

УДК 621.314

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-13-19

Алгоритм термостабилизации силовых полупроводниковых приборов в электроприводе компрессора

А.С. Анучин, В.Н. Остриров, Ю.И. Прудникова, М.С. Яковенко, М.В. Подлесный

Рассмотрен режим термостабилизации силовых полупроводниковых приборов, использованных в преобразователе электропривода компрессора поездов метро. Для данного электропривода характерен повторно-кратковременный режим работы. Он работает около 5 мин и наполняет пневматическую систему сжатым воздухом, после чего останавливается, до тех пор пока давление в системе не снизится из-за расхода воздуха на торможение поезда или на открывание и закрывание дверей. При таком режиме работы полупроводниковые приборы подвержены циклическому нагреву и охлаждению, поэтому для подобного преобразователя проблема термоциклирования силовых транзисторных модулей существенно значима. Девиация температуры кристалла над температурой подложки транзисторного модуля приводит к деградации слоя припоя: механическому разрушению и стратификации припоя, что в конечном итоге ведет к отказу полупроводникового прибора. Эти особенности следует учитывать при выборе силовой схемы и разработке преобразователя. Силовой преобразователь электропривода компрессора был спроектирован на кафедре автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ». Он состоит из понижающего DC-DC преобразователя, обеспечивающего стабильное напряжение питания инвертора, трехфазного инвертора и du/dt -фильтра.

Предложен алгоритм термостабилизации, реализованный и протестированный на рабочем образце преобразователя в лабораторных условиях, позволяющий снизить девиацию температуры кристаллов транзисторных модулей. На время паузы в рабочем цикле компрессора силовой преобразователь переходит в специальный режим подогрева. Переход осуществляется автоматически, не требует специальных управляющих сигналов от системы управления верхнего уровня и дополнительных коммутаций в силовых цепях электропривода. Данный алгоритм обеспечивает равномерное распределение теплоты по всем полупроводниковым приборам. Термограммы и температурные кривые показывают его эффективность по сравнению с обычным алгоритмом управления.

Ключевые слова: терморегулирование в электронике, контроль температуры, температурная стабильность, инверторы с широтно-импульсной модуляцией, привод с переменной частотой вращения.

Для цитирования: Анучин А.С., Остриров В.Н., Прудникова Ю.И., Яковенко М.С., Подлесный М.В. Алгоритм термостабилизации силовых полупроводниковых приборов в электроприводе компрессора // Вестник МЭИ. 2017. № 3. С. 13—19. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-13-19.

An Algorithm for Stabilizing the Thermal Operating Conditions of Power Semiconductors in a Compressor Electric Drive

A.S. Anuchin, V.N. Ostrirov, Yu.I. Prudnikova, M.S. Yakovenko, M.V. Podlesny

A parametric approach for stabilizing the thermal state of power semiconductors in the converter for electrically driving the compressor used in subway trains is considered. Such an electric drive system is repeatedly switched in operation for a short period of time. The drive operates for approximately 5 min to fill the pneumatic system with compressed air, after which it is disconnected until the pressure in the system reduces due to compressed air consumption for braking the train or for opening and closing the doors. With such operation mode, semiconductors experience cyclic heating and cooling, due to which the problem of thermocycling is of significant importance for the power transistor modules used in such converter. Deviation of the crystal temperature above the transistor module substrate has a detrimental effect on the braze layer, causing it to become mechanically destructed and stratified, which eventually results in semiconductor failure. These features should be duly considered in selecting the power circuit configuration and in designing the converter. The compressor electric drive's power converter was designed at the Moscow Power Engineering Institute National Research University's Department of Automated Electric Drives. This converter comprises a step-down DC-to-DC converter producing a stable power supply voltage, a 3-phase inverter taking power supply from this voltage, and a du/dt filter.

A thermal stabilization algorithm that has been implemented and tested at laboratory on a real power converter is proposed, the use of which makes it possible to reduce the temperature deviation of crystals in transistor modules. During the pause in the compressor duty cycle, the power converter is changed over to a special heating mode. The changeover to this mode is performed automatically without the need to use special control signals from the upper-level control system, nor does it need to make any additional switching operations in the electric drive's power circuits. The use of the proposed algorithm ensures uniform distribution of heat among all power semiconductors. The thermal images and temperature curves demonstrate the efficiency of this thermal stabilization algorithm in comparison with the usual control algorithm.

