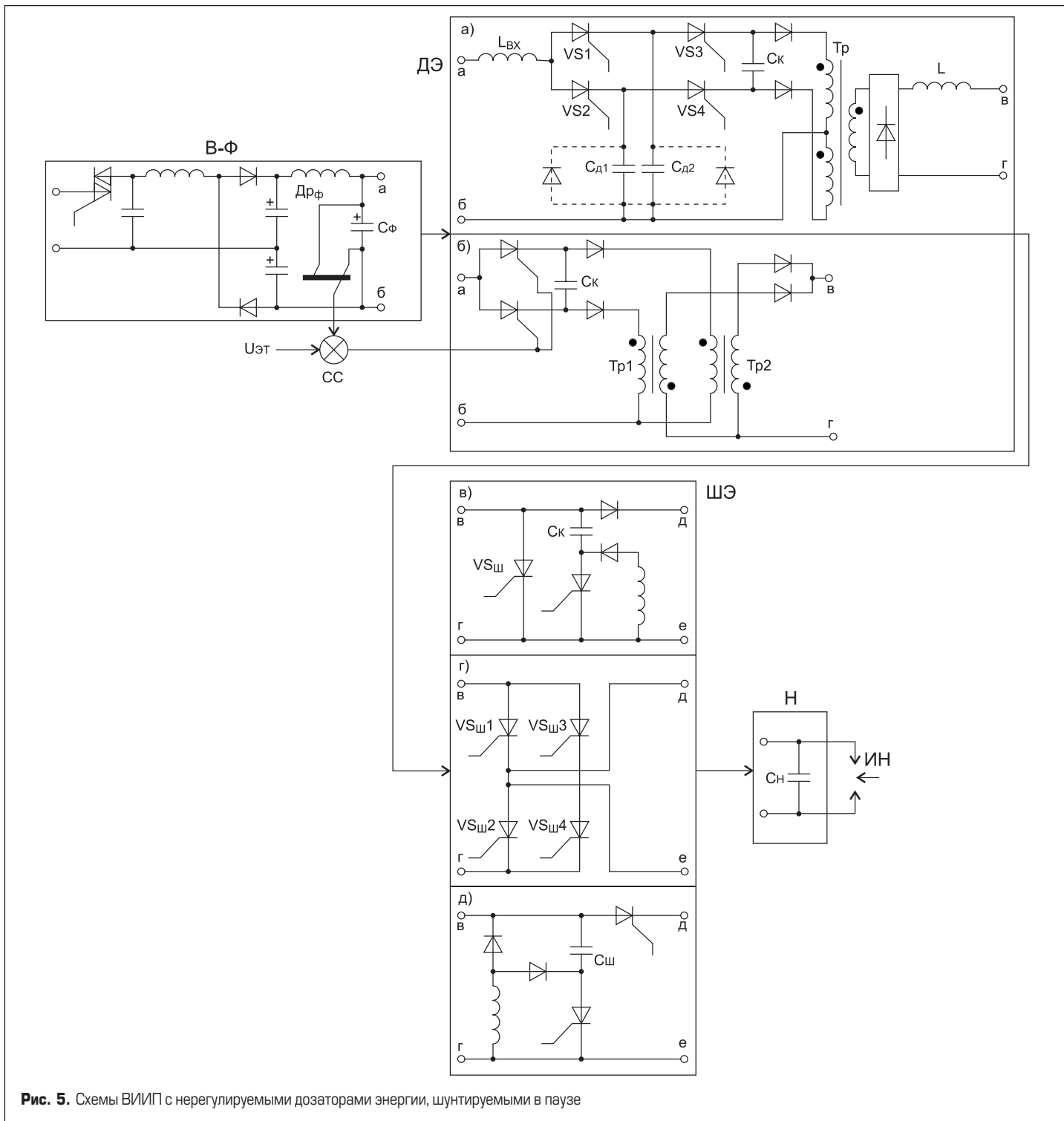


Рис. 5. Схемы ВИИП с нерегулируемыми дозаторами энергии, шунтируемыми в паузе

трансреакторов при разряженном накопителе не превышает половины периода дозирования. При несоблюдении указанного условия при фиксированной частоте управления схема теряет основное свойство дозатора — потребление постоянной мощности, что может быть скомпенсировано изменением частоты управления по обратной связи в функции входной мощности. При этом схема переходит в разряд авторегулируемых дозаторов на основе широтно-импульсных модуляторов. Применение двухобмоточных дозирующих трансреакторов облегчает реализацию указанного условия. Однако в некоторых случаях может оказаться, что коммутирующие тиристоры должны быть

высоковольтными, что снижает достоинства данной схемы.

