

УДК 621.314.58

**ВЫБОР ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ БАЗЫ
СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, СОДЕРЖАЩИХ ЗВЕНЬЯ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Д.Ю. Хохлов, К.А. Набатов

*Кафедра «Электрооборудование и автоматизация»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; ket@nnn.tstu.ru*

Представлена членом редколлегии профессором Н.Ц. Гапановой

Ключевые слова и фразы: задача оптимизации; критерии выбора; надежность; преобразователи энергии; сопоставление полупроводниковых приборов; экономический критерий; энергоэффективность.

Аннотация: Рассматриваются основные критерии выбора полупроводниковой элементарной базы, оптимальной для работы в составе преобразователей автономных систем электроснабжения удаленных потребителей. Производится постановка задачи оптимизации выбора указанных полупроводниковых приборов. Осуществляется сопоставление большинства наиболее распространенных семейств полупроводников по трем основным критериям – энергоэффективности, экономичности и надежности, в свете которых рассматривается решение задачи оптимизации.

В состав большинства как уже эксплуатируемых, так и проектируемых автономных систем электроснабжения (АСЭСН) значительной мощности входят преобразователи электрической энергии. В системах, функционирующих на переменном токе, в качестве преобразователей в течение десятков лет широко применяются силовые трансформаторы [1, с. 15], которые, наряду с неоспоримыми преимуществами (простота конструкции, относительно низкие значения удельной стоимости 1 кВт установленной мощности), имеют ряд существенных недостатков, наиболее значительными из которых являются большие габаритные размеры, высокие показатели удельной массы [2, прил. 3], значительные потери в магнитопроводе.

Однако, несмотря на все недостатки, использование таких простых и достаточно эффективных преобразователей, как трансформаторы, определило практически повсеместное распространение систем переменного тока в XX столетии. В то же время современные научно-технические достижения в области силовой полупроводниковой электроники и темпы ее перспективного развития уже не позволяют системам переменного тока удерживать безоговорочное лидерство в отраслях производства, передачи и распределения электрической энергии по большинству эксплуатационных показателей. К примеру, успешно применяются сис-

темы постоянного тока, обеспечивающие не только снижение потерь при передаче одинакового потока активной мощности за счет отсутствия влияния реактивного сопротивления, но и возможность передачи на 41 % большего количества мощности по проводнику одинакового сечения по сравнению с системами переменного тока. Кроме того, при использовании постоянного тока имеют место повышение устойчивости АСЭСН, выраженное в препятствовании каскадному распространению аварийной ситуации с одного участка энергосистемы на другие за счет выхода генераторов из синхронизма, и возможность использования существующих линий электропередачи переменного тока без их капитальной реконструкции [3, с. 83–85].

При применении звеньев постоянного тока встает вопрос о том, какой тип силовых полупроводниковых приборов оптимален для использования в преобразователях, входящих в состав АСЭСН. На сегодняшний день производятся такие наиболее распространенные семейства указанных приборов, как мощные IGBT-транзисторы, а также полупроводниковые тиристоры (как однооперационные SCR-, так и полностью управляемые GTO-, GCT-, IGCT-тиристоры). Данные приборы обладают свойствами, делающими возможной их работу в преобразователях энергии АСЭСН, – значительными величинами допустимых токовых нагрузок, рабочих напряжений и наличием управляемости.

Для решения задачи оптимизации необходимо сформулировать критерии выбора полупроводниковых приборов, предназначенных для функционирования в составе преобразователей АСЭСН, важнейшими из которых являются следующие.

1. *Энергоэффективность прибора*, или, иными словами, минимальные потери как в открытом состоянии, так и во время переключения, то есть

$$\Delta P_0, \Delta P_s \rightarrow \min ,$$

где ΔP_0 – потери в открытом состоянии; ΔP_s – потери при переключении.

Потери ΔP_0 , очевидно, пропорциональны квадрату силы тока, протекающего через кристалл прибора, и его сопротивлению в открытом состоянии. Так как сила тока, протекающего через прибор, не зависит от типа самого прибора, то наименьшими потерями ΔP_0 будут характеризоваться те из них, которые обладают наименьшей толщиной структуры полупроводника, наиболее благоприятным расположением зоны с наименьшей плотностью плазмы внутри структуры [4, с. 36] и, дополнительно, наибольшей площадью перехода. Перечисленные параметры также тесно связаны со стоимостными характеристиками прибора, так как характеризуют его материалоемкость и сложность технологического процесса производства.

Потери при переключении ΔP_s зависят, в первую очередь, от типа прибора. В идеальном случае указанные потери должны отсутствовать, однако, на практике они существуют при использовании полупроводниковых приборов любых типов, обладающих свойством управления [5, с. 1–5]. Наиболее низкие потери при переключении имеют приборы, обладающие наиболее простой схемой управления и структурой кристалла, в частности, это традиционные однооперационные тиристоры (SCR-тиристоры).

