

Начало в №1_2016

О климатике, механике, космическом излучении и прочих полезных вещах.

Часть 2. Воздействие влажности и конденсации на работу силовых электронных систем

В первой части статьи были описаны виды воздействий окружающей среды на электронные устройства в соответствии со стандартом EN 60721. Здесь мы более подробно рассмотрим вопрос о том, как влажность и образование конденсата влияют на работу силовых электронных систем, а также дадим рекомендации, позволяющие минимизировать это влияние и повысить надежность работы системы.

Пол Дрекседж
(Paul Drexhage)

Иохим Ламп
(Joachim Lamp)

Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков

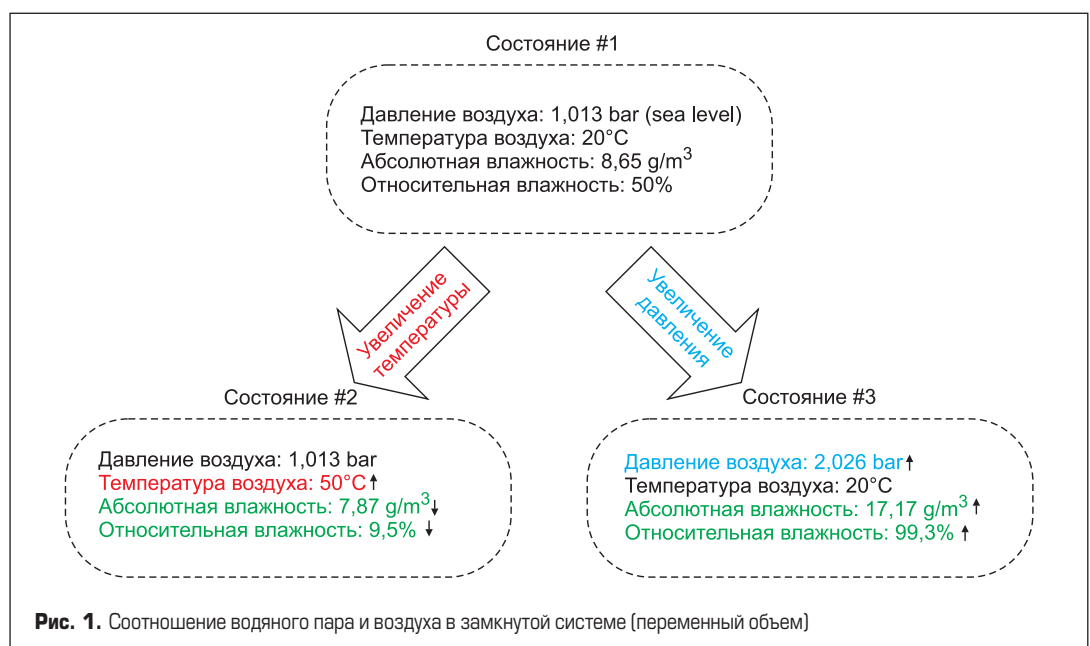
Andrey.Kolpakov@semikron.com

Общеизвестно, что вода в жидкой форме может негативно влиять на работу электрических цепей из-за наличия электропроводности и коррозионной активности. Менее известны, но не менее важны эффекты, создаваемые водой в газообразном состоянии. Водяной пар диффундирует в окружающий воздух, и его дальнейшее поведение зависит от температуры и атмосферного давления в заданном объеме. Наличие водяного пара в воздухе называется влажностью, чаще всего ее уровень оцени-

вается с помощью показателя RH (Relative Humidity, или относительная влажность) (рис. 1).

Конденсация

Когда водяной пар, присутствующий в воздухе, переходит из газообразного состояния в жидкое, на поверхностях образуется конденсат (или иней при низких температурах). Температура, при которой происходит конденсация, называется «точка росы», и она



зависит от относительной влажности. На рис. 2 показана связь между показателем RH, температурой воздуха и точкой росы, определенная с помощью уравнения Магнуса. При заданном давлении и влажности, если температура внутри некоторого объема воздуха (или объекта) опускается ниже точки росы, в этой области начинается образование конденсата.

В качестве типового примера рассмотрим комнату с температурой воздуха +20 °С и относительной влажностью 60%. На поверхности бутылки с охлажденной жидкостью (например, до +5 °С), взятой из холодильника и принесенной в комнату, будут конденсироваться капельки воды. Это происходит потому, что температура воздуха, находящегося в непосредственной близости от холодной бутылки, опускается ниже точки росы (+12 °С, диаграмма на рис. 2). В действительности охлаждение любой частицы воздуха в этой области до температуры ниже +12 °С приведет к конденсации находящейся внутри влаги в жидкость.

Стандарты

Значения допустимой влажности для большинства силовых модулей SEMIKRON и многих других производителей приведены в стандарте IEC 60721-3-3 (климатический класс 3К3). Помимо температуры и давления, этот класс определяет диапазон допустимой величины RH 5–85%, при этом абсолютная влажность ограничивается на уровне 25 г/м³. Для соблюдения условий класса 3К3 важно, чтобы конденсация была исключена, что достигается путем регулировки температуры.

