

# Побистор или IGBT

## и имитационное моделирование устройств на них

**Владимир Дьяконов,  
д. т. н., профессор**

vpdyak@yandex.ru

**П**ервый прибор класса IGBT был создан в СССР еще в 1977 г. и назван побистором. На него было получено авторское свидетельство СССР на изобретение с запретом опубликования в открытой печати. В последующем приборы этого класса стали массовыми изделиями, вместе с мощными полевыми транзисторами существенно потеснившими на рынке мощные биполярные транзисторы и тиристоры, и были признаны перспективными для применения в электроэнергетике. В статье описано развитие этого класса приборов и имитационное моделирование преобразователей электроэнергии на них в системах MATLAB R2010a и Simulink 7.5 новейших версий. Оно очень полезно ввиду дороговизны новых приборов, позволяет проводить моделирование различных по физике работы устройств и заметно сократить сроки исследований, разработки и проектирования изделий с ними.

### От лавинных транзисторов к полевым

Сейчас уже ни у кого не вызывает сомнения, что создание мощных переключающих и силовых полупроводниковых приборов, широко используемых в самых различных энергетических устройствах (от импульсных источников питания до крупных энергетических установок, преобразователей и устройств электропривода), стало возможным благодаря применению технологии полевого механизма управления. Мощные биполярные транзисторы в последнее десятилетие все чаще и чаще вытесняются мощными полевыми транзисторами, а тиристоры, оставаясь наиболее массовыми ключевыми приборами, заменяются побисторами, или «биполярными транзисторами с полевым управлением» IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors).

Многие годы по ключевым свойствам биполярные транзисторы намного превосходили полевые. Но, к сожалению, в обычном режиме работы они вели себя далеко не лучшим образом. Целый ряд фундаментальных физических явлений (накопление избыточных зарядов при включении, насыщение структуры, неравномерность распределения плотности тока по площади эмиттера, расширение базы вследствие эффекта Кирка и вызванное этим падение усилительных и частотных свойств и т. д.) сильно препятствовали росту рабочих токов и мощностей биполярных транзисторов. Серьезным их недостатком стала значительная задержка выключения при насыщении транзистора, связанная с рассасыванием зарядов избыточных носителей в его базе. Все эти минусы связаны с инжекционным механизмом управления биполярным транзистором и медленным механизмом диффузионного (лишь частично дрейфового) переноса носителей тока.

В конце 60-х годов ушедшего века было установлено, что в лавинном режиме работы перекрытие базовой области биполярного транзистора областью

объемного заряда коллекторного перехода, наступающее при высоких напряжениях на коллекторе (позже было установлено, что и при больших токах коллектора также), делает механизм перемещения носителей в базовой и коллекторной областях полевым (дрейфовым) и резко уменьшает время включения — порою до 1 нс и меньше [1–3]. В течение малого физического времени работы биполярного транзистора в лавинном режиме были реализованы потенциально теоретически возможные рабочие токи и напряжения с минимальным временем включения.

К середине 70-х годов автором и его научной школой в Смоленском филиале МЭИ были опубликованы многие десятки основополагающих работ по теории и применению лавинных транзисторов, включая первую в мире монографию по ним [1]. Были установлены первые научные связи с ведущей советской фирмой по созданию полупроводниковых приборов и интегральных микросхем — НИИ «Пульсар» (Москва). Мы приняли участие в создании первого советского лавинного транзистора ГТ338 [1] (руководитель разработок Ю. А. Кузнецов, позже ставший заместителем директора по научной работе). Эти работы продолжаются и в наше время [2, 3].

Однако уже в те далекие годы стало ясно, что лавинные транзисторы — приборы уникальные и могут применяться в импульсных схемах для генерации очень коротких мощных импульсов с большой скважностью и малой средней мощностью. В обычных силовых схемах лавинный режим был скорее вредным, чем полезным явлением, и изучался как фактор, ограничивающий область безопасной работы ключевых схем. Но уникально высокое быстродействие лавинных транзисторов заинтересовало некоторые фирмы. В середине 70-х годов кафедру посетила делегация из крупного научно-производственного объединения НПО «Элас» зеленоградского Центра микроэлектроники, входящего в состав военно-промышленного комплекса (ВПК) СССР тех лет. Нам было предложено взяться за крупную закрытую НИР по проблеме создания высоковольтных и силовоточных быстродействующих и сверхбыстродействующих источников импульсов. Не без колебаний мы согласились. Причины сомнений очевидны — физически было невозможно обеспечить одновременно большие рабочие напряжения полупроводниковых приборов с большими токами, особенно в условиях их высокого быстродействия. Промышленной базы для производства таких приборов в Смоленском филиале МЭИ не было, и это обрекало наши разработки на длительный путь внедрения и закрепляло за ними уникальный (т. е. не массовый) характер. Но в те годы ВПК СССР не жалел денег на фундаментальные научные работы, тема была открыта и хорошо профинансирована. Кафедра быстро оснастилась самой современной измерительной аппаратурой тех лет — высокочастотными стробоскопическими и высокоскоростными осциллографами, генераторами наносекундных импульсов,

цифровыми вольтметрами и т. д. Не было затруднений и в получении массовых и опытных радиокомпонентов, включая транзисторы различных типов.

Работа с НПО «Элас» помогла нам расширить связи с другими научными учреждениями: НИИ «Пульсар», НПО «Полюс» и т. д. В те годы связь вузов с научными учреждениями поощрялась и была взаимовыгодной. Разработчики получали возможность привлечь к своим разработкам ученых и студентов. Высшие учебные заведения принимали широкое участие в фундаментальных исследованиях и публикациях по ним статей и книг, до чего руки вечно занятых разработчиков аппаратуры обычно не доходили. Кроме того, ученые вузов обычно имели более широкие взгляды на изучаемые ими задачи и могли заниматься смежными вопросами, что в отраслевых НИИ и КБ обычно не приветствовалось.

Благодаря связям с фундаментальной и отраслевой наукой (электроникой и микроэлектроникой) мы уже в начале 70-х годов значительно расширили круг своих интересов и занялись исследованиями только-только появившихся мощных полевых транзисторов. Исследуя опытные образцы ВЧ- и СВЧ-полевых транзисторов НИИ «Пульсар», мы выявили их уникальные импульсные свойства: возможность сверхбыстрого (менее 1 нс) переключения, отсутствие насыщения при включении и задержки времени выключения, малые остаточные напряжения и т. д., и поставили вопрос о производстве и развитии мощных ключевых полевых транзисторов [4, 5]. Замечу, что в те годы эти свойства были далеко не очевидны, и серийные полевые транзисторы были маломощными приборами с напряжениями всего до 15–20 В, токами до 15–20 мА и временами переключения в сотни наносекунд. Особых перспектив в импульсных устройствах они не имели, поскольку обладали большими временами переключения (доли микросекунд) из-за больших удельных емкостей структуры и плохих ключевых свойств.

Наши исследования показали, что быстроедействие маломощных полевых транзисторов очень далеко от потенциально возможного из-за больших паразитных емкостей структуры и большой толщины подзатворного диэлектрика. Стало ясно, что только изготовление полевых транзисторов по микроэлектронной технологии способно резко повысить скорость переключения полевых транзисторов. Это достигалось созданием распределенных и многих одновременно работающих параллельно структур мощных приборов. По существу, мощные полевые транзисторы превратились в специализированные интегральные микросхемы.

Переход к микроминиатюрным полевым транзисторам с применением нанотехнологий привел к разработкам фирмами Intel, AMD и IBM уже в начале этого века терагерцевых микротранзисторов с рабочими напряжениями 1–2 В и очень малыми токами. Ныне они широко используются в микросхемах памяти и микропроцессоров, особенно корпорации Intel [6, 7].

Но в те годы перед нами стояла задача реализации высокого быстродействия мощных (силовых) приборов. Приоритет в создании мощных

генераторных ВЧ- и СВЧ-полевых транзисторов для радиопередатчиков принадлежит СССР. Еще в 1973 г. советские полевые транзисторы КП901 и КП902 (руководитель разработок В. В. Бачурин из НИИ «Пульсар») получили Золотую медаль на Международной выставке-ярмарке в Лейпциге. Вскоре были созданы полевые «громадины» — транзисторы КП904, отдающие мощность в десятки ват на частотах до 60 МГц. Максимальная рассеиваемая мощность приборов составляла 75 Вт, а максимальное рабочее напряжение 100 В [8]. Все наши приборы показали прекрасные импульсные и динамические свойства: время переключения КП901 и КП902 достигло 1 нс. Но, будучи устройствами с горизонтальным каналом с высокоомным язычком в стоковой области, они имели большие остаточные напряжения (до 10–15 В).