Шунтирующий элемент (ШЭ) может быть выполнен по следующему схематическому решению (рис. 5): закорачивание тиристором $VS_{ш}$ (рис. 5в), имеющим специальную цепь коммутации; закорачивание тиристорами $VS_{ш1}-VS_{ш4}$ (рис. 5г) с использованием остаточного послезарядного напряжения накопителя для коммутации при совмещении с функцией изменения полярности предзарядного напряжения накопителя; шунтирование вспомогательным накопителем ($C_{ш}$) (рис. 5д).

Выбор схемы шунтирующего элемента определяется относительной длительностью предзарядной и послезарядной пауз, тре-

бованиями к массе и КПД ВИИП и заданной среднециклической мощностью.

Как указывалось ранее, комбинированные ВИИП (рис. 6) содержат два преобразователя — стабилизатор входного тока (СВТ) и зарядный преобразователь (ЗП), развязанные по мгновенной мощности с помощью промежуточного емкостного накопителя ($C_{пн}$). В связи с возможностью регулирования зарядного преобразователя без нарушения постоянства потребляемой от сети мощности представляется целесообразным исключение предзарядной и послезарядной пауз в зарядном токе. Поэтому наряду с обычной схемой включения рабочего накопителя применимы и другие схемы.

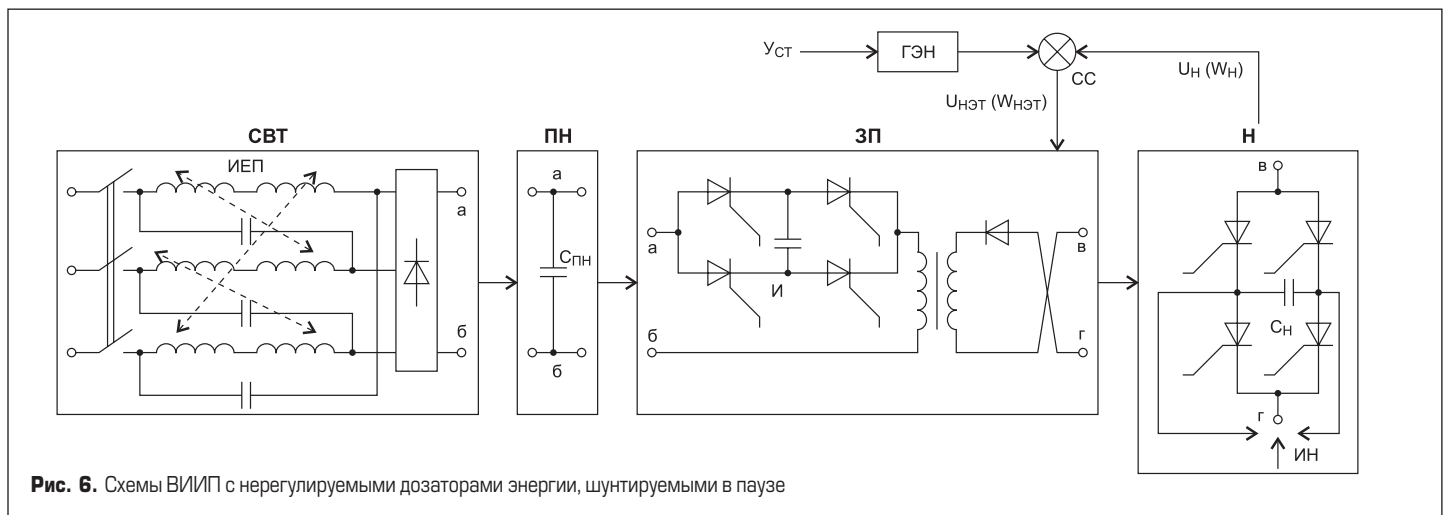


Рис. 6. Схемы ВИИП с нерегулируемыми дозаторами энергии, шунтируемыми в паузе

Судя по рис. 1–3 и данным таблицы, возможны различные схемы стабилизатора входного тока и зарядного преобразователя. Ограничимся рассмотрением только одной схемы с нерегулируемым стабилизатором входного тока (ИЕП) и зарядным преобразователем, выполненным в виде регулируемого инвертора с однополупериодным выпрямлением на выходе трансреактора.

Режим работы ИЕП в схеме комбинированного ВИИП существенно отличается от режима зарядки рабочего накопителя (рис. 2). Шунтирование ИЕП в данном случае может производиться только в аварийном режиме — при отключении зарядного преобразователя. Кроме того, нагрузка ИЕП (противо-ЭДС за выпрямителем) колеблется в относительно небольших пределах. Поэтому схема и параметры выбираемого ИЕП должны не только соответствовать постоянству потребляемого тока (мощности), но и, в основном, оптимальности массо-энергетических показателей. Отметим, что применение повышающего трансформатора здесь не обязательно, что позволяет значительно снизить массу стабилизатора ИЕП.

Управление частотой регулируемого инвертора производится не в зависимости от потребляемого тока, а по определенному закону, с учетом непрерывного регулирования предзарядного напряжения.