Стандарт IEC использует термин «климатограмма» (аналогичный термин, применяемый

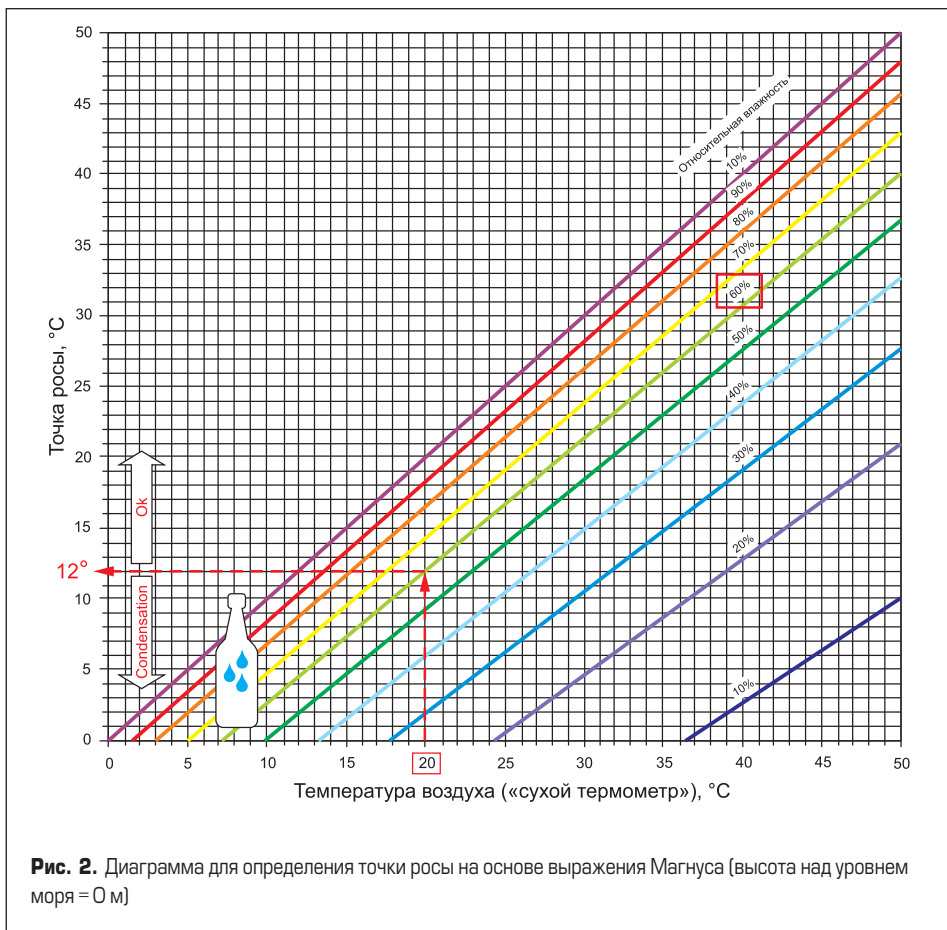


Рис. 2. Диаграмма для определения точки росы на основе выражения Магнуса (высота над уровнем моря = 0 м)

в метеорологии, имеет другой смысл) для определения допустимых значений температуры и влажности. Климатограммы, подобно психрометрическим диаграммам, показывают взаимосвязь между температурой воздуха, его абсолютной и относительной влажностью.

Они также могут быть использованы для нахождения точки, в которой происходит конденсация. Для определения рабочей зоны границы климатического класса «накладываются» на климатограмму в виде контура (жирная линия на рис. 3).

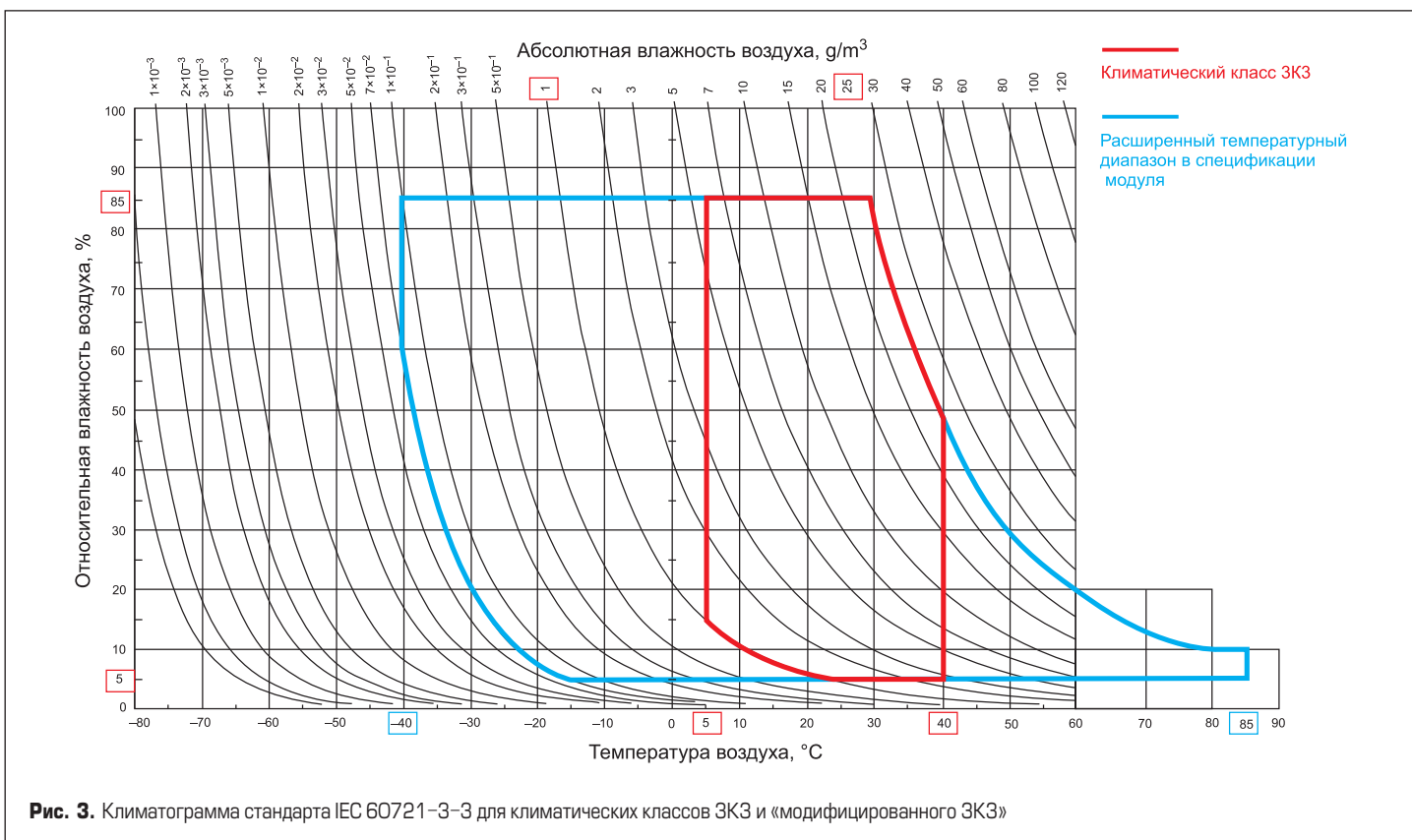


Рис. 3. Климатограмма стандарта IEC 60721-3-3 для климатических классов 3К3 и «модифицированного 3К3»