К сожалению, в те годы внедрение новых идей в изделия электронной промышленности не приветствовалось, и мощные полевые транзисторы развивались, в основном, как ВЧ- и СВЧ-приборы для радиопередающих устройств. Они давали лучшие спектральные характеристики радиопередающих устройств и обеспечивали меньшие взаимные помехи множества радиопередатчиков в зоне боя (самолетных, танковых и т. д.). Остаточные напряжения у таких приборов достигали 10–15 В, а рабочие напряжения не превышали 100 В.

Вслед за приборами с горизонтальным каналом были созданы первые отечественные полевые транзисторы вертикальной структуры с V-образным затвором и практической вертикальным затвором и тонким диэлектриком. Это транзисторы КП905, КП907, КП908, КП911 и КП913. По частотным свойствам (рабочие частоты до 2 ГГц и выше [9]) и скорости переключения в ключевых схемах они превосходили подобные западные серийные транзисторы.

Несколько позже были разработаны первые советские высоковольтные ключевые МДП-транзисторы КП701 и КП702 [10, 11] с рабочими напряжениями до 500 В. В это время разработка мощных переключающих полевых транзисторов была широко развернута во всем мире. Структура полевых транзисторов совершенствовалась, и они стали достойными конкурентами для мощных биполярных транзисторов, превосходя их не только по скорости переключения, но и нередко (хотя и не всегда) по уровням рабочих напряжений и токов. Появились приборы с сопротивлением во включенном состоянии в единицы-десятки миллиом. К этому времени намечилось наше отставание от зарубежного уровня развития силовых полевых транзисторов.

### Как появился побистор (впоследствии — IGBT)

Еще в 1977 г. наша кафедра выполнила для НИИ «Пульсар» НИР «Исследование наносекундных импульсных устройств на мощных СВЧ МДП-транзисторах» (заключительный отчет по ней был сдан в мае 1978 г.). Именно тогда мы впервые исследовали составные транзисторы (рис. 1), в которых мощный МДП-транзистор использовался для запуска еще более мощного

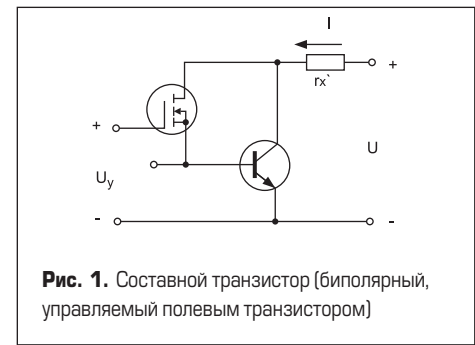


Рис. 1. Составной транзистор (биполярный, управляемый полевым транзистором)

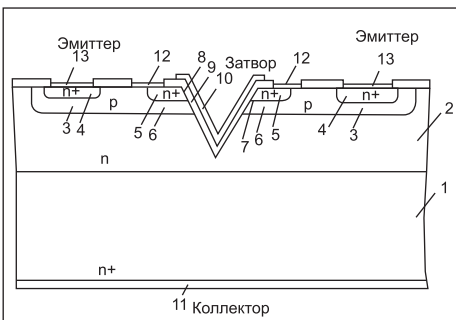
высоковольтного и сильноточного биполярного транзистора [12, 13]. Заметим, что в эти годы биполярный транзистор был более мощным и сильноточным прибором, чем полевой.

Мы обратили внимание на то, что если соединить накоротко сток МДП-транзистора с коллектором мощного биполярного транзистора (рис. 1), то такая структура при малом омическом сопротивлении коллектора (его часто обозначают  $r_x'$ ) принципиально не насыщается при включении и не имеет задержки при выключении, свойственной насыщающимся ключам с биполярными транзисторами. При заданном выходном токе (он определяется током коллектора биполярного транзистора) ключ требует применения менее мощного полевого транзистора с меньшим током стока, который задает ток базы биполярного транзистора (стоит вспомнить, что ток коллектора у биполярного транзистора в  $V$  раз превосходит ток базы, а значения  $V$  составляют десятки раз, где  $V$  — коэффициент передачи тока базы).

Годом позже нами, совместно с сотрудниками НИИ «Пульсар», была подана заявка на изобретение № 2725221 «Полупроводниковый прибор» с приоритетом от 15 февраля 1979 г. Было получено авторское свидетельство СССР № 757051 (рис. 2), зарегистрированное 21 апреля 1980 г. [14].



Рис. 2. Авторское свидетельство СССР № 757051

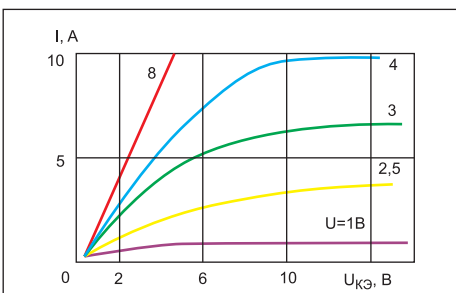


**Рис. 3.** Структура побистора, предложенного в изобретении [14]: 1 — высоколегированная  $n^+$ -подложка; 2 — низколегированная область коллектора, частью которой является область стока; 3 и 4 — области базы и эмиттера биполярного транзистора; 5 — область истока полевого транзистора; 6 — область канала (она же область базы); 7 — проводящая область канала; 8 — V-образная канавка; 9 — изоляционная область затвора; 10 — проводящая область затвора; 11 — проводящая (металлическая) область подложки; 12 — металлический контакт к истоку и базе; 13 — металлический контакт к эмиттеру

Это изобретение не было секретным, но его описание имело гриф «Не подлежит опубликованию в открытой печати». Поэтому, будучи сознательными советскими гражданами тех лет, его авторы не стали упоминать его в статьях, посвященных совместному применению полевого и биполярного транзисторов, которые были опубликованы в последующие годы [12, 13]. Авторам изобретения выплатили премию по 50 советских рублей каждому.

Однако сейчас ясно, что устройства данного класса (мы их назвали побисторами — ПОлевой и БИполярный транзиСТОР) вслед за мощными полевыми транзисторами стали новым и весьма перспективным классом силовых полупроводниковых приборов, названных за рубежом «биполярными транзисторами с полевым управлением» (Insulated Gate Bipolar Transistors, IGBT). За рубежом эти приборы стали упоминаться в литературе с 1985 г., т. е. спустя семь лет с зарегистрированного момента подачи заявки [14]. Большой вклад в их развитие внесли фирмы International Rectifier, General Electric, Mitsubishi Electric, RCA, Hitachi, Vishay и др.

Ныне ограничения на публикацию наших работ давно потеряли силу. Распалась страна,



**Рис. 5.** Семейство ВАХ одного из первых побисторов

Предлагаемый полупроводниковый прибор, благодаря сочетанию в нём достоинств биполярного транзистора (большие токи, крутизна, малые остаточные напряжения) с достоинствами МДП-транзисторов (большое входное сопротивление, отсутствие явлений накопления и медленного рассеивания избыточных зарядов) может найти широкое применение в ВЧ и СВЧ усилителях мощности, в быстропереключающих схемах и других радиотехнических устройствах.

**Рис. 4.** Фрагмент текста из описания изобретения

в которой эти работы были проведены. Не все создатели «побистора» дожили до наших дней. Нам кажется, что сейчас вполне назрело время вспомнить, как развивались события в те годы и чем отличаются сопоставляемые приборы — побисторы и IGBT. Тем более, что не все возможности побисторов реализованы в IGBT даже новых поколений.

В побисторе используется  $n^+ - p - n - n^+$ -структура эпитаксиального биполярного транзистора, управляемого  $n$ -канальным МДП-транзистором в наклонном (почти вертикальным) каналом, показанная на рис. 3.

