ТОК УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ В ДВУНАПРАВЛЕННОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ГИБРИДНОЙ ШИМ

ЮРИЙ СЕНЯКИН, инженер

Двунаправленный преобразователь с двухтактной безмостовой топологией (totem pole) и гибридной ШИМ, в котором используются широкозонные полупроводники на основе GaN, обеспечивает более высокую плотность мощности и более высокий КПД по сравнению с другими топологиями. Однако недостатком такого преобразователя является наличие тока утечки на частоте сетевого напряжения питания. Мы рассмотрим механизм появления этого тока утечки и его прохождение через электрические схемы.

ДВУНАПРАВЛЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С БЕЗМОСТОВОЙ ДВУХТАКТНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

Двунаправленный преобразователь с безмостовой двухтактной топологией (totem pole), в котором используются только GaN-ключи, показан на рисунке 1. Он состоит из двух полумостов. Полумост, который переключается на высокой частоте, называется ВЧ-плечом. Второй полумост, переключающийся на частоте сети, называется НЧ-плечом [1]. В режиме коррекции коэффициента мощности (ККМ) энергия отбирается из сети, а в режиме рекуперации подается в сеть с коэффициентом мощности, близким к единице.

Y-конденсаторы на стороне постоянного тока представляют собой фильтр электромагнитных помех (ЭМП) или паразитные конденсаторы фотоэлектрической панели либо нагрузки. В этой топологии высокочастотные коммутационные устройства жестко переключаются и в режиме ККМ, и в режиме рекуперации, когда схема работает как инвертор. Такая топология обеспечивает превосходную эффективность и удельную мощность. Недавно появившиеся полупроводниковые устройства с широкой запрещенной зоной идеально подходят для применения в этой топологии, поскольку у них почти нулевой заряд обратного восстановления внутреннего диода. Благодаря относительно малым коммутационным потерям в этих устройствах они отлично выполняют свои функции в режиме непрерывной проводимости (CCM) в двунаправленных безмостовых топологиях с двухтактными каскадами. Потери проводимости в преобразователях такого типа тоже меньше по сравнению с традиционным ККМ из-за отсутствия сетевого выпрямителя. Таким образом, двунаправленные безмостовые преобразователи, в которых используются только полупроводники на основе GaN, является предпочтительным выбором для реализации высокой эффективности и удельной мощности в таких приложениях как серверы и источники питания для телекоммуникационного оборудования, двунаправленные бортовые зарядные устройства и инверторы солнечной энергии.

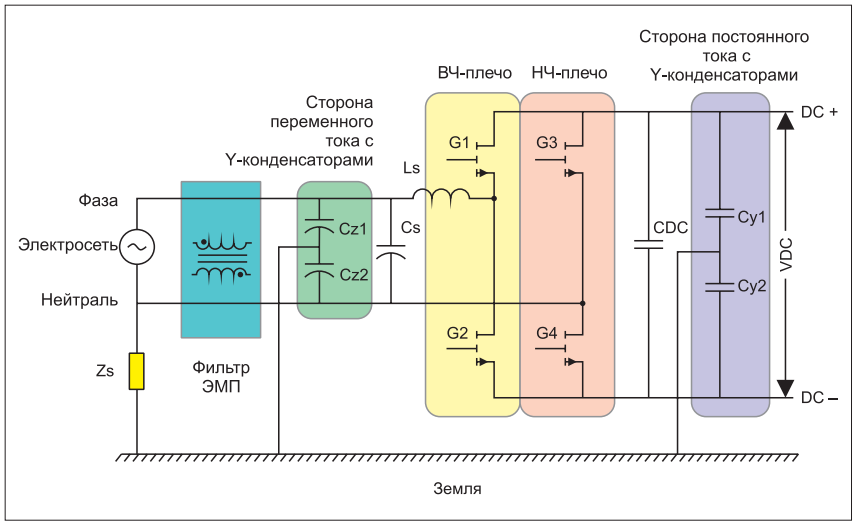

Рис. 1. **Двунаправленная безмостовая двухтактная топология (totem pole)**

ГЕНЕРАЦИЯ ТОКА УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ В БЕЗМОСТОВОЙ ТОПОЛОГИИ