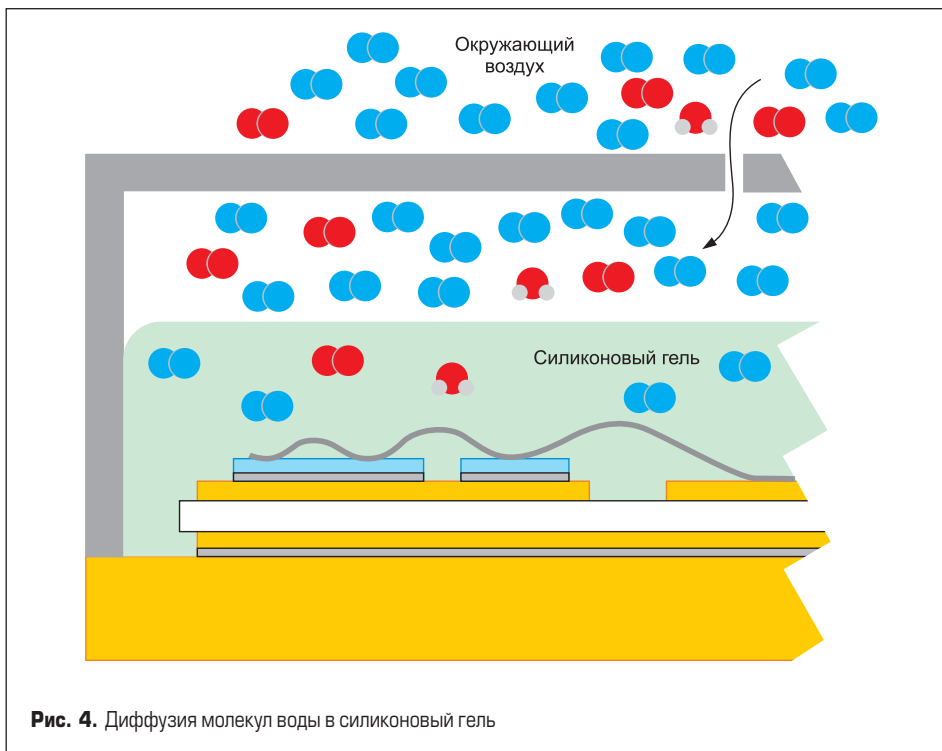


Рис. 4. Диффузия молекул воды в силиконовый гель

Силовые модули SEMIKRON имеют больший температурный диапазон, чем задает класс 3К3 (+5...+40 °С), расширенная рабочая зона показана синей линией на рис. 3. Поэтому в технической документации компании климатический класс указан как «модифицированный 3К3» или «3К3 с расширенным температурным диапазоном». Более точную информацию можно найти в спецификации соответствующего компонента или техническом описании семейства модулей.

Важно понимать, что климатический класс определяется таким образом, чтобы высокое значение RH не допускалось при повышен-

ной температуре. В то время как полупроводниковые чипы квалифицируются в условиях повышенной влажности и температуры, подобные условия являются очень жесткими для силовых модулей. К счастью, в закрытых средах с постоянной абсолютной влажностью значение RH падает с повышением температуры воздуха.

Измерения

Относительная влажность измеряется непосредственно с помощью гигрометра. Современные электронные промышленные

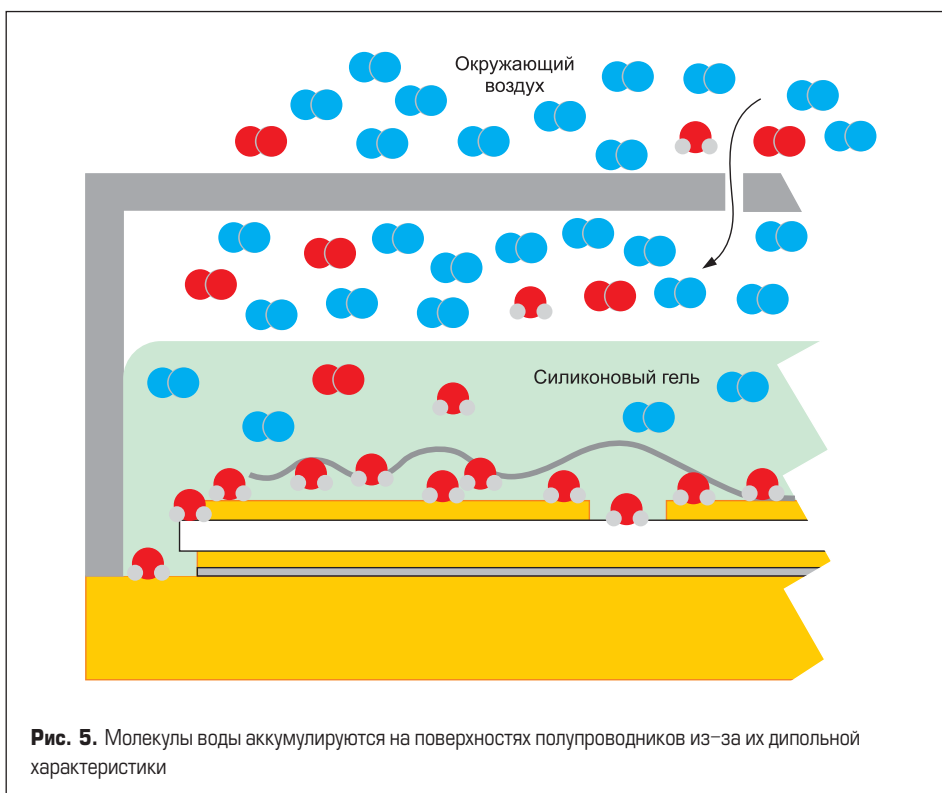


Рис. 5. Молекулы воды аккумулируются на поверхностях полупроводников из-за их дипольной характеристики

приборы содержат емкостной или резистивный сенсор, который может быть откалиброван с точностью до $\pm 2\%$ RH. Однако у некалиброванных или дешевых коммерческих образцов погрешность, как правило, выше $\pm 10\%$, поэтому необходимо проявлять осторожность при интерпретации результатов. Портативные приборы обычно имеют датчик температуры и рекламируются как «регистраторы температуры/влажности» или «термогигрометры».

Поскольку влажность внутри промышленных шкафов зачастую находится под влиянием внешних погодных факторов, рекомендуется измерять как внутреннюю, так и внешнюю относительную влажность в течение дней или недель, чтобы определить влияние погодных условий и режимов эксплуатации.