Побистору присущи все основные характеристики, свойственные этому классу приборов (включая современные IGBT). На рис. 4 представлен отсканированный фрагмент текста из описания изобретения [14], кратко и исчерпывающе отражающий физическую суть нового прибора.

Отметим некоторые особенности побистора, отличающие его от IGBT, причем в лучшую сторону:

- прибор использует структуру  $n^+ - p - n - n^+$ -биполярного транзистора, имеющую лучшие электрофизические параметры, чем  $p - n - p$ -структура IGBT;
- эта структура не имеет дополнительных паразитных или специально созданных слоев;
- отсутствует паразитный биполярный транзистор, который вызывает «защелкивание» при включении IGBT;
- канал полевого транзистора образуется в области, примыкающей к высокоомной  $n$ -области коллектора биполярного, что исключает или сильно затрудняет его насыщение при включении;
- у прибора нетрудно вывести вывод от базы структуры биполярного транзистора, что позволит подключать к ней цепи, резко ускоряющие выключение (например, просто резистор между базой и эмиттером);

- полевой транзистор имеет V-образную структуру, более совершенную и более современную, чем у полевых транзисторов с горизонтальным каналом.

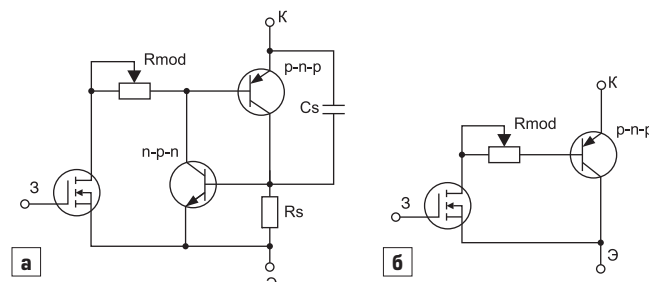
Типичное семейство выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) одного из первых побисторов показано на рис. 5. Напряжение на включенном приборе составляет единицы вольт и значительно меньше остаточного напряжения МДП-транзисторов. Форма ВАХ весьма характерна для приборов рассматриваемого класса.

### А что такое IGBT?

Приборы, называемые ныне IGBT, получили поистине массовую известность. Одна из причин этого — столь же броское, сколь и неточное название (Insulated Gate Bipolar Transistors). Чтобы разобраться в неточностях принципиального характера, рассмотрим типичные структуры первых планарных IGBT. На рис. 6 показан эквивалент IGBT на дискретных приборах.

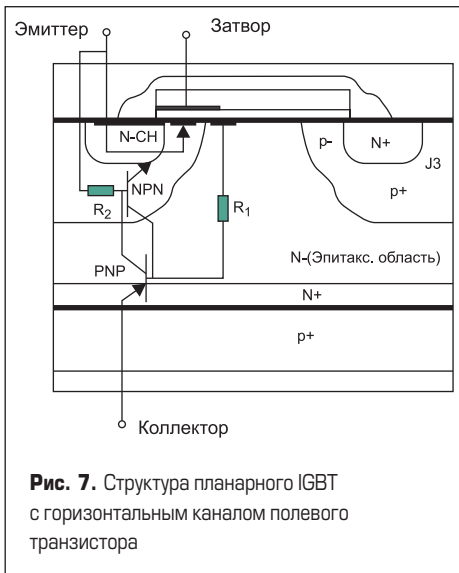
В сущности, IGBT являются комбинацией управляемого напряжением затвора полевого транзистора и тиристора, который, после принятия специальных мер по блокировке паразитного транзистора, становится подобным обычному биполярному транзистору типа  $p^+ - n - p - p^+$ . Никакого полевого управления (или изолированного затвора) основной биполярный транзистор не имеет — он, как обычный биполярный, управляется током базы. Механизм управления при этом инжекционный. Но ток базы создается полевым транзистором, имеющим полевое управление с помощью затвора. Так что на самом деле IGBT вовсе не является биполярным транзистором с полевым управлением.

Схема интегрального прибора, появившегося примерно в 1985 г., показана на рис. 7. Подобная структура была предложена и реализована рядом зарубежных фирм. Самой характерной частью устройства является ниж-



**Рис. 6.** а) Эквивалент IGBT на основе планарных МДП-транзистора и тиристора; б) схема при блокировке паразитного транзистора





**Рис. 7.** Структура планарного IGBT с горизонтальным каналом полевого транзистора

ний тонкий  $p^+$ -слой, позволяющий уменьшить сопротивление коллектора включенного биполярного транзистора. На рис. 7 показана структура тиристора у приборов этого класса. Считается, что двойная инжекция носителей в  $p^+$ -слой коллектора ведет к модуляции (уменьшению) его сопротивления, что снижает падение напряжения на включенном приборе.

Позже появились приборы на основе МДП-транзистора с вертикальным каналом и множество других конструкций, улучшающих характеристики приборов IGBT, но не меняющих сути их работы. А она та же, что у побистора!

Интересен вопрос, почему зарубежные разработчики изначально построили IGBT на основе мощного  $p-n-p$ -транзистора (а не  $n-p-n$ ) в «перевернутом» включении — коллектор биполярного транзистора является эмиттером IGBT. Можно предположить, что они знали о советской заявке [14] и постарались избежать полного копирования структуры этого прибора. Но, скорее всего, они просто взяли за основу прибора вовсе не транзистор, а тиристор, который к этому времени уже прославился как самый силовоточный и высоковольтный прибор. Заблокировав паразитную транзисторную структуру, они получили комбинацию полевого транзистора с биполярным — т. е. прибор с полным управлением и свойствами побистора.

Сейчас, когда термин IGBT стал широко и всемирно известным, вряд ли стоит уподобляться герою, прославившемуся борьбой с ветряными мельницами. Пусть мельница — IGBT — крутится на пользу всему человечеству, тем более, что создатели IGBT во всем мире за три десятка лет добились впечатляющих успехов в создании этого нового класса силовых приборов: уровни их рабочих напряжений выросли до многих киловольт, а токов — до килоампер. Наряду с дискретными одиночными уже давно выпускаются модули с множеством IGBT-приборов. Внешний вид небольшой группы таких модулей, представленных фирмой «Платан» на нашем рынке, можно увидеть на рис. 8. Ныне выпускаются



**Рис. 8.** Внешний вид модулей IGBT, представленных фирмой «Платан»

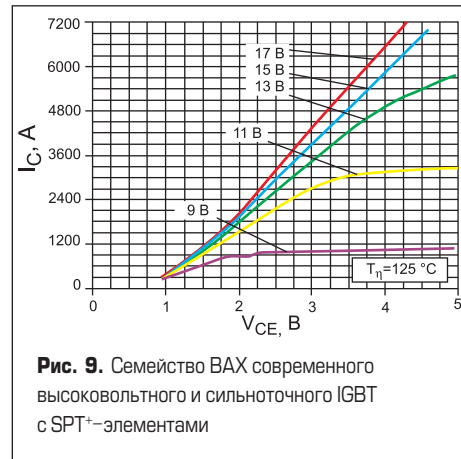
сотни таких изделий, и их цена лежит в пределах от сотен до десятков тысяч рублей.

Некоторые из отдельных приборов и модулей IGBT имеют уникальные технические характеристики и могут применяться в мощных энергетических установках. К примеру, на рис. 9 представлено семейство ВАХ в области малых напряжений силовоточного (до 1,7 кА и выше) IGBT с SPT<sup>+</sup>-элементами [18]. Эти модули имеют максимальные рабочие напряжения до 4,5 кВ [18] и выше. В российском ОАО «Электровыпрямитель» созданы модули IGBT для железнодорожного транспорта для работы в сетях постоянного тока с напряжением 3 кВ и напряжением изоляции до 20 кВ.

Разумеется, сравнивать характеристики первых составных транзисторов и советских побисторов с характеристиками современных модулей IGBT некорректно. Но приоритет есть приоритет, и дискуссия по нему, безусловно, нужна и полезна. Наши приборы до 90-х годов были закрытой разработкой и после развала СССР вообще не развивались. Именно в это время за рубежом было создано несколько поколений полупроводниковых приборов, а также ряд силовых модулей на их основе. В них используются новые и новейшие технологии изготовления [15–18], хотя физические основы их работы и реализуемые преимущества остались прежними.