Из рисунка 2а видно, что средняя точка Y-конденсаторов Cy1 и Cy2 шины постоянного тока подключена к земле. Это значит, что Cy2 включен между отрицательной клеммой постоянного тока и землей (см. рис. 2б). При любом изменении напряжения между отрицательным выводом постоянного тока и землей начинается заряд или разряд Cy2 [2]. Напряжение между отрицательным выводом постоянного тока и землей изменяется из-за коммутации ключей G2 и G4.

Из-за того, что ток протекает через ключ G4 по тракту с низким импедансом, заряд и разряд емкости Cy2 осуществляется только через ключ G4. При использовании гибридной ШИМ ключ G4 переходит из замкнутого состояния в разомкнутое или наоборот только при прохождении сигнала через нулевое значение. В течение всего положительного или отрицательного полупериода напряжение на G4 равно либо VDC, либо нулю. Следовательно, на протяжении этих полупериодов напряжение стока

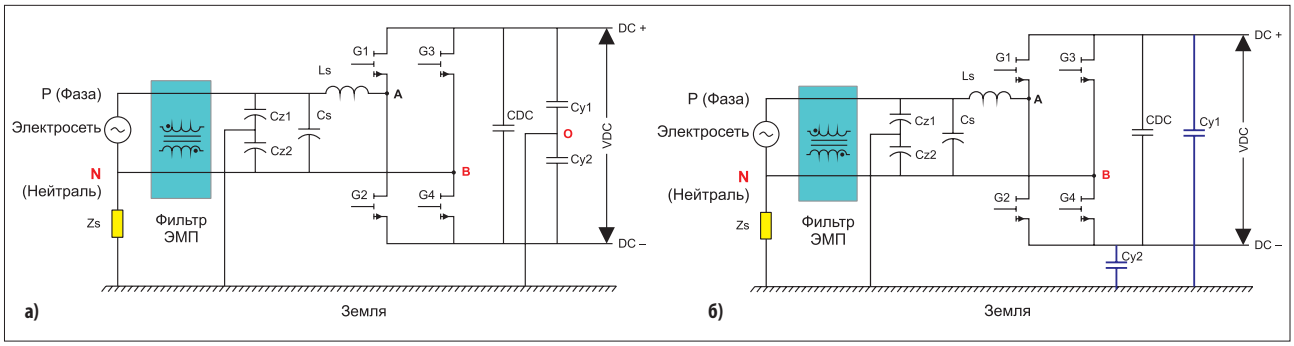

Рис. 2. **Двунаправленный безмостовой преобразователь с: а) Y-конденсаторами; б) Y-конденсатором, установленным рядом с ключом G4**

резко не меняется до напряжения истока G4, и согласно уравнению (1) для тока конденсатора Cy2, он не заряжается и не разряжается, а ток утечки отсутствует. При переходе сигнала через нуль Cy2 «видит» внезапное изменение напряжения из-за резкого скачка напряжения между стоком и истоком G4. В результате возникает всплеск тока, который заряжает или разряжает конденсатор Cy2 в соответствии с уравнением (1):

$$I_{Cy2} = Cy2 \cdot \frac{dV_{CY2}}{dt}. \quad (1)$$

Из-за этого явления происходит утечка тока только при переходе сигнала через нуль. Этот ток увеличивает кондуктивную и излучаемую электромагнитную помеху. Ток утечки также накладывается на ток в сети и нейтрали, может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от направления передачи энергии (из сети или в сеть), что приводит к искажению вблизи перехода сигнала через нуль. Ток утечки прямо пропорционален скорости изменения напряжения на паразитном или Y-конденсаторе. Эта скорость зависит от скорости переключения G4. Если ключ G4 изготовлен на основе GaN, коммутационная скорость выше, чем у любых других полупроводниковых устройств. GaN-ключу требуется 9 нс на замыкание и 15,5 нс – на размыкание [3]. Колебания напряжения заряжают и разряжают паразитные или Y-конденсаторы на стороне постоянного тока.