Key words: thermal control in electronics, temperature monitoring, temperature stability, PWM-inverters, variable speed drive.

For citation: Anuchin A.S., Ostirrov V.N., Prudnikova Yu.I., Yakovenko M.S., Podlesny M.V. An Algorithm for Stabilizing the Thermal Operating Conditions of Power Semiconductors in a Compressor Electric Drive. MPEI Vestnik. 2017; 3: 13—19. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-13-19.

Введение

В течение многих лет пневматическая система поездов метро была оснащена компрессорами с электроприводом постоянного тока [1, 2]. Подобная система используется для торможения поезда и открывания дверей. Примерно 8 лет назад компания Knorr Bremse начала поставлять московскому метрополитену современные компрессоры с асинхронными электродвигателями. Основными преимуществами асинхронных электроприводов в сравнении с электроприводами постоянного тока являются довольно редкая периодичность обслуживания и значительно большая надежность по причине отсутствия коллекторного узла. Большинство проблем, связанных с надежностью электроприводов компрессоров с электродвигателями постоянного тока, возникают благодаря увеличению уровня питающего напряжения. В соответствии с российскими стандартами напряжение постоянного тока контактного рельса не должно выходить из диапазона 550 ... 950 В [3]. Однако в течение последних 10 лет с ростом потребления энергии и из-за интенсификации движения напряжение холостого хода контактного рельса было увеличено до 1100 В постоянного тока. Это позволило при повышенных нагрузках удерживать питающее напряжение выше 550 В. С тех пор частота возникновения неисправностей в электроприводах постоянного тока пневматической системы поездов метро заметно возросла.

Минимальная рабочая температура оборудования в метрополитене составляет -20 °С. Оборудование должно быть максимально надежным, насколько это возможно. На кафедре автоматизированного электропривода МЭИ научной группой исследования и разработки силовых преобразователей для электроприводов был спроектирован преобразователь на интеллектуальных силовых модулях (IPM) фирмы Mitsubishi, которые демонстрируют высокую надежность в силовых преобразователях различных типов. Данный преобразователь состоит из понижающего DC-DC преобразователя, обеспечивающего стабильное напряжение питания инвертора, трехфазного инвертора и du/dt -фильтра. Единственная проблема, которая может

существенно снизить надежность и срок службы преобразователя — это старт-стопный режим работы, результатом которого является термоциклирование IGBT приборов. Электропривод работает около 5 мин и наполняет пневматическую систему сжатым воздухом, после этого останавливается до тех пор, пока давление в системе не снизится из-за расходов на торможение поезда или на открывание и закрывание дверей. Таким образом, кристаллы IGBT подвержены последовательно нагреву, охлаждению и повторному нагреву. Рассмотрим способ избежать процесс термоциклирования силовых электронных приборов.

Проблема термоциклирования

Проблема термоциклирования характерна для электроприводов со старт-стопным режимом работы и электроприводов, работающих при чрезвычайно низких скоростях. За время рабочего цикла или за цикл основной гармоники кристалл IGBT нагревается и охлаждается на несколько единиц или даже десятков градусов, в то время как температура подложки модуля остается примерно постоянной по причине большей теплоемкости, и, соответственно, большей тепловой постоянной времени. Колебание температуры кристалла приводит к изменению его размеров при неизменном размере подложки. Это приводит к деградации слоя припоя: его механическому разрушению и стратификации и в конечном итоге — к отказу полупроводникового прибора.

Существуют два различных способа решения данной проблемы. Первый заключается в применении специальных IGBT модулей, предназначенных для тягового применения. Например, IGBT модулей с пружинным контактом фирмы Semikron, но эти модули менее стойки к токам короткого замыкания по сравнению с IPM фирмы Mitsubishi. Второй — в использовании специального алгоритма подогрева в выключенном состоянии для стабилизации температуры кристалла независимо от режима работы.