На схеме (рис. 6) показан способ включения рабочего накопителя, позволяющий циклически изменять полярность его предзарядного напряжения, что существенно повышает срок службы импульсной лампы и исключает послезарядную (деионизационную) паузу.

Приближенные критерии косвенной оценки массо-энергетических и надежностных характеристик полупроводниковых ключей ВИИП

Для указанной оценки предлагается использовать такие показатели, как среднециклические коэффициенты загрузки полупроводниковых ключей в составе ВИИП (транзисторов, тиристоров, диодов).

Текущее значение коэффициента загрузки в составе модулятора [11]:

$$K_{загр.} = (U_{зап.} I_{откр.}) / P_{преобр.}$$

где $U_{зап.}$ — напряжение в запертом состоянии, $I_{откр.}$ — ток в открытом (вкл.) состоянии, $P_{преобр.}$ — преобразуемая мощность модулятора.

Пусть для зарядного процесса известны временные функции для данного ключа: $U_{зап.}(t)$, $I_{откр.}(t)$, $P_{преобр.}(t)$, где $0 \leq t \leq T_u$ (период цикла). Тогда среднециклическое значение коэффициента загрузки п/п ключа (VT, VS, VD):

$$K_{загр.ср.} \approx \frac{\int_0^{T_u} U_{зап.}(t) I_{откр.}(t) dt}{\int_0^{T_u} P_{преобр.}(t) dt}$$

Приближенное значение $K_{загр.ср.}$:

$$K_{загр.}^* = \frac{(U_{зап.} I_{откр.})_{max}}{P_{преобр. max}}$$

то есть равно отношению максимальных значений, указанных в числителе и знаменателе выражений.

Для оценки результирующих среднециклических коэффициентов загрузки всех однотипных п/п ключей (VT, VS, VD) в составе ВИИП можно использовать выражения:

$$K_{результ.}^{*VT-n} \approx \frac{1}{2P_{ср.}} \sum_{n=1}^N K_{загр.ср.}^{*VT_n} P_{преобр. max.n}^{*VT_n}$$

$$K_{результ.}^{*VS-k} \approx \frac{1}{2P_{ср.}} \sum_{k=1}^K K_{загр.ср.}^{*VS_k} P_{преобр. max.k}^{*VS_k}$$

$$K_{результ.}^{*VD-m} \approx \frac{1}{2P_{ср.}} \sum_{m=1}^M K_{загр.ср.}^{*VD_m} P_{преобр. max.m}^{*VD_m}$$

где N, K, M — число силовых транзисторов, тиристоров и диодов соответственно, $P_{ср.} = (C_H U_{Hmax}^2) / 2T_u$ — среднециклическая мощность ВИИП.

Рассмотренные показатели весьма полезны при сравнительной оценке схемотехнических вариантов ВИИП или их узлов, так как косвенно (с учетом частоты и других характеристик) характеризуют массу, габариты, тепловые потери и надежность основных п/п элементов.

Для частотных электромагнитных и конденсаторных элементов можно применять похожие, но другие среднециклические показатели. Промежуточные (буферные, фильтровые) емкостные накопители и дроссели (трансреакторы) с существенными постоян-

ными составляющими напряжения и потокоцепления, соответственно, помимо массо-реактивно-мощностных характеристик должны включать и массо-энергетические характеристики (с учетом максимальной накапливаемой энергии).

Литература

1. Резников С., Бочаров В., Парфенов Е., Гуренков Н., Корнилов А. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость вторичных источников импульсного питания с автономными системами электроснабжения переменного тока. Часть I. Критерии эффективности схемотехнических средств // Силовая электроника. 2009. № 3.
2. Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Малышков Т. М., Резников С. Б. и др. Транзисторные преобразователи электрической энергии. М.: АОЗТ «Ирбис», 2002.
3. Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Резников С. Б. Вторичные источники импульсного питания (ВИИП) // Практическая силовая электроника. 2001. № 2.
4. Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Резников С. Б. Генераторы импульсов тока с демпфированием потребляемой мощности // Практическая силовая электроника. 2002. № 7.
5. Бут Д. А., Алиевский Б. Л., Мизюрин С. Р., Васюкевич П. В. Накопители энергии / Учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. Булатов О. Г., Иванов В. С., Панфилов Д. Н. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии. М.: Радио и связь, 1986.
7. Маршак И. С., Дойников А. С., Жильцов В. П. и др. Импульсные источники света. М.: Энергия, 1978.
8. Чиженко И. М., Бердинских Г. С. Зарядные устройства емкостных накопителей энергии. Киев: Наукова думка, 1980.
9. Волков И. В., Вакуленко В. М. Источники электропитания лазеров. Киев: Техника, 1976.
10. Вакуленко В. М., Иванов Л. П. Источники питания лазеров. М.: Советское радио, 1980.
11. Petersen L., Andersen M., Two-stage Power Factor Corrected Power Supplies: The Low Component — Stress Approach // IEEE Applied Power Electronic Conference. APEC 2002.