Влияние влажности на работу изделий силовой электроники

Большинство промышленных силовых полупроводниковых модулей имеет пластмассовый корпус, в котором устанавливается изолирующая подложка с чипами. Внутренний объем заливается мягким гелем на силиконовой основе (в англоязычной литературе — soft mould или sil-gel) для улучшения изоляционных свойств. Конструктивно такие модули не являются герметичными (и газонепроницаемыми), поэтому атмосферные газы могут проникнуть в них через технологические отверстия, силовые клеммы и т. д. Воздух попадает в мягкие гели за счет диффузии (рис. 4), и молекулы воды распространяются в геле таким же образом, как и в воздухе, хотя и гораздо медленнее. Результатом этого являются следующие негативные эффекты:

- Снижение блокирующего напряжения: когда температура теплоотвода уменьшается, воздух, диффундирующий внутри силикона, удерживает меньше влаги. Молекулы воды будут скапливаться на более холодных поверхностях, термически связанных с радиатором, таких как подложка, терминалы и полупроводниковые кристаллы. Кроме того, молекулы воды притягиваются к заряженным поверхностям полупроводников из-за их дипольной характеристики и оказываются в их электрическом поле (рис. 5). Это вызывает искажение линий электрического поля в краевых областях полупроводниковых элементов, что может привести к дальнейшему ухудшению блокирующей способности.
- Коррозия полупроводников: процесс коррозии пассивирующего слоя полупроводниковых чипов хорошо известен [7]. Она происходит при наличии приложенного напряжения в условиях влажности и, в конечном итоге, приводит к пробое и повреждению полупроводника. Коррозия является одним из факторов временного старения, которое исследуется при испытаниях силовых модулей на надежность. Этот тест называется High Humidity High Temperature Reverse Bias (H³TRB) («Обратное напряжение при повышенной влажности и темпе-

ратуре»). Подобные эффекты, как правило, приводят к катастрофическим последствиям, причем на основе характера повреждений модуля очень трудно определить, что именно влажность является первопричиной выхода из строя. Важно отметить, что на воду, находящуюся в жидком состоянии, гель реагирует совершенно по-другому. Тесты, проведенные производителями силиконового геля, показали, что при его погружении в жидкость уровень абсорбции очень низкий (<0,5%).

Конденсация

Если водяной пар конденсируется и переходит в жидкое состояние, то его воздействие на электронные модули становится более очевидным. Капли воды, образующиеся на радиаторе, способны проникнуть внутрь корпуса силового модуля (рис. 6). Воздействие жидкости на открытые проводники, например ламинированные шины звена постоянного тока, может резко снизить напряжение изоляции. Доказательством того, что этот процесс имел место, являются «водяные знаки», особенно заметные на грязных поверхностях (рис. 6 и 7). Однако если вода полностью испарилась и поверхность чистая, то наличие конденсата определить очень сложно.

Влияние условий эксплуатации

Влажность является естественным природным явлением и на «макроуровне» варьируется в зависимости от местоположения и погодных условий. В «микросреде» (например, внутри шкафа с оборудованием) относительная влажность зависит от температуры и давления, соответственно, конструкция шкафа должна проектироваться с учетом этих двух параметров.



Рис. 6. Следы присутствия жидкости на радиаторе модуля SKiIP



Рис. 7. Следы присутствия жидкости на изоляции DC-шины

Считается, что на Земле есть особо влажные регионы (например, тропики). Однако даже в относительно умеренном климате могут наблюдаться области с повышенной влажностью, что зависит от высоты местности, близости водоемов и сезонных эффектов. Независимо от этого задачей конструктора является обеспечение соответствующего микроклимата внутри шкафа с оборудованием и непосредственно рядом с ним.

На рис. 1 видно, что увеличение давления в герметичной системе приводит к повышению RH. В электронных системах, изолиро-

ванных от воздействия окружающей среды, естественные изменения давления воздуха (на макроуровне) могут привести к повышению относительной влажности внутри шкафа. Соответственно, возникает необходимость в поиске ответов на следующие вопросы:

- Как минимизировать или ограничить возможность образования водяного пара внутри шкафа?
- Как исключить падение температуры внутри шкафа ниже точки росы и последующее образование конденсата?

В герметичных системах перепады давления воздуха могут быть уменьшены с помощью вентиляционных отверстий и клапанов, как будет показано далее.

Одной из причин появления разницы температур внутри и вне электронной системы является ее функционирование. Работа силовых модулей и других компонентов повышает температуру воздуха внутри шкафа с оборудованием. Внезапное изменение условий эксплуатации может привести к тому, что радиатор будет остывать намного быстрее, чем воздух во внутреннем пространстве (рис. 8), таким образом создаются условия для охлаждения теплоотвода ниже точки росы. Поэтому очень важно учитывать любое снижение мощности, в том числе:

- падение нагрузки;
- переход в дежурный режим;
- неожиданное прерывание работы (например, из-за неисправности системы).

Отметим, что этот риск также присутствует при смене дня и ночи. Если температура воздуха, поступающего на вход системы охлаждения, падает с наступлением вечера, радиатор может остыть ниже точки росы.

В зависимости от условий эксплуатации или особенностей конструкции конденсация может происходить на определенных участках внутри шкафа с оборудованием.