Силовой преобразователь компрессора

Структура силового преобразователя представлена на рис. 1. Преобразователь содержит понижающий

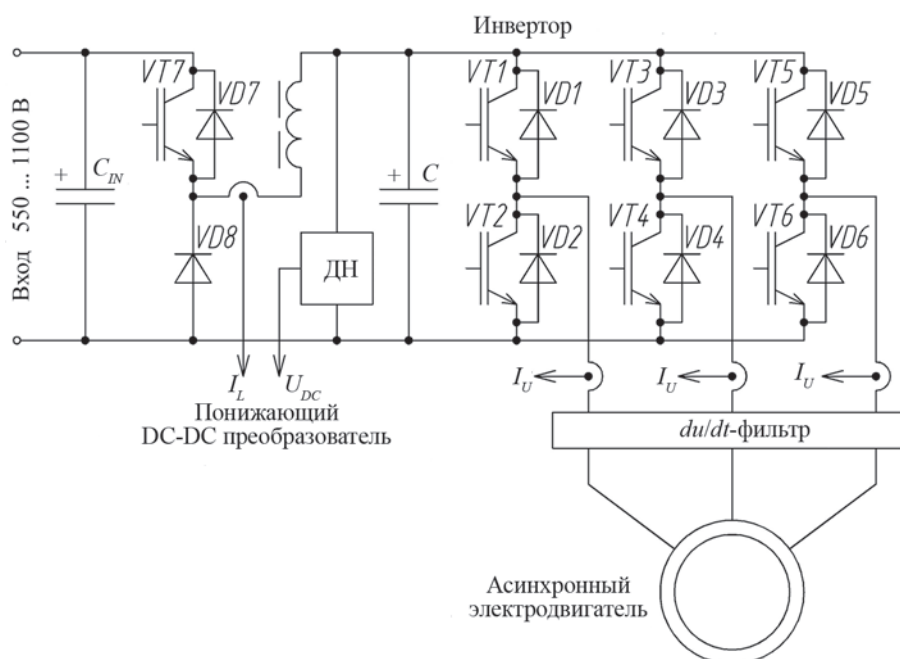


Рис. 1. Силовой преобразователь для электропривода компрессора с асинхронным электродвигателем

DC-DC преобразователь с LC -фильтром, инвертор и du/dt -фильтр. В нормальном режиме работы DC-DC преобразователь поддерживает 540 В для питания трехфазного инвертора. Инвертор формирует напряжение питания двигателя согласно закону $U(f)$ методом широтно-импульсной модуляции базовых векторов. Для случая пуска с высоким противодавлением в компрессоре в управлении инвертором предусмотрена функция ограничения фазного тока. Электропривод управляется сигналом типа «вкл/выкл» от датчика давления в пневматической системе. Номинальная мощность электродвигателя — 7,5 кВт, номинальный фазный ток — 15 А. Номинальный ток в индуктивности фильтра DC-DC преобразователя около 15 А. Таким образом, номинальные токи фаз и ток DC-DC преобразователя одинаковы.

Для того чтобы во время паузы обеспечить потери в IGBT на уровне потерь в рабочем режиме, предложен следующий алгоритм. На время паузы в работе компрессора стойки инвертора должны быть закорочены, а DC-DC преобразователь должен поддерживать номинальный ток, который будет протекать по инвертору в обход обмоток электродвигателя.

Также алгоритм учитывает ряд проблем. В режимах работы преобразователя необходимо дополнительное состояние для разряда конденсатора LC -фильтра. Разряд конденсатора перед замыканием стоек инвертора нужен для того, чтобы избежать больших токов разряда. Чтобы рассеять энергию, запасенную в конденсаторе, напряжение звена постоянного тока может быть приложено к обмоткам электродвигателя через ключи инвертора. Процесс разряда и его направление следует контролировать с помощью датчика напряжения звена постоянного тока.

После разряда верхние и нижние ключи инвертора можно безопасно замкнуть (рис. 2, а).

Другая проблема заключается в том, что одновременное включение всех транзисторов инвертора в режиме подогрева недопустимо, так как оно не гарантирует равномерного распределения тока по стойкам инвертора. Кроме того, при этом будут занижены коммутационные потери. Таким образом, требуется реализовать алгоритм смены фаз. В режиме подогрева DC-DC преобразователь с LC -фильтром управляется с помощью контура тока, таким образом он приобретает свойства источника тока. Именно поэтому по крайней мере одна стойка инвертора должна быть замкнута, а на время смены стоек соответствующие сигналы управления должны быть перекрыты, как показано на рис. 2, б.

Экспериментальная установка

Силовой преобразователь получает питание от высоковольтного источника постоянного напряжения. Напряжение питания может быть изменено путем поворота ручки автотрансформатора. Для упрощения асинхронный электродвигатель заменен на трехфазную RL -нагрузку активной мощностью 7 кВт. Фазный ток достигает 10,5 А. Ток через ключи DC-DC преобразователя был на уровне номинального значения 14 А.