### Имитационное моделирование преобразовательных устройств на побисторах и IGBT

В начале 90-х годов творческие связи нашей кафедры с предприятиями-заказчиками распались, а автор был вынужден перейти на работу в Смоленский государственный педагогический институт (ныне университет СмолГУ). Основным направлением научных работ стало исследование и внедрение систем

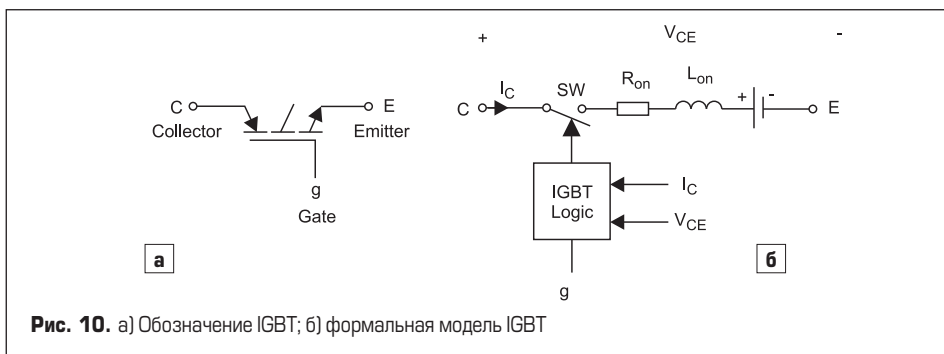


**Рис. 9.** Семейство ВАХ современного высоковольтного и силовоточного IGBT с SPT<sup>+</sup>-элементами

компьютерной математики. В частности, это позволило не забывать о проектировании мощных высокоскоростных импульсных устройств, в том числе побисторов и IGBT, и перевести его в иную плоскость — математического моделирования.

Моделирование IGBT, как и других полупроводниковых приборов, возможно с помощью программ схемотехнического моделирования типа PSpice, DesignLab, MicroCAP, PCAD и использованием достаточно полных моделей приборов. Однако диапазон значений параметров IGBT очень широк. Различны и технологические приемы, применяемые при их создании. Учет всех тонкостей работы приборов в таких программах усложняет их модели и увеличивает время моделирования и число параметров. Часто эти электрофизические параметры моделей пользователю просто неизвестны, и он вынужден брать их «с потолка», что снижает точность моделирования. Кроме того, часто требуется моделирование систем, состоящих из разнородных устройств, в том числе магнитных, механических, гидравлических и т. д. Но, если сравнить рис. 5 и 8, становится очевидно, что семейства ВАХ по качественному их виду мало различаются у первых не очень мощных побисторов и у новейших сверхмощных IGBT. Исследования показали, что они качественно мало отличаются и в динамике переходных процессов переключения. Поэтому широкое распространение получило имитационное макро моделирование электронных схем и устройств на этих замечательных приборах. Их математические макро модели были включены в ряд программных средств.

Пожалуй, одними из самых эффективных и простых являются средства макро моделирования и формальные модели этих приборов,



**Рис. 10.** а) Обозначение IGBT; б) формальная модель IGBT

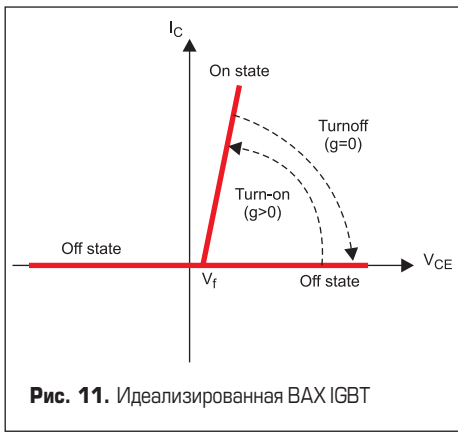


Рис. 11. Идеализированная ВАХ IGBT



Рис. 12. Идеализированные временные диаграммы выключения IGBT

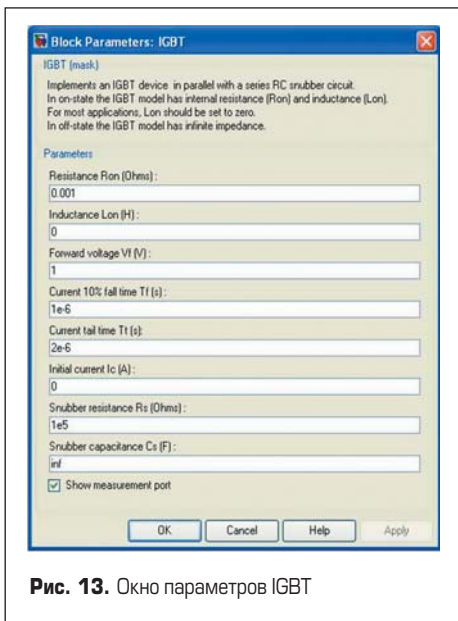


Рис. 13. Окно параметров IGBT

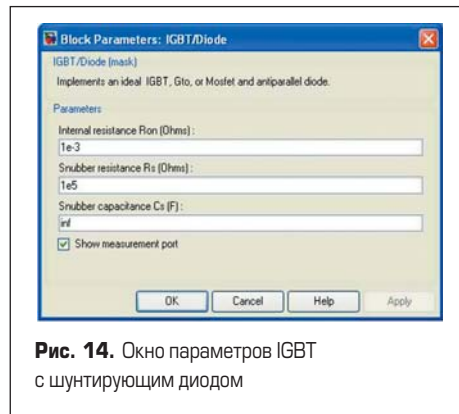


Рис. 14. Окно параметров IGBT с шунтирующим диодом

вошедшие в специальный пакет расширения по мощной энергетике SimPowerSystem матричной системы компьютерной математики MATLAB [19, 20]. Он реализует блочное визуально-ориентированное имитационное моделирование с применением универсального пакета расширения Simulink. Система

MATLAB-Simulink давно стала международным стандартом в области технических расчетов и имитационного математического моделирования технических устройств, в том числе мощной электроники и энергетики.

В библиотеки моделей последних версий пакета SimPowerSystem системы MATLAB-Simulink входят два блока макромодели одиночных IGBT — без шунтирующего диода и с ним. На рис. 10 показано обозначение IGBT и его формальная модель. Она содержит блок логического управления и идеальный ключ SW.

Система параметров модели IGBT предельно проста. Открытый IGBT представляется последовательным сопротивлением  $R_{on}$ , индуктивностью  $L_{on}$  и источником напряжения сдвига  $V_f$ . Таким образом, идеализированная ВАХ прибора соответствует показанной на рис. 11. Она является линейным приближением для рабочего участка ВАХ включенного IGBT.

Идеализированные временные диаграммы выключения IGBT представлены на рис. 12. Процесс выключения разбит на две стадии: спада тока от максимального значения  $I_{max}$  до  $0,1 \cdot I_{max}$  за время  $T_f$  и от значения  $0,1 \cdot I_{max}$  до 0 за время  $T_r$ . Предусмотрено шунтирование выходной цепи, содержащей последовательно включенные резистор  $R_s$  и конденсатор с емкостью  $C_s$  (по умолчанию равные  $10^5$  Ом и бесконечность  $\text{Inf}$ ). Это значит, что по умолчанию IGBT шунтирован сопротивлением  $10^5$  Ом.

Указанные выше характеристики модели задаются в окне параметров IGBT, показанном на рис. 13. Это окно появляется на экране дисплея компьютера, если дважды щелкнуть мышью на блоке IGBT в диаграмме модели. Окно содержит 8 простых параметров (в модели IGBT программы схемотехнического моделирования DesignLab, к примеру, таких параметров 18 [21], и многие из них известны только разработчикам этих приборов).

Второй блок содержит шунтирующий IGBT диод. Окно его параметров представлено на рис. 14. Этот блок часто применяется в схемах с индуктивным накопителем энергии. Диод предотвращает подачу на IGBT напряжения обратной полярности. Идеализированных параметров у этой модели IGBT всего три.