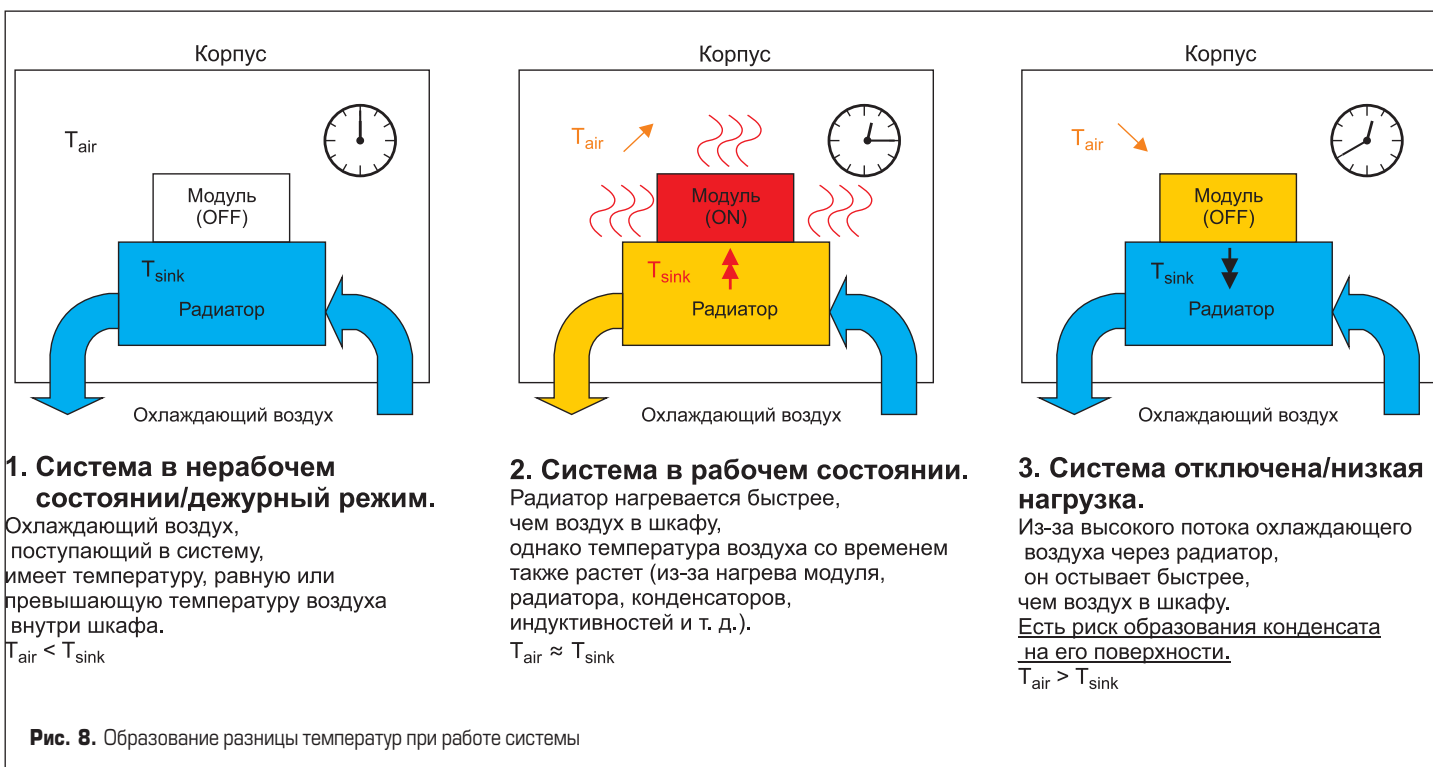


Рис. 8. Образование разницы температур при работе системы

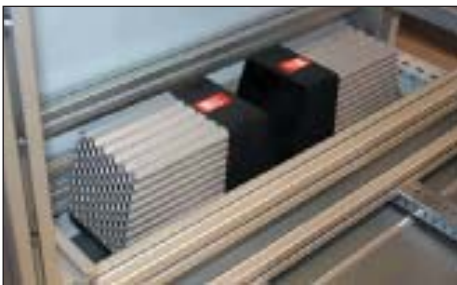


Рис. 9. Два нагревателя мощностью 800 Вт, установленных в основании стандартного шкафа 2000×800×600 мм

Наибольшему риску подвержены следующие элементы:

- холодные впускные отверстия;
- впускные коллекторы и трубопроводы охлаждающей жидкости;
- наружные (металлические) стенки шкафа;
- радиаторы и компоненты, имеющие с ними тепловую связь;
- зоны с низким уровнем воздушного потока по отношению к другим частям шкафа;
- крупногабаритные металлические детали с большой тепловой постоянной времени.

Капли влаги, образовавшиеся на верхней панели и стенках шкафа вследствие конденсации, попадают на силовые модули, электронные схемы и шины. В худшем случае это приводит к коротким замыканиям и повреждению компонентов.

Описанные выше механизмы повышения влажности могут происходить в системе перед ее доставкой и установкой. При перевозке силовых электронных блоков на большие расстояния или их длительном хранении водяной пар накапливается внутри упаковки, что в дальнейшем приведет к катастрофическим последствиям при подаче напряжения питания. По этой причине в транспортной упаковке должны быть предусмотрены вентиляционные отверстия или осушители (см. далее). Кроме того, для удаления любых водяных паров, имеющихсх в системе, рекомендуется предварительная просушка перед включением.

Технологические приемы, нагрев

Состояние внешней макросреды (и связанное с ней воздействия загрязнения, температуры и влажности) является основным фактором при разработке конструкции силового шкафа и определений степени его герметизации. В данной статье мы рассмотрим закрытый шкаф с уровнем защиты IP65 или выше по стандарту IEC. Это означает, что система защищена от попадания пыли и слабых водяных струй, распыляемых с любого направления. Однако это также означает, что воздухообмен между внутренним пространством шкафа и внешней средой ограничен и, следовательно, могут наблюдаться различия в температуре и давлении. И наоборот, для открытой системы подразумевается свободный обмен воздуха внутри шкафа с внешней средой. Температура, влажность и давление в этом случае будут практически одинаковыми.

Как указано ранее, при фиксированной абсолютной влажности повышение температуры окружающего (сухого) воздуха снижает относительную влажность. Для использования этого фактора существуют промышленные нагреватели, предназначенные для установки в шкаф. Они состоят из резистивного нагревательного элемента, термостата и вентилятора, предназначенного для циркуляции воздуха, и выполняют следующие функции:

- сушка внутреннего пространства шкафа после начального ввода в эксплуатацию;
- выведение влаги из замкнутой системы с помощью односторонних мембран;
- предотвращение образования конденсата на внутренних стенках и верхней панели шкафа;
- предотвращение образования конденсата на внутренних металлических частях при повышении температуры внешней среды;
- предварительный нагрев внутреннего пространства шкафа до включения системы (при недопустимом значении минимальной рабочей температуры) и защита работающей электроники при низкой температуре внешней среды;
- поддержание температуры активных компонентов на уровне, превышающем тем-

пературу окружающей среды (в режиме ожидания).

Если включение и выключение системы производится при заданном уровне температуры (например, с помощью термостата), то нагреватель также может управляться от гигростата, что предотвращает падение температуры воздуха внутри корпуса ниже точки росы. Резистивные элементы должны размещаться в нижней части шкафа и иметь достаточную мощность для нагрева внутреннего пространства до определенного уровня при минимальной температуре внешней среды (рис. 9).