В приложении с фотоэлектрическими панелями возникает паразитная емкость между фотоэлементом и заземленным металлическим каркасом. Напряжение земли (потенциал между отрицательным выводом постоянного тока и землей) при использовании гибридной ШИМ равно напряжению между стоком и истоком ключа G4. Напряжение на этом паразитном конденсаторе, а значит, напряжение относительно земли резко меняется при переходе сигнала через нуль, который заряжает и разряжает паразитную емкость. Через тело человека, прикоснувшегося к поверхности фотоэлектрической панели, пройдет ток утечки (из-за отсутствия других трактов с низким импедансом). Достаточно высокий ток утечки может травмировать человека.

Y-образные конденсаторы на конденсаторе шины постоянного тока, которые обычно используются в качестве фильтра электромагнитных помех, играют ту же роль, что и паразитная емкость в случае фотоэлектрической панели. При достаточно высоком токе заземления источник питания отключается, нарушая работу двунаправленного безмостового преобразователя.

ДВУНАПРАВЛЕННЫЙ БЕЗМОСТОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ В РЕЖИМЕ ККМ

Во время положительного полупериода (см. рис. 3а) G2 является главным ключом, G1 проводит в обратном направлении с синхронным выпрямлением, а G4 постоянно включен в течение всего этого полупериода. Когда G2 включен, дифференциальный ток течет по тракту P–Ls–A–G2–G4–B–N. Энергия запасается в индуктивности Ls, а конденсатор CDC питает нагрузку.

Когда G1 включен, дифференциальный ток течет по тракту P–Ls–A–G1–CDC–G4–B–N. Конденсатор CDC заряжается от электросети. Накопленная в индуктивности энергия и сетевое напряжение подаются на шину постоянного тока (CDC). Y-конденсатор Cy2, который зарядился при переходе от положительного полупериода к отрицательному, быстро разряжается через G4, а обратный токовый тракт проходит через землю и Y-конденсаторы, включенные между линиями питания и землей. Ток утечки проходит по тракту Cy2–G4–B–Cz2 и далее на землю.

В отрицательном полупериоде (см. рис. 3б) G1 является главным ключом, G2 проводит в обратном направлении с синхронным выпрямлением, а G3 постоянно включен в течение всего полупериода. Когда G1 включен, дифференциальный ток течет по тракту P–B–G3–G1–A–Ls–N. Конденсатор CDC питает нагрузку. Энергия запасается в индуктивности Ls. Когда G2 включен, дифференциальный ток течет по тракту P–B–G3–CDC–G2–A–Ls–N. Конденсатор CDC заряжается. Накопленная в индуктивности энергия и сетевое напряжение подаются на шину постоянного тока. Y-конденсатор Cy2 быстро заряжается при переходе от положительного полупериода к отрицательному, а обратный ток течет через землю. Тракт тока утечки: Cz2–B–G3–CDC–Cy2 и далее на землю.

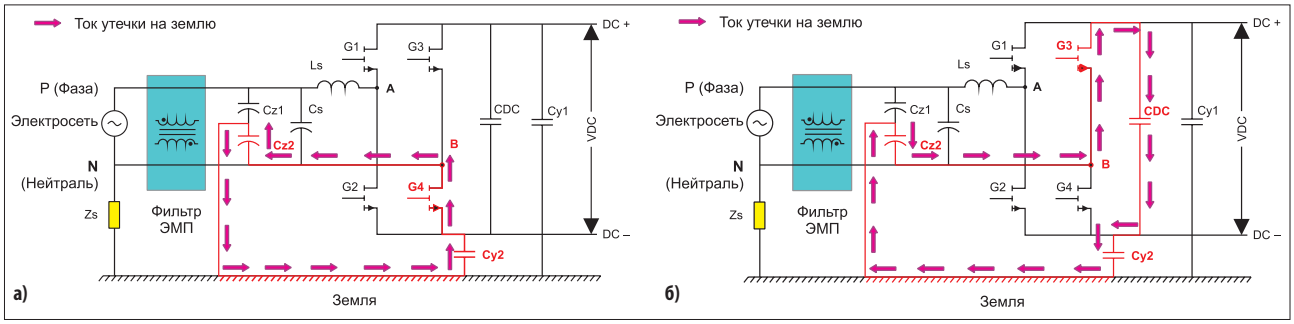

Рис. 3. **Двунаправленный безмостовой преобразователь в режиме ККМ: а) положительный полупериод; б) отрицательный полупериод**