### Моделирование простейшей схемы инвертора с одним IGBT

Приведенные ниже примеры моделирования преобразовательных устройств на IGBT входят в справочную систему новейшей версии системы MATLAB R2010a и пакета Simulink версии 7.5. На рис. 15 показана диаграмма модели про-

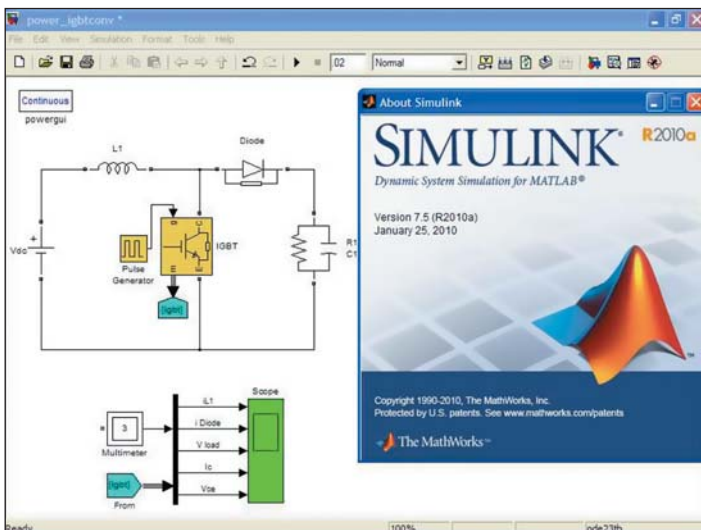


Рис. 15. Модель простейшего однотактного преобразователя на IGBT в окне расширения Simulink программы MATLAB R2010a

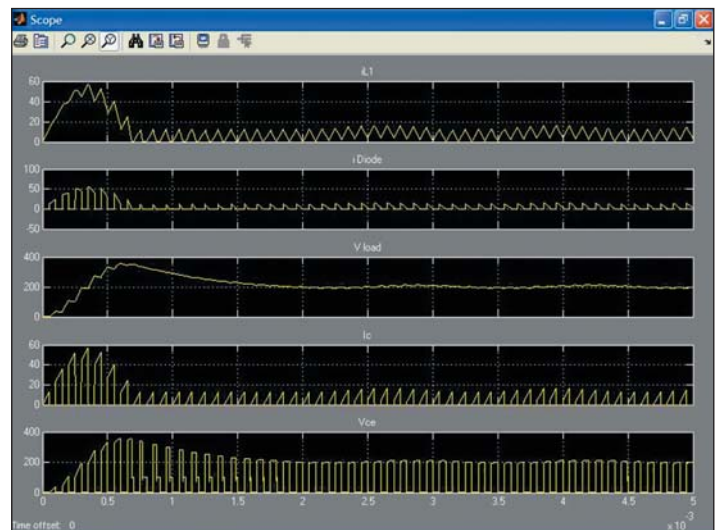


Рис. 16. Окно виртуального осциллографа с графиками переходных процессов

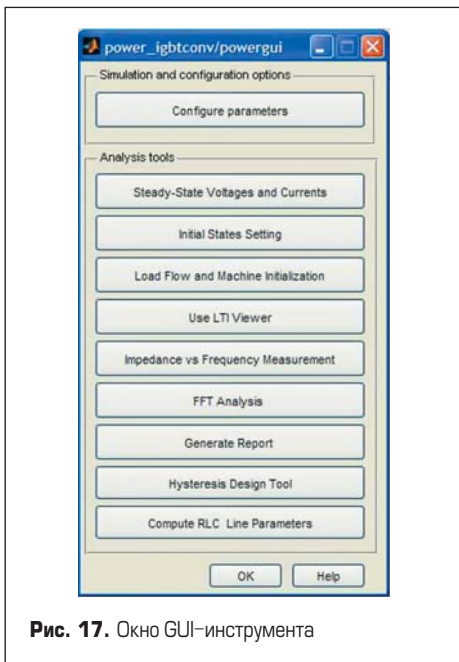


Рис. 17. Окно GUI-инструмента

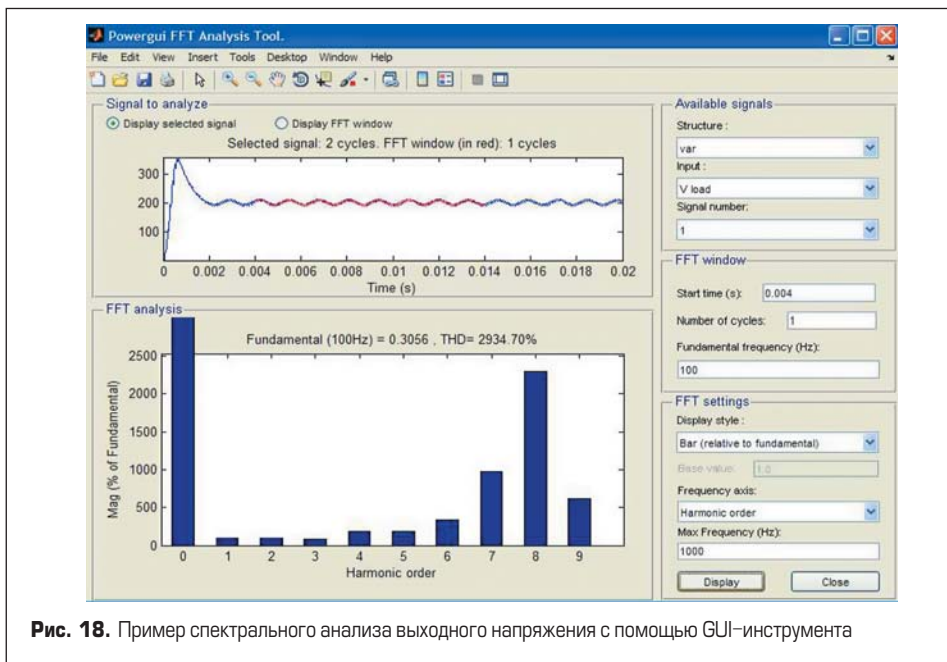


Рис. 18. Пример спектрального анализа выходного напряжения с помощью GUI-инструмента

стейшей преобразовательной схемы на основе IGBT-ключа и индуктивного накопителя энергии с диодом. Преобразователь преобразует входное постоянное напряжение  $V_{dc} = 100$  В в повышенное выходное напряжение  $V_{out} = V_{dc}/(1 - \alpha)$ , где  $\alpha$  — коэффициент заполнения управляющих ключом импульсов. Например, при  $\alpha = 0,5$  преобразователь примерно удваивает входное напряжение при близком к 100% КПД.

При запуске моделирования (нажатием кнопки со знаком ▶ в панели инструментов окна Simulink) представленная в верхнем левом углу диаграмма (модель) устройства запускается на процесс моделирования, параметры и метод которого можно установить в соответствующем окне (меню Simulation). Под диаграммой модели имеется окно многоканального виртуального осциллографа, выдающего семейство «осциллограмм», иллюстрирующих переходные процессы работы моделируемой схемы (рис. 16).

Пакет SimPowerSystem позволяет вставлять в диаграмму моделей специальный блок анализа процессов, реализованный средствами графического интерфейса пользователя GUI (Graphical User Interface). При активизации блока мышью появляется окно этого инструмента (рис. 17).

Из его функционала рассмотрим только возможность выполнения спектрального анализа сигналов методом быстрого преобразования Фурье (FFT) с выделением временным участком исследуемого процесса. Пример такого анализа показан на рис. 18. Спектр строится для фрагмента временной зависимости выходного напряжения после его выброса в начале моделирования. Он выделен линией красного цвета. Первая линия спектра (для нулевой частоты) показана с ограничением ее высоты.

**Моделирование инверторов на двух и четырех IGBT**

На IGBT часто строятся однофазные инверторы, обеспечивающие преобразование постоянного напряжения в переменное почти

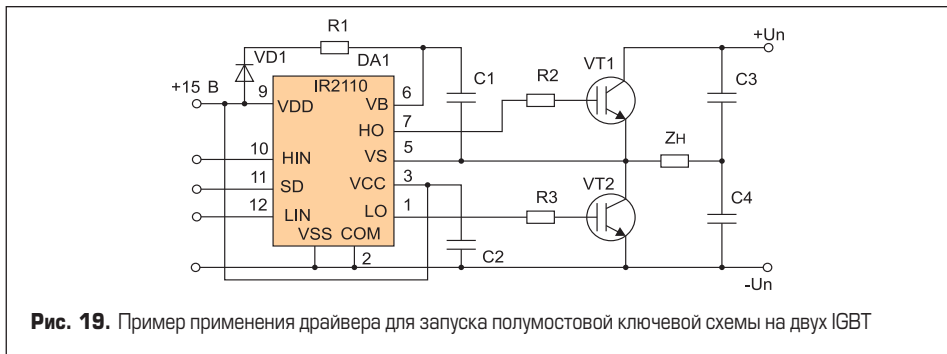


Рис. 19. Пример применения драйвера для запуска полумостовой ключевой схемы на двух IGBT

синусоидальное напряжение (ток) с высоким КПД. Обычно для этого применяются ключи на двух (рис. 19) и четырех IGBT с диодами.