Температуру охлаждающей жидкости $T_{coolant}$ следует выбирать таким образом, чтобы поверхность радиатора не остывала ниже точки росы. В идеале она должна быть выше, чем у воздуха во внутреннем пространстве шкафа. Наиболее распространены два метода контроля $T_{coolant}$ (рис. 10):

- Использование трехканального термостатического клапана. При низких температурах (обычно уровень уставки находится в диапазоне +25...+30 °С) охлаждающая жидкость будет течь через байпасный контур, а не через теплообменник. При достижении заданного значения клапан открывается, и система старается поддерживать температуру на заданном уровне. При повышении мощности нагрузки охлаждающая жидкость полностью проходит через теплообменник.
- Нагрев охлаждающей жидкости, он необходим для:
 - Просушки шкафа при вводе системы в эксплуатацию и при ее запуске после длительного периода работы на холостом ходу.
 - Предотвращения образования конденсата на радиаторе, когда температура воздуха внутри шкафа выше, чем на поверхности теплоотвода. При использовании эффективного теплообменника и/или при работе на полной мощности температура на входе обычно на несколько градусов выше, чем в окружающей среде. При большой температуре воздуха внутри шкафа в условиях низкой нагрузки и высокой влажности может потребоваться дополнительный нагрев охлаждающей жидкости для предотвращения конденсации.

В режиме принудительного воздушного охлаждения нагрев радиатора контролируется за счет изменения скорости потока воздуха. Система управления производит постоянный мониторинг температуры, скорость вращения вентилятора регулируется таким образом, чтобы предотвратить охлаждение воздуха, проходящего через ребра радиатора, ниже минимального заданного значения.

Чтобы реализовать этот метод, необходимо выбрать уставку и постоянно контролировать температуру радиатора вблизи силовых модулей (или, еще лучше, использовать датчик, встроенный в модуль). Ниже установленного порога вентилятор полностью выключен. После достижения уровня уставки вентилятор

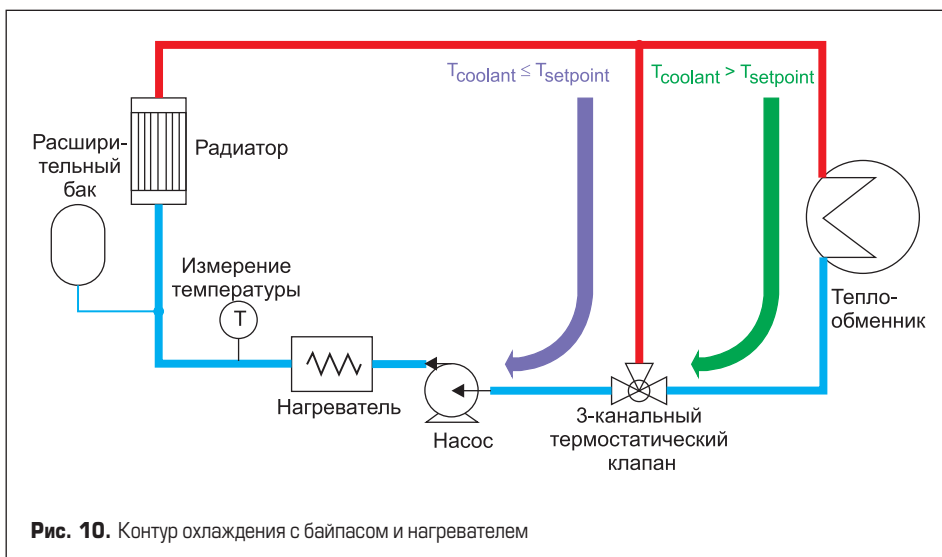


Рис. 10. Контур охлаждения с байпасом и нагревателем

начинает работать, его скорость растет при повышении температуры. При высоких нагрузках вентилятор работает на полной скорости. Этот метод регулирования является дорогостоящим, однако его преимущество заключается в снижении термомеханического стресса для полупроводниковых модулей и самого вентилятора. Кроме того, при низкой нагрузке увеличивается общая производительность системы за счет уменьшения мощности, потребляемой вентиляторами.

В некоторых системах применяется простейший релейный алгоритм включения/выключения вентилятора (с гистерезисом) с помощью биметаллического термодатчика на теплоотводе. К недостаткам данного метода можно отнести сокращение срока службы вентилятора, особенно если в нем используется АС-мотор с пусковым конденсатором. Еще более важным является отсутствие четкого контура управления и быстрые изменения состояний включения и выключения, что приводит к большой разности температур и, соответственно, уменьшению ресурса полупроводниковых модулей. Например, увеличение градиента температуры кристалла всего на 10 °C снижает стойкость компонента к термоциклированию в четыре-пять раз. Соответственно такой метод контроля не рекомендуется к применению в ответственных системах.

Эксперименты с силовыми модулями в среде с влажностью 85% показали, что использование охлаждающей жидкости, имеющей температуру хотя бы на 5 °C выше, чем у окружающего воздуха, позволяет снизить показатель RH в модуле. На рис. 11 приведены результаты такого теста. Измерение влажности производилось под силиконовым гелем внутри модуля, применялась охлаждающая жидкость с температурой +40 °C, учитывалась высокая влажность окружающей среды при разных значениях температуры.

Как показывают графики, стационарное значение RH достигается в течение 24 ч; показанная характеристика примерно соответствует обратной экспоненциальной кривой. На основе приведенных результатов испытаний и известных характеристик силиконового геля сформированы следующие рекомендации:

- Для систем, где существует риск воздействия высокой влажности на силовые модули во время транспортировки или хранения (перед вводом в эксплуатацию), рекомендуется использовать хладагент с минимальной температурой +25 °C, которая должна превышать температуру окружающего воздуха минимум на 5 °C. Такой режим следует применять за 24 ч до включения силового напряжения (>50 В DC).
- Для введенных в эксплуатацию систем, установленных на открытом воздухе или в помещениях с высокой влажностью, которые были в нерабочем состоянии более 8 ч, хладагент с температурой, минимум на 5 °C превышающей температуру окружающего воздуха, следует подавать за 1 ч до включения силового напряжения (>50 В DC).