Расположение полупроводниковых модулей внутри преобразователя схематично показано на рис. 3. В качестве датчика температуры использована микросхема LM135Z [6], которая отградуирована в градусах Кельвина. Сигнал датчика принимается системой управления для тепловой защиты. Для визуализации тепловой картины внутри преобразователя установлен тепловизор Testo 880.

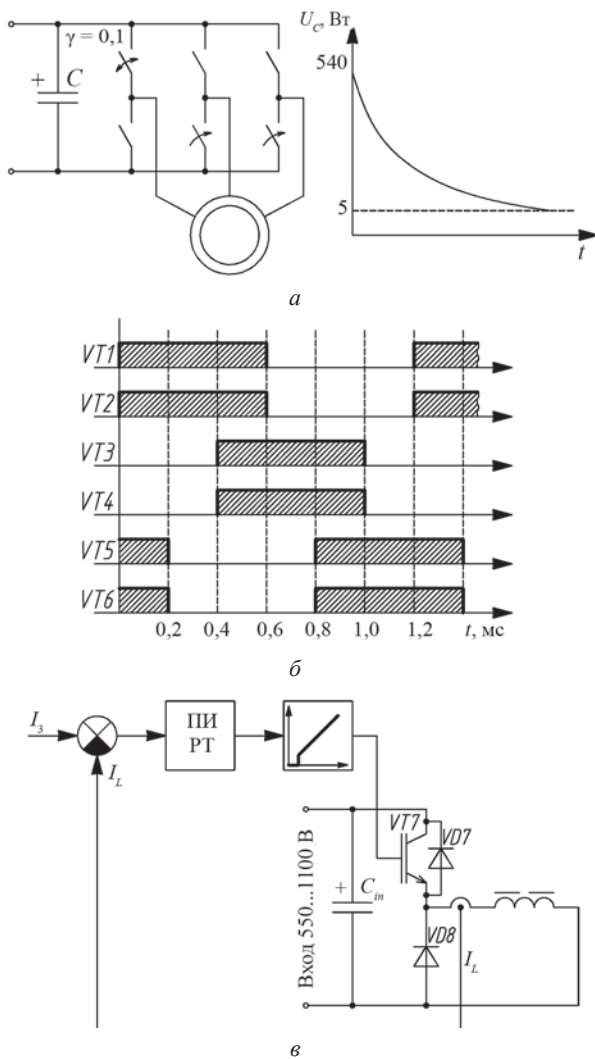


Рис. 2. Диаграммы работы системы управления в режиме подогрева:

a — процесс разряда конденсатора ЗПТ; *б* — последовательность коммутаций в инверторе; *в* — структура системы управления DC-DC преобразователем в режиме подогрева

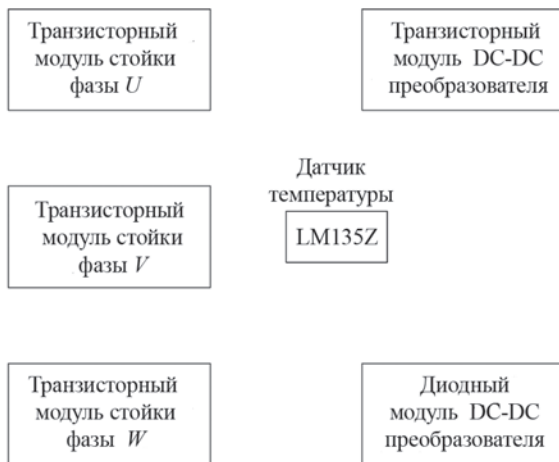


Рис. 3. Компонка полупроводниковых приборов в силовом преобразователе

Эксперименты проводились по последовательным этапам:

- силовой преобразователь был включен на *RL*-нагрузку в нормальном режиме работы. Этот этап необходим для того, чтобы нагреть преобразователь до установившейся температуры;
- силовой преобразователь отключен и переведен в режим подогрева на 5 минут посредством подачи соответствующих сигналов управления от верхнего уровня;
- силовой преобразователь вновь включен в нормальном режиме работы на 5 минут;
- преобразователь отключен, режим подогрева неактивен.

В конце каждого этапа были сняты термограммы полупроводниковых приборов.