Пример построения моделей инвертора на основе ключа с двумя (сверху) и четырьмя

IGBT (снизу) показан на рис. 20. Это иллюстрирует возможность пакета Simulink осуществлять моделирование в одном окне двух, а при необходимости — и большего числа самостоятельных диаграмм моделей.

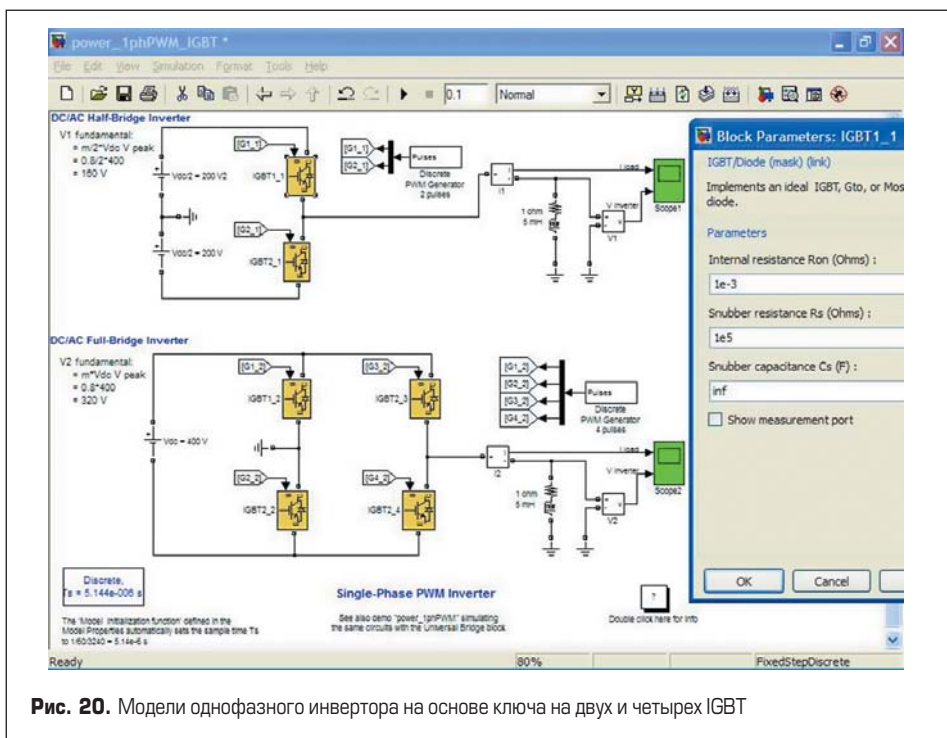


Рис. 20. Модели однофазного инвертора на основе ключа на двух и четырех IGBT



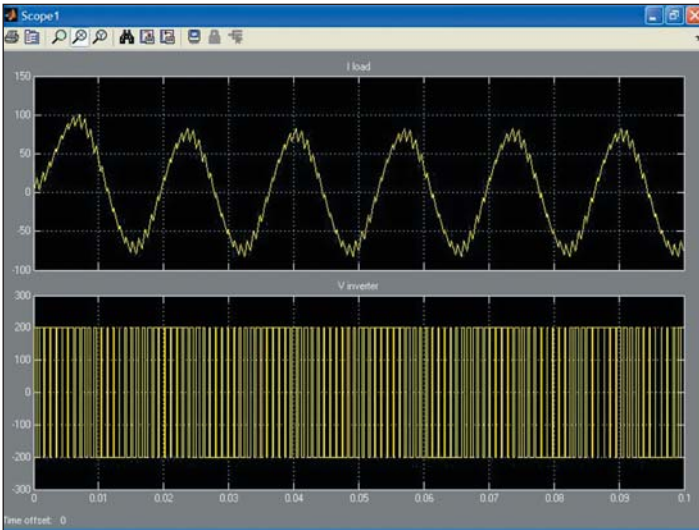


Рис. 21. Окно виртуального осциллографа с графиками переходных процессов для инвертора на двух IGBT

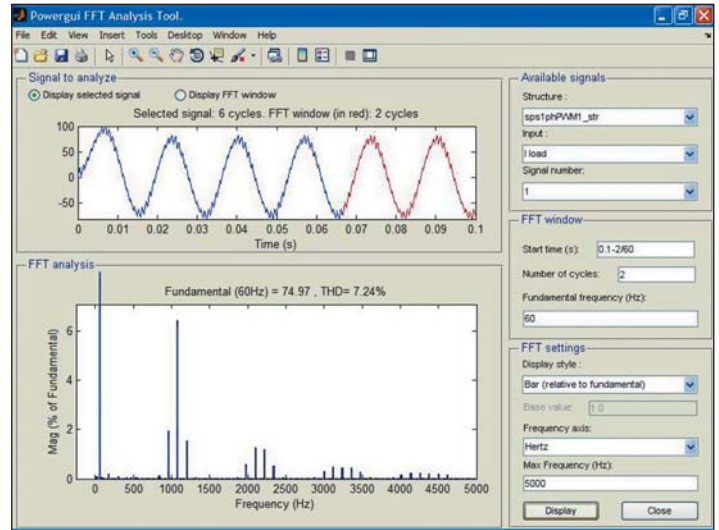


Рис. 22. Пример спектрального анализа выходного напряжения с помощью GUI-инструмента для инвертора на двух IGBT

Для получения напряжения с основной синусоидальной компонентой используется широтно-импульсная модуляция источников питания положительной и отрицательной полярности. Индуктивность сглаживает форму тока. На рис. 21 показаны временные диаграммы работы инвертора с ключами, выполненными на двух IGBT.

С помощью GUI измерительного блока можно выполнить спектральный анализ тока в последовательном контуре (тока нагрузки). Помимо построения спектра, измеряется полный коэффициент гармоник тока. Он для верхней схемы рис. 20 равен 7,24%, т. е. довольно большой. Это видно и из формы тока, которая содержит заметные высокочастотные пульсации, связанные с коммутацией полумостового преобразователя (рис. 22).

Применение мостового инвертора с четырьмя IGBT позволяет существенно улучшить форму выходного тока. Это видно по рис. 23: на нем почти синусоидальный ток

нагрузки содержит куда меньшие высокочастотные пульсации, чем ток в схеме с полумостовым инвертором (рис. 21).

Этот вывод подтверждает и спектральный анализ выходного тока, представленный на рис. 24. Обратите внимание на то, что в этом случае коэффициент гармоник уменьшился до 2,01%, т. е. он примерно в 3,5 раза меньше, чем в случае полумостового однофазного инвертора.

Для более детального просмотра временных зависимостей работы моделируемого устройства достаточно уменьшить время моделирования или выделить на осциллограммах небольшой участок процессов. Эта возможность представлена на рис. 25 и хорошо иллюстрирует детали осциллограмм.

### Моделирование трехфазных управляемых выпрямителей

В состав моделей силовых устройств в Simulink 7.5 входит универсальный модуль

трехфазного управляемого выпрямителя. Он может быть задан на применение любого из приборов, показанных на рис. 26. В их число входит IGBT. Модуль позволяет строить управляемые трехфазные выпрямители с малыми пульсациями выходного напряжения.

Выбор приборов осуществляется в окне параметров трехфазного выпрямителя. Оно показано на рис. 27 с открытой вкладкой выбора приборов. Достоинством такого решения является то, что моделируемая схема выпрямителя может быть построена на любом из приборов, что очень полезно при сравнении таких схем. При этом замена схемы производится сменой типа прибора в окне (рис. 27).