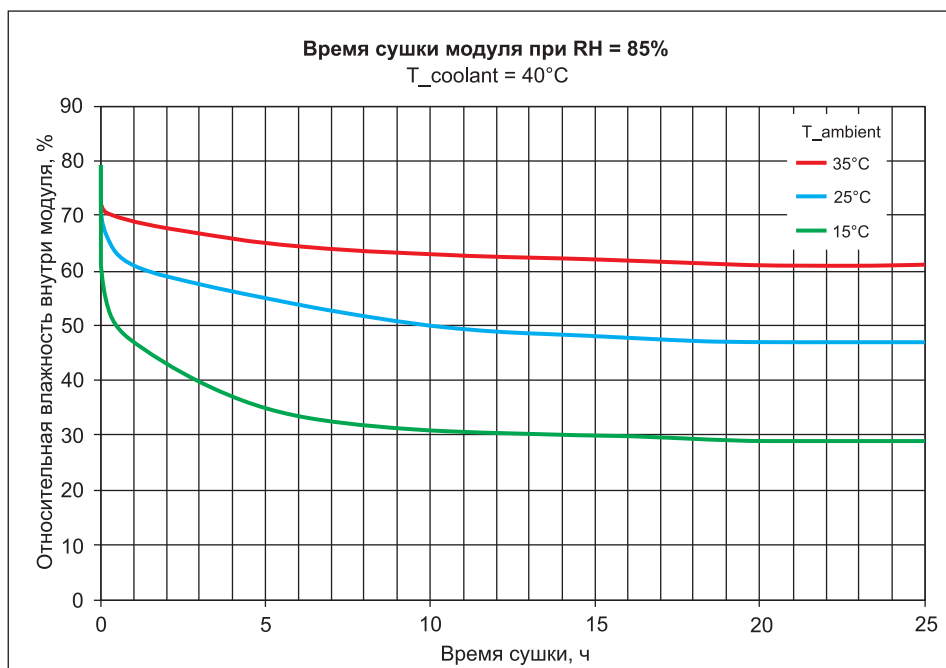


Рис. 11. Эксперимент: использование предварительно нагретой охлаждающей жидкости для снижения влажности

Технологические приемы, удаление влаги

Непосредственно снизить влажность воздуха можно с помощью осушителя, состоящего из охлаждаемого змеевика, по которому прогоняется влажный воздух. Влага, находящаяся в воздухе, конденсируется на змеевике и затем сливается или откачивается из системы. Существуют осушители шкафов в промышленном исполнении, которые отличаются от коммерческих аналогов следующими показателями:

- компактные размеры для сушки заданного объема;
- наличие дренажного шланга или насоса для непосредственной откачки влаги из шкафа;
- внутренний термостат/гигростат для контроля и осуществления интерфейса с регулятором влажности/температуры шкафа;
- пониженное рабочее напряжение для возможности подключения к блоку питания имеющейся системы управления (например, 24 VDC);
- надежная конструкция, обеспечивающая длительную работу без обслуживания и большое количество рабочих циклов;
- наличие монтажных элементов (DIN-рейка, кронштейны).

Осушители, как правило, размещаются в нижней и боковой части шкафа, а дренажный шланг прокладывается по стенке или полу для вывода влаги в наружное пространство. Необходимо убедиться в том, что обеспечивается циркуляция воздуха за счет осушителя и его вентиляторов, а также внутренних вентиляторов шкафа. Такие приспособления зачастую рассматриваются как дорогостоящее дополнение к системе, однако в преобразователях высокой мощности (500 кВт и более)

их стоимость составляет лишь малую часть. Следует учесть, что расходы на устранение отказов, вызванных наличием влаги, в системах, размещенных во влажных средах, могут быть значительно выше.

Для небольших герметичных корпусов, где существует необходимость выравнивания давления, выпускаются специализированные впадные и винтовые вентиляционные клапаны. Они содержат полупроницаемую гидрофобную мембрану, пропускающую пар, но отделяющую капли воды и другие загрязнения (рис. 12). Поскольку водяные пары могут проходить через эти клапаны, их применение не обязательно способствует уменьшению абсолютной влажности. Тем не менее они выполняют важную функцию, состоящую в исключении перепада давления, следствием которого может стать повышение относительной влажности внутри корпуса.

Технологические приемы, сиккативы

Сиккативы — это гигроскопичные материалы, способные впитывать и накапливать влагу из воздуха. Они обычно производятся из силикагеля (или других природных материалов, таких как глина), упакованного в проницаемую мембрану, пропускающую влажный воздух. Поскольку сиккативы накапливают водяной пар, их возможности ограничены, а эффективность резко падает по мере насыщения. По этой причине гигроскопичные материалы обычно используются только при транспортировке опечатанных контейнеров для улавливания остаточных водяных паров. В открытых системах они быстро насыщаются и перестают работать. Большинство сиккативов на основе силиконового геля содержат визуальную цветовую