2. *Простота и высокая надежность как самого прибора, так и схемы управления*, что является весьма значительным преимуществом в случае удаленности объекта (а наиболее широко АСЭСН распространены именно на удаленных территориях, в том числе на предприятиях нефтегазовой и добывающей отраслей промышленности). Простота схемотехнических решений, кроме того, обеспечивает и большую ремонтпригодность вышедших из строя блоков.

3. *Экономический критерий*, то есть наиболее низкое значение «стоимости владения» на 1 кВт·ч прошедшей через блок энергии электрического тока. Данный критерий можно рассматривать как отношение суммы стоимости всех приборов, входящих в состав блока (включая их схемы управления, устройства охлаждения и т.д.), и стоимости эксплуатации данных приборов за определенный промежуток времени, за который можно принять, к примеру, пятилетний либо десятилетний срок функционирования блока, содержащего данные приборы, к количеству электроэнергии, преобразованное блоком за это время,

$$\beta = \frac{C_{\text{вл}}}{W} = \frac{(n+m)C_{\text{пр}} + C_{\text{об}} + nC_{\text{п}} + Z_{\text{рем}} + Z_{\text{доп}}}{W},$$

где $C_{\text{вл}}$ – «стоимость владения»; $C_{\text{пр}}$ – штучная стоимость прибора; $C_{\text{об}}$ – стоимость прочего оборудования, входящего в состав блока; n – количество приборов в составе блока; m – количество приборов, вышедших из строя за расчетный отрезок времени; $C_{\text{п}}$ – стоимость потерь электроэнергии в приборах; $Z_{\text{рем}}$ – затраты, связанные с осуществлением ремонтов блока; $Z_{\text{доп}}$ – прочие затраты, связанные с эксплуатацией приборов (к примеру, на плановое техническое обслуживание и т.д.); W – количество энергии, преобразованное блоком.

С учетом сформулированных выше критериев производится сопоставление рассмотренных полупроводниковых приборов с целью нахождения оптимального для применения в составе АСЭСН. Для удобства восприятия результаты сводятся в табл. 1, 2.

Из анализа данных, приведенных в указанных таблицах, следует, что хотя IGBT сборки и тиристоры различных типов находятся на приблизительно одинаковом уровне по максимально допустимым токовым нагрузкам, предельным рабочим напряжениям и показателям надежности, существенная разница по критерию потерь в схемах, использующих данные приборы в качестве силовоточного

Таблица 1

**Сопоставление семейств полупроводниковых приборов
по электрическим характеристикам**

| Прибор, описание | Производители | Диапазон рабочих напряжений, токов | |
|---|--|------------------------------------|--------|
| | | кВ | кА |
| IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) – биполярный транзистор с изолированным затвором | ABB, SEMIKRON, Infineon, Dynex, IXYS, Mitsubishi, ОАО «Электровыпрямитель» | до 6,5 | до 3,6 |
| SCR (Silicon Controlled Rectifier) – кремниевый управляемый выпрямитель | | до 10,0 | до 4,6 |
| GTO (Gate Turn off Thyristor) – запираемый по управляющему электроду тиристор | | до 6,0 | до 4,0 |
| IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) – запираемый тиристор с интегрированным блоком управления | ABB | до 6,0 | до 4,0 |
| GCT (Gate Commutated Thyristor) – тиристор с коммутацией по управляющему электроду | | до 5,5 | до 3,1 |

Сопоставление полупроводниковых приборов по критериям оптимального функционирования в составе АСЭСН (данные приведены для случая работы приборов в составе инвертора мощностью 8 МВА)

| Прибор | Критерии | | | Особенности семейства приборов |
|--------------------------|---------------------------|--|---|---|
| | энергоэффективность (КПД) | надежность (средняя наработка до отказа МТТФ, тыс. ч, рассчитана по [7, с. 5]) | экономический, % МВА, по данным [7, с. 4] | |
| IGBT 4,5 кВ 1,2 кА | 0,95...0,98 | 109,7 | 142 | Наиболее высокая рабочая частота (до 100 кГц и выше). Самый низкий КПД. Встроенный драйвер |
| SCR 4,5 кВ 3,6 кА | 0,98...0,99 | >250 | 40 | Наиболее высокая перегрузочная способность. Легко соединяются параллельно и последовательно. Рабочие частоты до 10 кГц (например, серия ТБИ). Наиболее низкие потери. Не способны к запирающему электроду |
| GTO 4,5 кВ 2,5 кА | 0,98 | 160,3 | 100 | Рабочие частоты выше таковых у SCR |
| IGCT 4,5 кВ 3,6 кА | 0,98 | 252,3 | 55 | Низкие потери во включенном состоянии и на переключение. Рабочая частота до единиц кГц. Встроенный драйвер |
| GCT 4,5 кВ 2,4 кА | 0,98 | 160,0 | 75 | Низкие потери во включенном состоянии и на переключение. Рабочая частота до единиц кГц |