Результаты экспериментов

На рис. 4 показана разница температур радиатора преобразователя и окружающего воздуха на протяжении эксперимента. Радиатор преобразователя представляет собой массивную алюминиевую плиту с вертикальными ребрами охлаждения. Этого достаточно для работы преобразователя при температуре окружающей среды вплоть до 60 °С, даже если поезд остановится на въезде или выезде из депо под летним солнцем на длительное время. Размеры радиатора определяются, главным образом, размерами стандартного кейса для подвагонного оборудования. Таким образом, разница указанных температур в эксперименте не превысила 10 °С. По кривой на рис. 4 видно, что в режиме подогрева она перестала расти, так как потери несколько снизились. На самом деле снижение потерь произошло по нескольким факторам.

Потери на коммутацию в понижающем DC-DC преобразователе стали меньше, потому что снизилась частота коммутации, поскольку система управления ограничила минимальную скважность понижающего преобразователя. Таким образом, несколько периодов ШИМ были полностью пропущены. На рис. 5 изображен ток в дросселе. Частота коммутации переменная и значительно ниже 10 кГц.

Небольшой рост температуры ключей инвертора в режиме подогрева (рис. 6, *б* в сравнении с рис. 6, *а, в*) происходит из-за изменения в потерях на коммутацию.

Переключение выполняется с использованием последовательности из рис. 2, *б*. Дискретный автомат для этой последовательности работает в прерывании таймера ШИМ инвертора, таким образом, частота коммутации в 6 раз меньше. Но с другой стороны, в нормальном режиме работы значение фазного тока было меньше, чем оно должно быть при полной нагрузке асинхронного электродвигателя.

На рис. 6 приведены термограммы, которые были сняты в конце каждого этапа (30-я, 35, 40 и 45-я минуты).

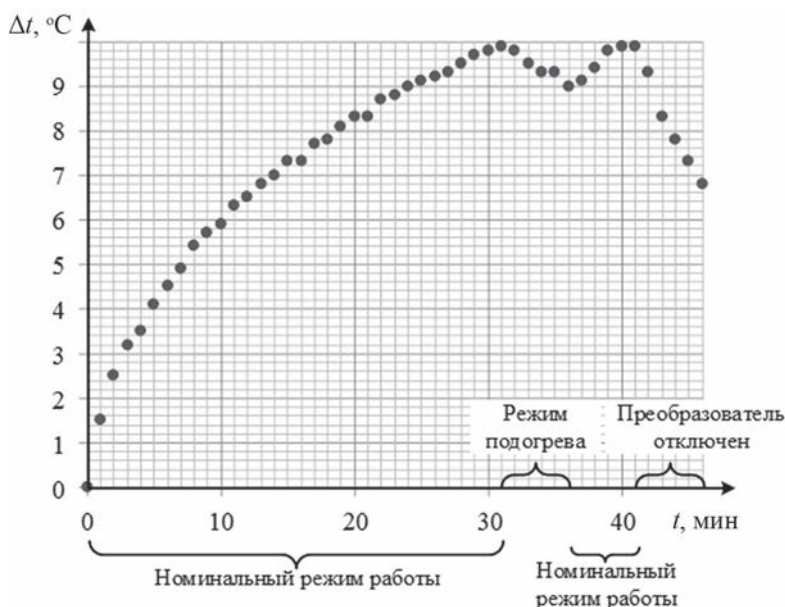


Рис. 4. Разница между температурами радиатора и окружающей среды в различных режимах работы

Алгоритм термостабилизации работает хорошо, однако его можно скорректировать, чтобы увеличить потери на несколько процентов. Кристаллы полупроводниковых приборов остывают на меньшую температуру, чем в случае, когда режим подогрева отключен.

По рис. 4 видно, что когда режим подогрева отключен, температура снижается с большей производной. Сами кристаллы наиболее разрушаются от больших колебаний температуры. Количественно оценить потери в силовых полупроводниках можно с помощью следующих выражений [7, 8].