Если, к примеру, выбрать IGBT, то схема блока трехфазного выпрямителя будет иметь вид, показанный на рис. 28. На вход блока подается трехфазное напряжение (фазы А, В, С), на выходе образуется постоянное напряжение с пульсациями. Схемы других выпрямителей этого типа вполне очевидны. Заметим, что

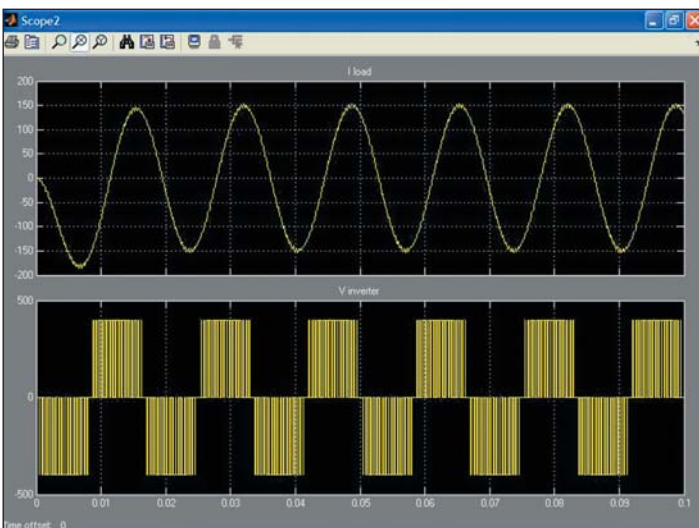


Рис. 23. Окно виртуального осциллографа с графиками переходных процессов для однофазного инвертора на четырех IGBT

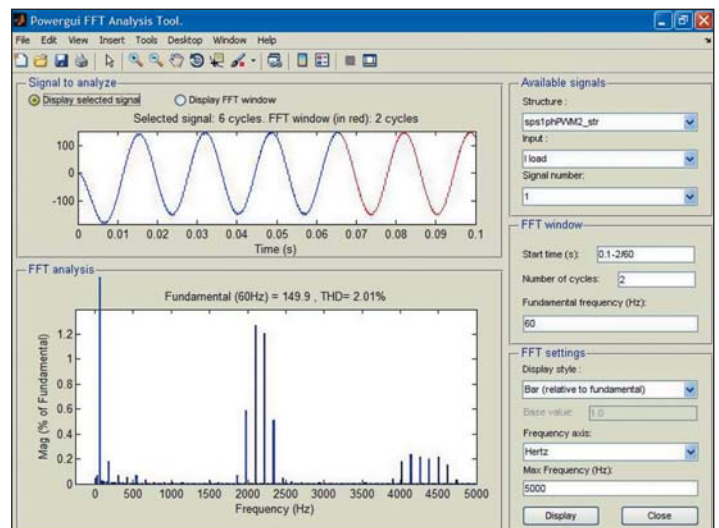


Рис. 24. Пример спектрального анализа выходного напряжения с помощью GUI-инструмента для инвертора на четырех IGBT

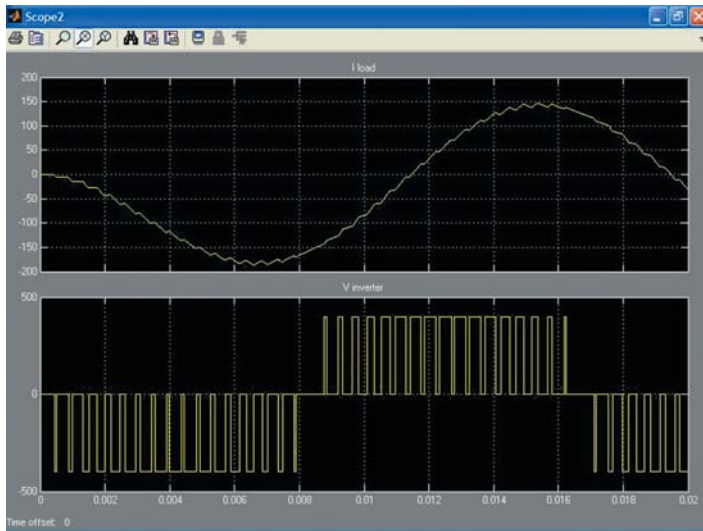


Рис. 25. Пример детального просмотра временных диаграмм работы мостового инвертора

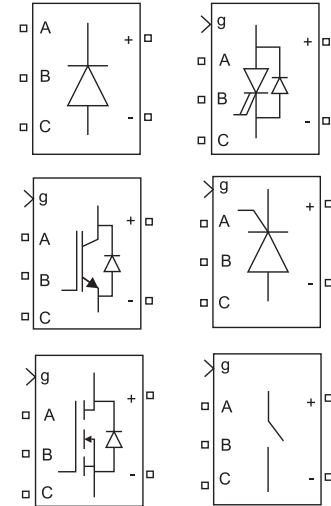


Рис. 26. Силовые приборы, на которых может строиться универсальный модуль трехфазного выпрямителя

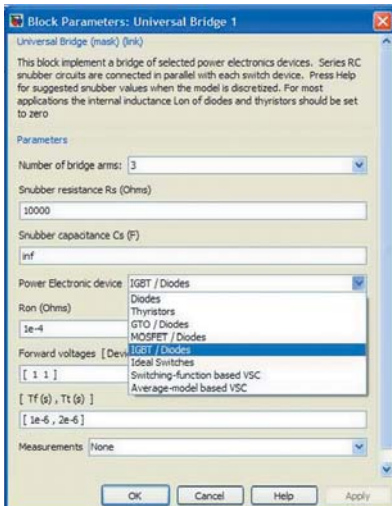


Рис. 27. Окно параметров блока универсального трехфазного выпрямителя

схематичное обозначение блока меняется в зависимости от выбранного прибора.

На рис. 29 показана диаграмма модели мощного (нагрузка до 200 кВт) трехфазного выпрямителя (конвертора переменного тока в постоянный с малыми пульсациями), ра-

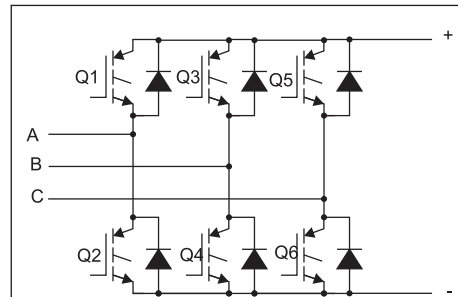


Рис. 28. Модуль трехфазного выпрямителя на шести IGBT

ботающего на временно отключаемую нагрузку. Он построен на основе модуля с шестью приборами IGBT. В диаграмму включены блоки осциллографического контроля, система регулировки напряжения и блок GUI измерителя для определения спектрального состава сигналов.

Временные диаграммы могут контролироваться как отдельными виртуальными осциллографами, так и многоканальным осциллографом. На рис. 30 показан пример контроля выпрямителя отдельными осциллографами.

Полное окно многоканального виртуального осциллографа показано на рис. 31. Оно позволяет судить о сложности переходных процессов при работе моделируемого устройства.

Окно спектрального анализа устройства (рис. 29) представлено на рис. 32. Коэффициент гармоник устройства составляет всего 0,37% для выбранного для спектрального анализа сигнала.