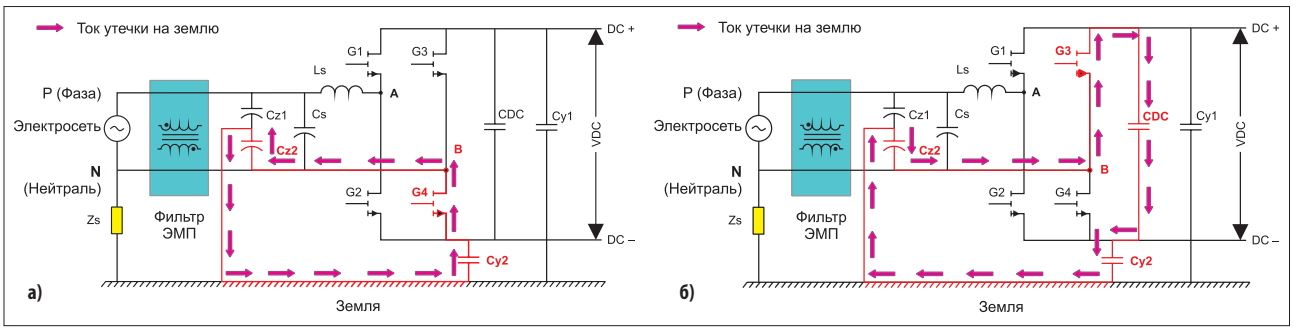

Рис. 4. **Двунаправленный безмостовой преобразователь в режиме рекуперации: а) положительный полупериод; б) отрицательный полупериод**

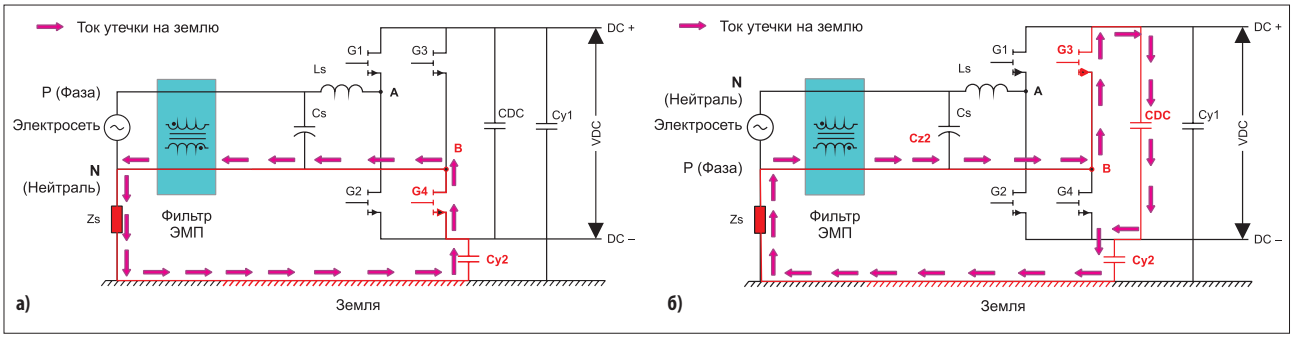

Рис. 5. **Тракт тока утечки при переходе от: а) отрицательного к положительному полупериоду; б) положительного к отрицательного полупериоду в отсутствие Y-конденсаторов в цепи переменного тока**

ДВУНАПРАВЛЕННЫЙ БЕЗМОСТОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАЦИИ (ИНВЕРТОР, ВЕДОМЫЙ СЕТЬЮ)

Во время положительного полупериода (см. рис. 4а) G1 является главным ключом, G2 работает в обратном направлении, используя синхронное выпрямление, а G4 постоянно включен в течение всего полупериода. Когда G1 включен, дифференциальный ток течет по тракту DC (+)–G1–A–Ls–P–N–B–G4–DC (–).