звена, не позволяет говорить о том, что IGBT сборки, согласно мнению ряда авторов [6, с. 36], вытеснят тиристоры из всех сфер их применения в ближайшее время. Действительно, традиционный SCR-тиристор обладает не только более высокими эксплуатационными параметрами (такими, как максимальное рабочее напряжение до 10000 В и токи до 4600 А и даже выше), но и наиболее низкими потерями в открытом состоянии. Кроме того, SCR-тиристоры имеют наиболее низкую единичную стоимость прибора. Все указанные выше параметры делают SCR-тиристоры оптимальными для применения в составе блоков преобразователей электрической энергии АСЭСН. В то же время, низкая рабочая частота SCR-тиристоров не позволяет применять их в составе схем преобразователей с

ШИМ-управлением, и, дополнительно, отсутствует возможность запираеть данные приборы по управляющему электроду. Однако в составе АСЭСН преобразователи могут работать и без использования принципа ШИМ, а надежное и экономичное запираение SCR-тиристора возможно при использовании ряда несложных схемотехнических решений, поэтому можно заключить, что полупроводниковые тиристоры в ближайшие годы будут широко применяться в составе различных преобразователей, а при сохранении нынешних темпов развития технологии IGCT возможно даже вытеснение IGBT сборок из ряда традиционных областей их применения ввиду достижения технологического предела в традиционной IGBT-технологии.

Список литературы

1. Кацман, М. Электрические машины : учеб. для студентов средн. проф. учеб. заведений / М. Кацман. – М. : Высшая школа, 2000. – 463 с.
2. ГОСТ 16555–75. Трансформаторы силовые трехфазные герметичные масляные. Технические условия. – Введ. 1977–01–01. – М. : Стандартинформ, 2006. – 11 с.
3. Delea, F. Understanding Electric Power Systems: An Overview of the Technology and the Marketplace / F. Delea, J. Casazza. – Wiley-Interscience (IEEE Press), 2003. – 232 p.
4. Линдер, С. Силовые полупроводниковые приборы. Часть первая: основные сведения и область применения / С. Линдер // АББ Ревю. – 2006. – № 4. – С. 34–39.
5. IGBT and MOSFET power modules. Application Handbook / SEMIKRON, 2010. – 270 p.
6. Юдин, А. IGBT силовые модули большой мощности для тяговых преобразователей производства компании Infineon / А. Юдин // Сил. электроника. – 2008. – № 2. – С. 32–36.
7. Steimer, P. IGCT Devices – Applications and Future Opportunities / P. Steimer, O. Apeldoorn, E. Carroll // IEEE PES, Seattle, USA. – 2000. – July. – P. 1–6.

Choice of Semiconductor Elementary Base of Power Converters of Autonomous Power Systems with Dc Link

D.Yu. Khokhlov, K.A. Nabatov

*Department "Electrical Equipment and Automation",
TSTU; ket@nnn.tstu.ru*

Key words and phrases: comparison of semiconductor devices; economic criteria; efficiency; optimization problem; power converters; reliability; selection criteria;

Abstract: The paper examines the main criteria for the selection of semiconductor unit basis, which is optimal for the operation in converters of autonomous power systems. The formulation of the optimization problem of the selection of these semiconductor devices is produced. The comparison of the most common families of semiconductors on three main criteria – energy efficiency, economy and reliability is made; the solution of the optimization problem is considered.

Auswahl der Halbleiterelementarbasis der Kraftumformer der die Ketten des Gleichstromes enthaltenden autonomen Systeme der Energieversorgung

Zusammenfassung: Es werden die Hauptkriterien der Auswahl der Halbleiterelementarbasis, die für die Arbeit im Bestande von den Umformern der autonomen Systeme der Energieversorgung der entfernten Verbraucher optimal ist, betrachtet. Es wird die Aufgabe der Optimierung der Auswahl der genannten Halbleitergeräte gestellt. Es wird die Gegenüberstellung der Mehrheit der höchstverbreiteten Halbleiter nach drei Kriterien – der Energieeffektivität, der Rentabilität und der Sicherheit, im deren Lichte die Lösung der Aufgabe der Optimierung betrachtet wird, verwirklicht.

Choix de la base élémentaire semi-conducteur des convertisseurs de force des systèmes autonomes de l'alimentation électrique contenant les maillons du courant continu

Résumé: Sont examinés les critères essentiels du choix de la base élémentaire semi-conducteur optimale pour le fonctionnement dans l'ensemble des convertisseurs de force des systèmes autonomes de l'alimentation électrique éloignés des consommateurs. Est effectuée la mise du problème de l'optimisation du choix des appareils semi-conducteurs indiqués. Est réalisée la comparaison de la plupart des plus répandus ensembles des semi-conducteurs d'après trois critères essentiels – efficacité énergétique, qualités économiques et sécurité, compte tenu desquels est examiné le problème de l'optimisation.

Авторы: *Хохлов Дмитрий Юрьевич* – аспирант кафедры «Электрооборудование и автоматизация»; *Набатов Константин Александрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматизация», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Калинин Вячеслав Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудование и автоматизация», первый проректор, ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