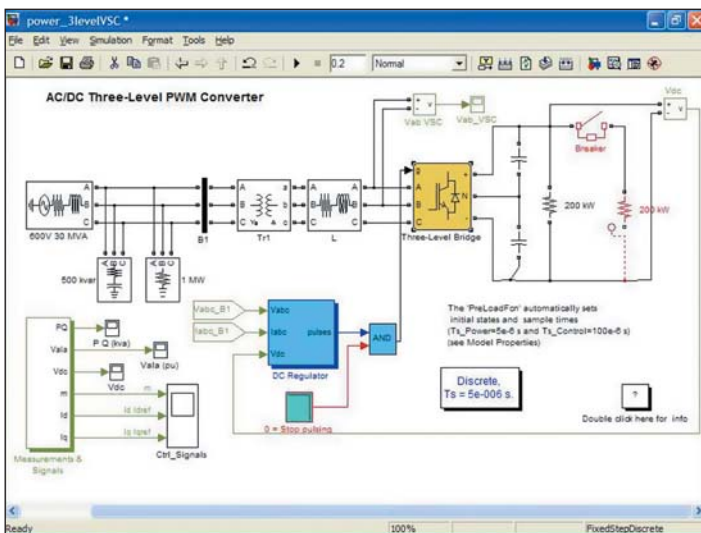


Рис. 29. Диаграмма модели трехфазного выпрямителя, работающего на коммутруемую нагрузку

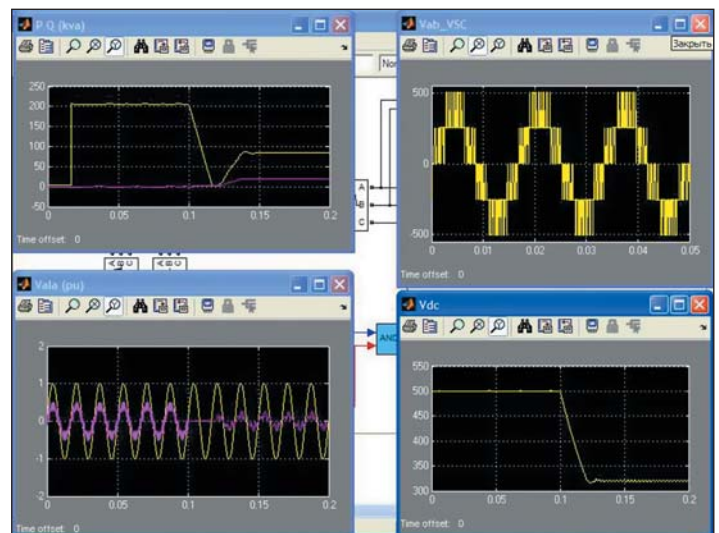


Рис. 30. Раздельные осциллограммы временных зависимостей трехфазного выпрямителя на IGBT



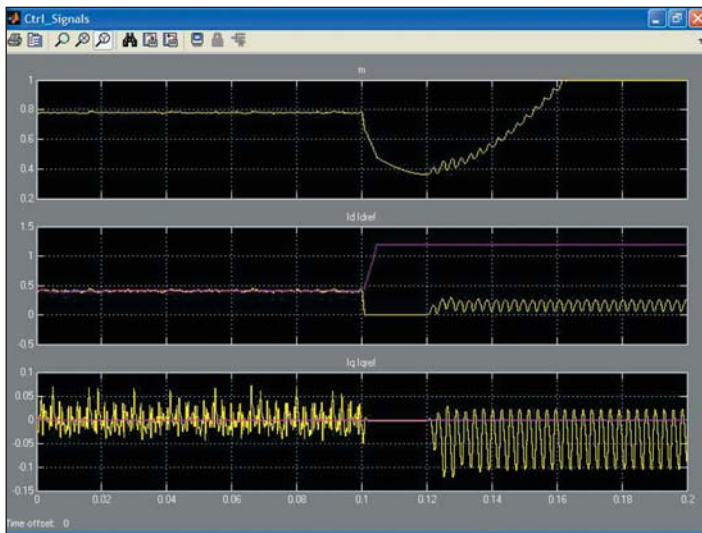


Рис. 31. Совмещенные осциллограммы временных зависимостей трехфазного выпрямителя на IGBT

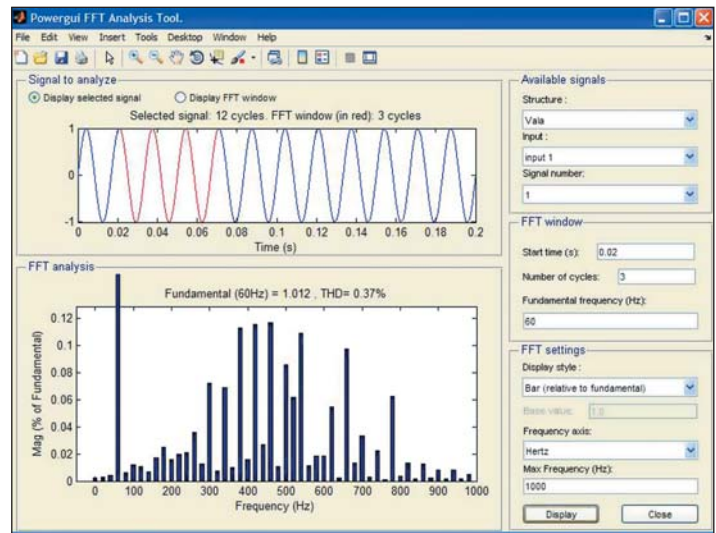


Рис. 32. Окно спектрального анализа трехфазного выпрямителя на IGBT

Представленные выше примеры дают хорошее представление о довольно сложных физических процессах в подобных устройствах и позволяют детально исследовать и оптимизировать их еще до этапа физического макетирования. Учитывая дороговизну и сложные условия работы побисторов и IGBT в силовых устройствах, моделирование их может сберечь эти приборы и существенно ускорить процесс макетирования и разработки силовых устройств.

**Литература**

1. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах. М.: Радио и связь. 1973.
2. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и тиристоры. Теория и применение. М.: СОЛОН-Пресс. 2008.
3. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы вчера, сегодня и завтра // Компоненты и технологии. 2010. № 8.
4. Бачурин В. В., Дьяконов В. П., Сопов О. В. Мощные высокочастотные и сверхвысокочастотные МДП-транзисторы // Электронная промышленность. 1979. № 5.
5. Бачурин В. В., Дьяконов В. П., Новожилов А. М. Мощные полевые транзисторы во вторичных источниках питания // Электронная промышленность. 1982. № 1.
6. Дьяконов В. П. Кирпичики для Pentium'ов. Сверхминиатюрные транзисторы корпорации Intel // Ремонт и сервис. 2005. № 6.
7. Дьяконов В. П. Intel. Новейшие информационные технологии, достижения и люди. М. СОЛОН-Пресс. 2004.
8. Бачурин В. В., Дьяконов В. П., Сопов О. В. Мощный высокочастотный МДП-транзистор КП904 // Электронная промышленность. 1979. № 5.
9. Бачурин В. В., Бычков С. С., Дьяконов В. П., Прушинский А. К. Мощный кремниевый сверхвысокочастотный МДП-транзистор КП908 // Электронная промышленность. 1980. № 1.
10. Бачурин В. В., Бычков С. С., Дьяконов В. П. и др. Мощный кремниевый высоковольтный МДП-транзистор КП701 // Электронная промышленность. 1985. № 9.
11. Бачурин В. В., Бычков С. С., Дьяконов В. П. и др. Высоковольтный мощный МДП-транзистор КП702 // Электронная промышленность. 1986. № 2.
12. Дьяконов В. П., Бачурин В. В., Ремнев А. М. Статические вольт-амперные характеристики ненасыщающихся составных транзисторов на биполярных и МДМ-приборах // Известия вузов. Приборостроение. 1980. № 4.
13. Бачурин В. В., Дьяконов В. П., Ремнев А. М. Сильноточные ненасыщающиеся ключи на составном транзисторе // Электронная промышленность. 1981. Вып. 2.
14. А. с. № 757061 (СССР). Полупроводниковый прибор / В. В. Бачурин, В. П. Дьяконов, А. И. Гордеев, А. М. Ремнев // Заявка 2725221, приоритет изобретения от 15.02.1979.
15. Образцов А., Смердов В. Биполярные транзисторы с изолированным затвором // Ремонт и сервис. 2005. № 4.
16. Царьков В. Б. Биполярные транзисторы с изолированным затвором для начинающих. IGBT for beginners. <http://lipetsk.lug.ru/projects/igbt/index.html>. 2010.
17. Афанасьев В. Особенности применения биполярных транзисторов с изолированным затвором // Электрик. 2010. № 5-6.
18. Рахимо М., Шнайдер Д., Шнелл Р., Айхер С., Шлапбах У. IGBT-модули HiPack на ток до 3,6 кА по технологии SPT+ // Электроника. Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 5.
19. Дьяконов В. П., Пеньков А. А. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. Справочник. М.: ДМК-Пресс. 2009.
20. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7. Самоучитель. М.: ДМК-Пресс. 2008.
21. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. М.: СОЛОН-Пресс. 1999.