Заряд с конденсатора CDC поступает в электросеть. Когда G2 включен, запасенная в индуктивности энергия проходит по контуру Ls–P–N–B–G4–G2–A. Путь тока утечки аналогичен пути в режиме ККМ в положительном полупериоде.

В отрицательном полупериоде (см. рис. 4б) G2 является главным ключом, G1 проводит в обратном направлении, используя синхронное выпрямление, а G3 постоянно включен в течение всего полупериода. Когда G2 включен, дифференциальный ток проходит путь DC (+)–G3–B–P–N–Ls–A–G2–DC (–). Заряд конденсатора CDC поступает в электросеть. Когда G1 включен, энергия индуктивности проходит по тракту Ls–A–G1–G3–B–P. Путь тока утечки аналогичен пути в режиме ККМ в отрицательном полупериоде.

В отсутствие Y-конденсаторов в цепи переменного тока ток утечки на землю проходит через заземленную нейтраль в цепи переменного тока (см. рис. 4 в–г).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУНАПРАВЛЕННОГО БЕЗМОСТОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАЦИИ

Мы смоделировали схему на рисунке 1 в режиме рекуперации, чтобы подтвердить расчетный путь тока утечки на землю. Моделирование показало, что ток утечки

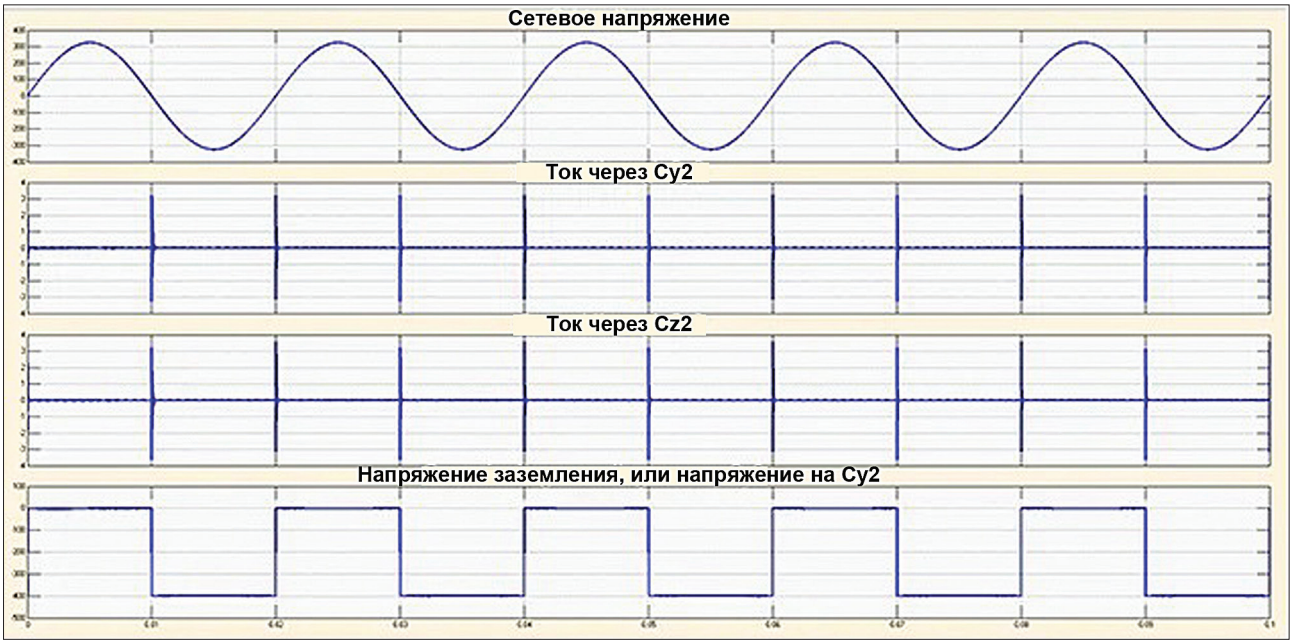

Рис. 6. **Результаты симуляции с использованием гибридной ШИМ в режиме рекуперации (инвертор, ведомый сетью)**