Параметры силовых модулей и условий работы:

$$\begin{aligned}
 R_{th(j-c)Q} &= 0,27 \text{ }^\circ\text{C/} ; \\
 R_{th(j-c)D} &= 0,51 \text{ }^\circ\text{C/} ; \\
 R_{th(c-h)} &= 0,06 \text{ }^\circ\text{C/} ; \\
 \Delta V_{ce} &= 2 ; \\
 \Delta V_{ec} &= 1,6 ; \\
 t_{C(on)} &= 0,4 ; \\
 t_{C(off)} &= 0,6 ; \\
 t_{rr} &= 0,2 ; \\
 V_{DC} &= 540 ; \\
 I_{peak} &= 21 \text{ A;} \\
 f_{PWM} &= 5 ; \\
 \cos \varphi &= 0,71; \\
 D &= 0,95.
 \end{aligned}$$

где $R_{th(j-c)Q}$, $R_{th(j-c)D}$ — тепловые сопротивления кристалл–корпус для IGBT и обратного диода; $R_{th(j-c)}$ — тепловое сопротивление корпус–радиатор; ΔV_{ce} , ΔV_{ec} — напряжения коллектор–эмиттер и эмиттер–коллектор при номинальном токе; $t_{C(on)}$ — время включения; $t_{C(off)}$ — время выключения; V_{DC} — рабочее напряжение; I_{peak} — амплитудное значение тока; f_{PWM} — частота коммутации; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности нагрузки; D — максимальная скважность.

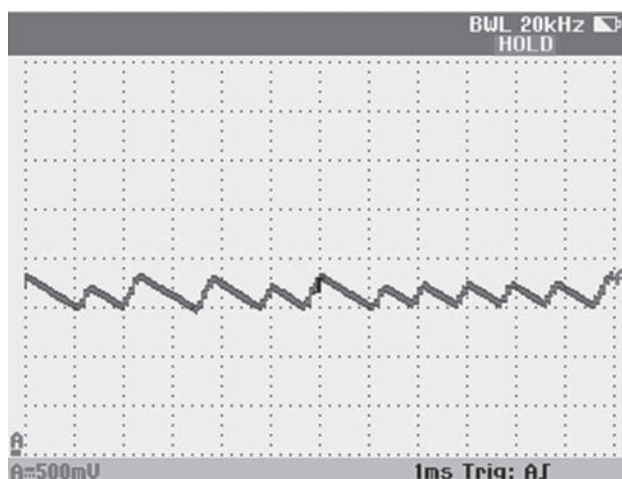


Рис. 5. Оциллограмма тока дросселя DC-DC преобразователя в режиме подогрева (4,27 А в клетке, 1 мс в клетке)

Потери проводимости в каждом IGBT

$$\Delta P_{cl \text{ IGBT}} = I_{peak} \Delta V_{ce} \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cos \varphi \right) = 8,3 \text{ Вт.}$$

Потери проводимости в обратном диоде

$$\Delta P_{cl \text{ FWDi}} = I_{peak} \Delta V_{ce} \left(\frac{1}{8} - \frac{D}{3\pi} \cos \varphi \right) = 1,8 \text{ Вт.}$$

Потери на коммутацию в IGBT:

$$\Delta P_{st \text{ IGBT}} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \frac{I_{peak} V_{DC} f_{PWM} (t_{C(on)} + t_{C(off)})}{2} = 6,5 \text{ Вт.}$$