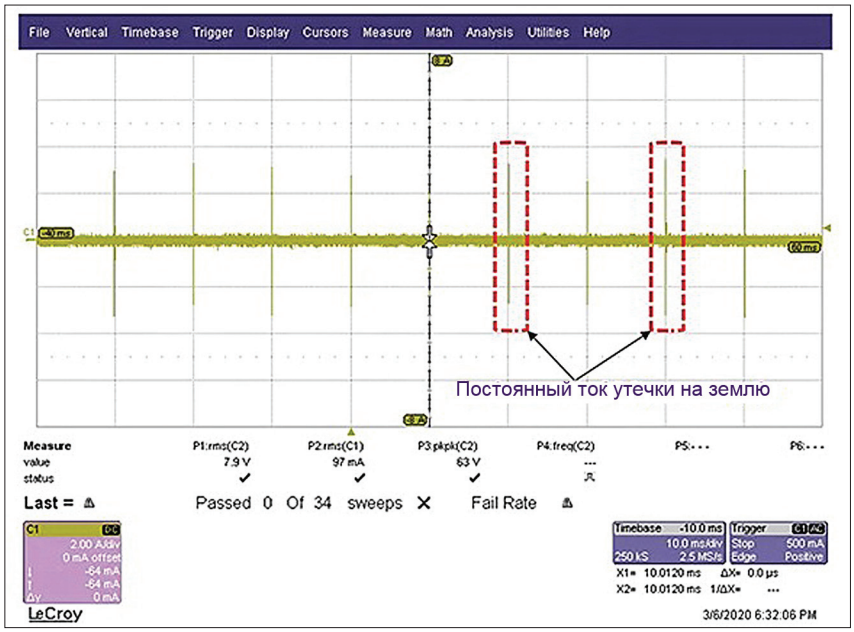

Рис. 7. **Экспериментальные результаты измерения тока утечки на землю источника питания**

на землю наблюдается только при переходах через нуль. Было также установлено, что ток через Y-конденсатор Cz2 в цепи переменного тока является тем же током, который протекает через Y-конденсатор Cy2 в цепи постоянного тока. Симуляция показала, что напряжение на Cy2, которое меняет состояние только тогда, когда меняется состояние G4, аналогично напряжению между стоком и истоком G4.

ПРОВЕРКА НА ПРАКТИКЕ

Чтобы подтвердить результаты моделирования, на основе схемы на рисунке 1 был создан инвертор, работающий в режиме рекуперации. На рисунках 6–7 хорошо видны крутые импульсы тока при переходе через нуль. Эти импульсы появились в результате резкого изменения напряжения заземления, которое заряжает или разряжает Cy2, и совпадают с результатом моделирования.

ВЫВОДЫ

Поскольку обратный тракт тока утечки проходит через землю, он нарушает защиту программируемого источника постоянного тока или нагрузки, приводит к сбоям в работе оборудования и создает угрозу безопасности человека.

Мы проанализировали основную причину появления тока утечки, имеющего острые края на частоте сетевого напряжения, а также пути его прохождения в разных режимах преобразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ray-Shyang Lai, K. D. T. Ngo. A PWM Method for Reducing the Switching Loss in a Full-Bridge Inverter. IEEE Trans. Power Electronics. Vol. 10. Issue 3. No. 4. May. 1995.

2. Kerekes, T. (2009). Thesis on «Analysis and Modeling of Transformer less Photovoltaic Inverter Systems». Aalborg University.

3. VisIC Technologies. V22TC65S1A – GaN Power Switch Datasheet. Feb. 2020.