Потери на восстановление запирающих свойств обратного диода

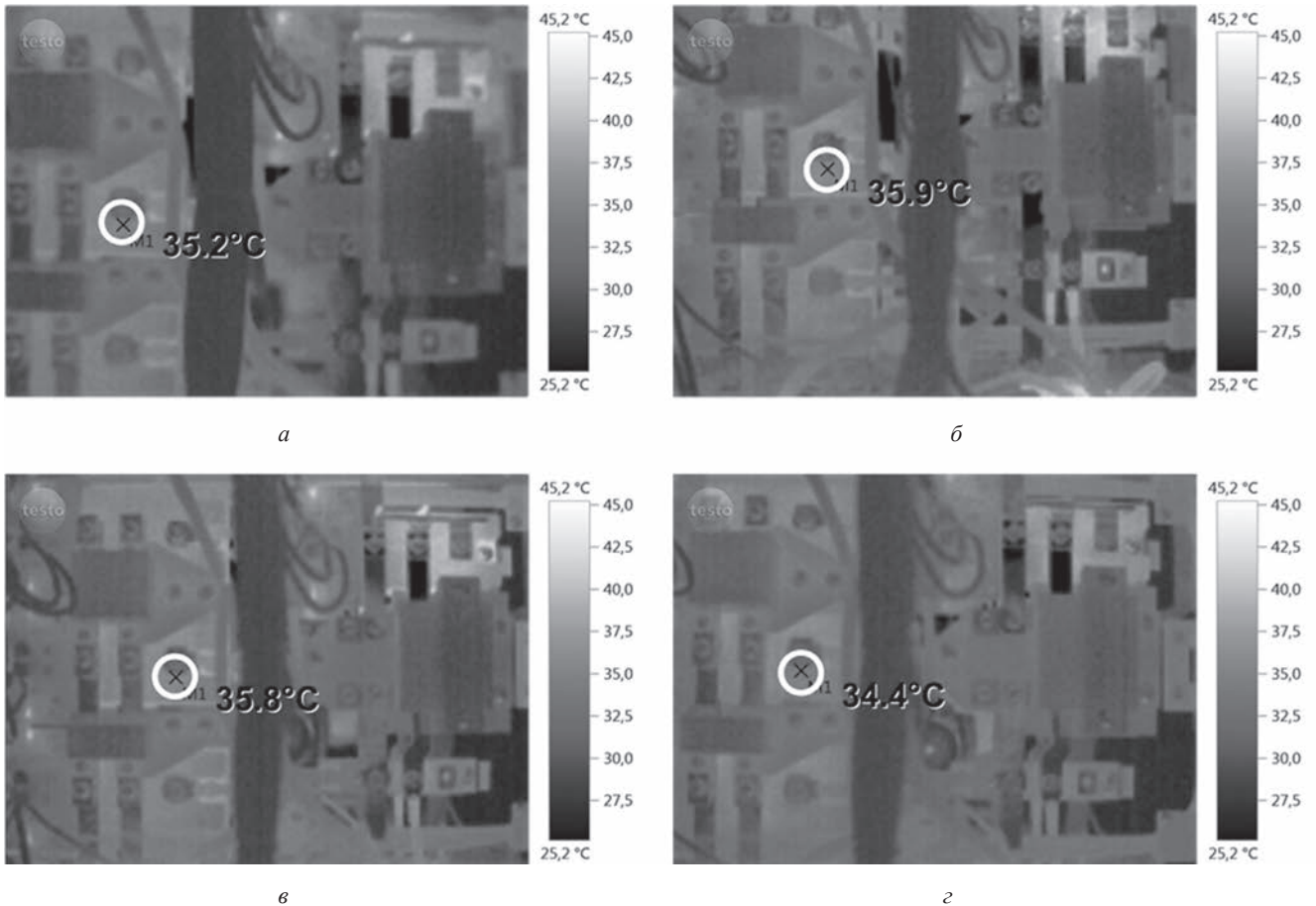


Рис. 6. Термограммы силовых полупроводниковых приборов преобразователя:
 $t = 30$ (а), 35 (б), 40 (в), 45 (г) мин

$$\Delta P_{cl FWDi} = \frac{1}{8} I_{peak} V_{DC} t_{rr} f_{PWM} = 1,4 \quad .$$

Суммарные потери:

$$\begin{cases} \Delta P_{IGBT} = \Delta P_{cl IGBT} + \Delta P_{sl IGBT} = 14,8 & ; \\ \Delta P_{FWDi} = \Delta P_{cl FWDi} + \Delta P_{sl FWDi} = 3,2 & . \end{cases}$$

При указанных термосопротивлениях разность температур между кристаллами и корпусом достигает

$$\begin{aligned} \tau_{IGBT-case} &= \Delta P_{IGBT} R_{th(j-c)Q} = 4 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ \tau_{FWDi-case} &= \Delta P_{FWDi} R_{th(j-c)D} = 1,6 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

для IGBT и обратного диода соответственно. В соответствии с возможной температурой радиатора в выключенном состоянии и суммой перепадов температур отклонение температуры кристаллов составляет около $10 \text{ } ^\circ\text{C}$. Это различие может быть значительно больше, если размер радиатора будет меньше.

Выводы

Описана система термостабилизации полупроводниковых приборов трехфазных инверторов, предназначенных для приводов пневмокомпрессоров под-

вижного состава. Разработанная система управления с термостабилизацией в настоящее время реализована более чем в 500 силовых преобразователях, находящихся в эксплуатации в поездах московского метрополитена с 2008 г. Проведенные эксперименты показали, что в данном случае нет необходимости в термостабилизации из-за очень малых изменений температуры кристаллов полупроводниковых модулей за время рабочего цикла. При колебании температуры на $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ за один цикл электропривод может работать более 25 лет. Однако этот алгоритм термостабилизации может быть использован в других силовых преобразователях с различными параметрами радиатора и цикла работы.

Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект №15-19-20057).

Литература

1. **Electrical and Automatic Air Brake Equipment Instructions.** N.-Y.: Interborough Rapid Transit Company, Office of General Superintendent, 1904.
2. **Shaouxuan F. e. a.** Electrical Components and Airconditioning Units for Lowenvironmental-impact Trains for Subway Systems in China. Hitachi, 2008. Pp. 33—40.

3. **Слепцов М.А.** Основы электрического транспорта. М.: Академия, 2006.

4. **Scheuermann U.** Power Module Design without Solder Interfaces — an Ideal Solution for Hybrid Vehicle Traction Applications // Appl. Power Electronics Conf. and Exposition. 2009. Pp. 472—478.

5. **Neeb C., Boettcher L., Conrad M., De Doncker R.** Innovative and Reliable Power Modules: A Future Trend and Evolution of Technologies // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2014. V. 8. Iss. 3. Pp. 6—16.

6. **LM135Z** datasheet [Электрон. ресурс]. http://www2.st.com/content/st_com/en/products/mems-and-sensors/temperature-sensors/lm135.html (дата обращения 01.04.2017).

7. **Hu B., Song G., Ma X.** An Efficient Method to Estimate the Maximum Junction Temperature of IGBT Modules // PCIM Asia. 2015. Pp. 108—113.

8. **Mitsubishi**, General Considerations for IGBT and Intelligent Power Modules. 1998. P. 18.

References

1. **Electrical** and Automatic Air Brake Equipment Instructions. N.-Y.: Interborough Rapid Transit Company, Office of General Superintendent, 1904.

2. **Shaoxuan F. e. a.** Electrical Components and Airconditioning Units for Lowenvironmental-impact Trains for Subway Systems in China. Hitachi, 2008:33—40.

3. **Sleptsov M.A.** Osnovy elektricheskogo transporta. M.: Akademiya, 2006. (in Russian).

4. **Scheuermann U.** Power Module Design without Solder Interfaces — an Ideal Solution for Hybrid Vehicle Traction Applications. Appl. Power Electronics Conf. and Exposition. 2009:472—478.

5. **Neeb C., Boettcher L., Conrad M., De Doncker R.** Innovative and Reliable Power Modules: A Future Trend and Evolution of Technologies. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2014;8;3:6—16.

6. **LM135Z** datasheet [Elektron. resurs]. http://www2.st.com/content/st_com/en/products/mems-and-sensors/temperature-sensors/lm135.html (data obrasheniya 01.04.2017).

7. **Hu B., Song G., Ma X.** An Efficient Method to Estimate the Maximum Junction Temperature of IGBT Modules. PCIM Asia. 2015:108—113.

8. **Mitsubishi**, General Considerations for IGBT and Intelligent Power Modules. 1998:18.

Сведения об авторах

Анучин Алексей Сергеевич — кандидат технических наук, зав. кафедрой автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: AnuchinAS@mpei.ru

Остриров Вадим Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: ostrirovvn@cycle-p.ru

Прудникова Юлия Ивановна — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: PrudnikovaYI@mpei.ru

Яковенко Максим Сергеевич — аспирант кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: maksim-13@yandex.ru

Подлесный Михаил Владимирович — начальник проектно-конструкторского отдела ООО «НПП «ЦИКЛ ПЛЮС», e-mail: fireman123089@me.com

Information about authors

Anuchin Aleksey S. — Ph.D. (Techn.), Head of Automated Electrical Drive Dept., NRU MPEI, e-mail: AnuchinAS@mpei.ru

Ostirov Vadim N. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Automated Electrical Drive Dept., NRU MPEI, e-mail: ostrirovvn@cycle-p.ru

Prudnikova Yulia I. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Automated Electrical Drive Dept., NRU MPEI, e-mail: PrudnikovaYI@mpei.ru

Yakovenko Maksim S. — Ph.D.-student of Automated Electrical Drive Dept., NRU MPEI, e-mail: maksim-13@yandex.ru

Podlesny Mikhail V. — Chief of Design Dept. of «NPP «CYCLE PLUS», e-mail: fireman123089@me.com

Статья поступила в редакцию 05.12.2016