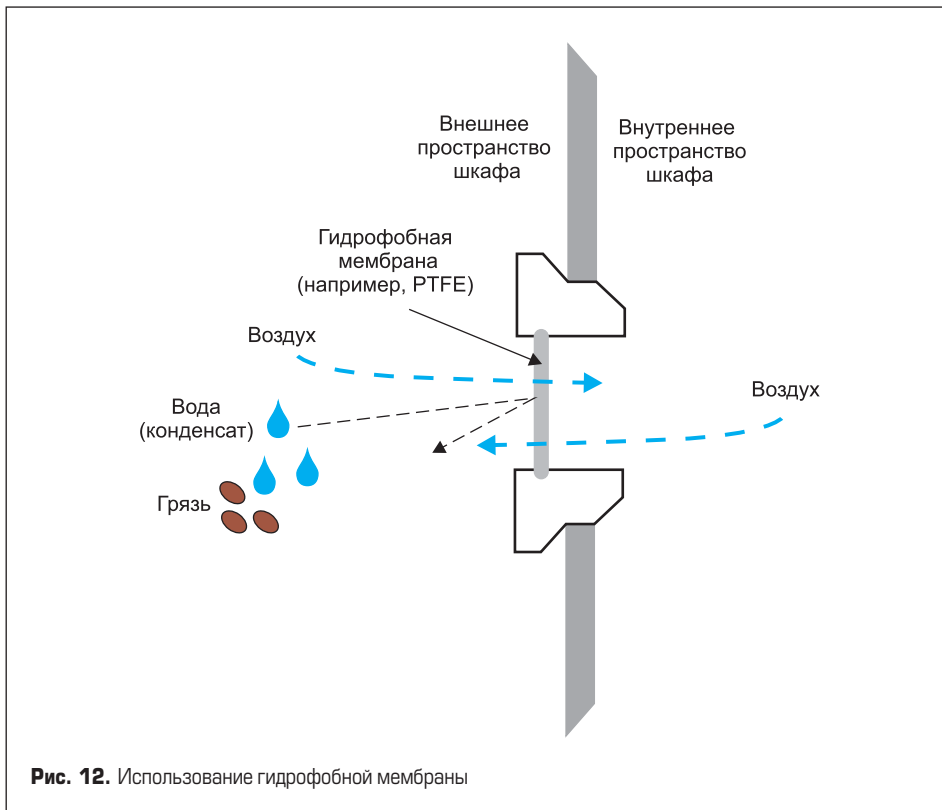


Рис. 12. Использование гидрофобной мембраны

индикацию количества накопленной влаги (например, голубой в сухом состоянии и розовый — во влажном). Такие осушители могут быть повторно использованы после нагрева и удаления влаги.

Конструкция герметизированной системы

- Теплообменник «воздух–вода» или «воздух–воздух»: охлаждает воздух во внутреннем

пространстве без обмена внутреннего и наружного воздуха. Также обеспечивает циркуляцию внутри шкафа для предотвращения образования горячих или холодных зон.

- Нагреватель: поддерживает низкую относительную влажность и минимальную рабочую температуру.
- Клапан: предотвращает рост давления воздуха внутри шкафа выше внешнего атмосферного давления.
- Климат-контроль: блок (например, PLC или часть системного контроллера), осуществляющий мониторинг внутренней влажности, температуры воздуха и радиатора и управляющий нагревателем и вентиляторами по мере необходимости.
- Осушитель: конденсирует влагу, имеющуюся во внутреннем пространстве шкафа, и удаляет ее наружу.

Конструкция открытой системы

- Входные и выходные отверстия: положение выбирается для обеспечения перекрестного потока. Могут содержать вентилятор (с фильтром) на входе или на выходе.
- Циркуляционный вентилятор: обеспечивает движение воздуха для предотвращения образования горячих или холодных зон.
- Нагреватель: поддерживает низкую относительную влажность и минимальную рабочую температуру. Необходимо убедиться

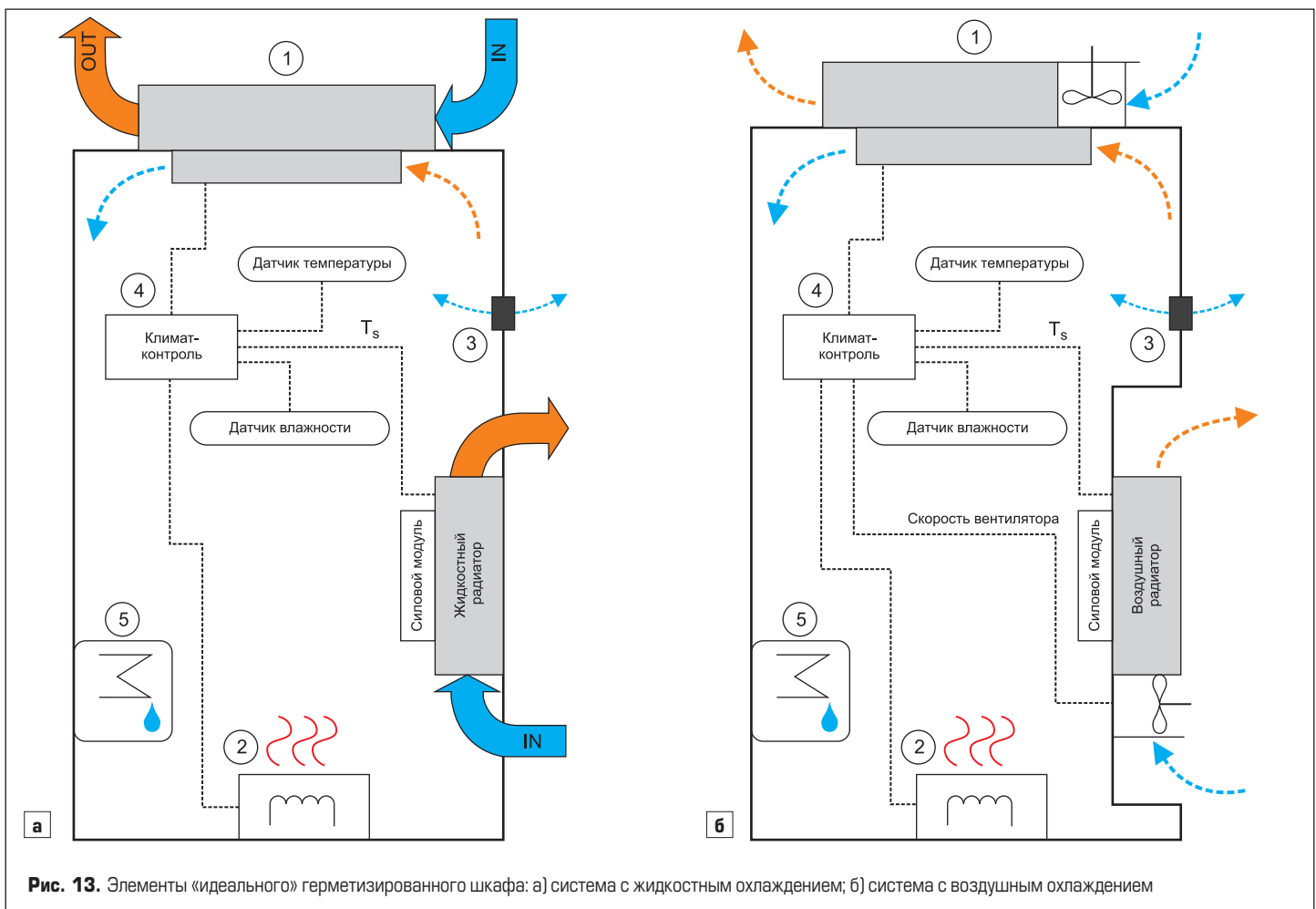


Рис. 13. Элементы «идеального» герметизированного шкафа: а) система с жидкостным охлаждением; б) система с воздушным охлаждением

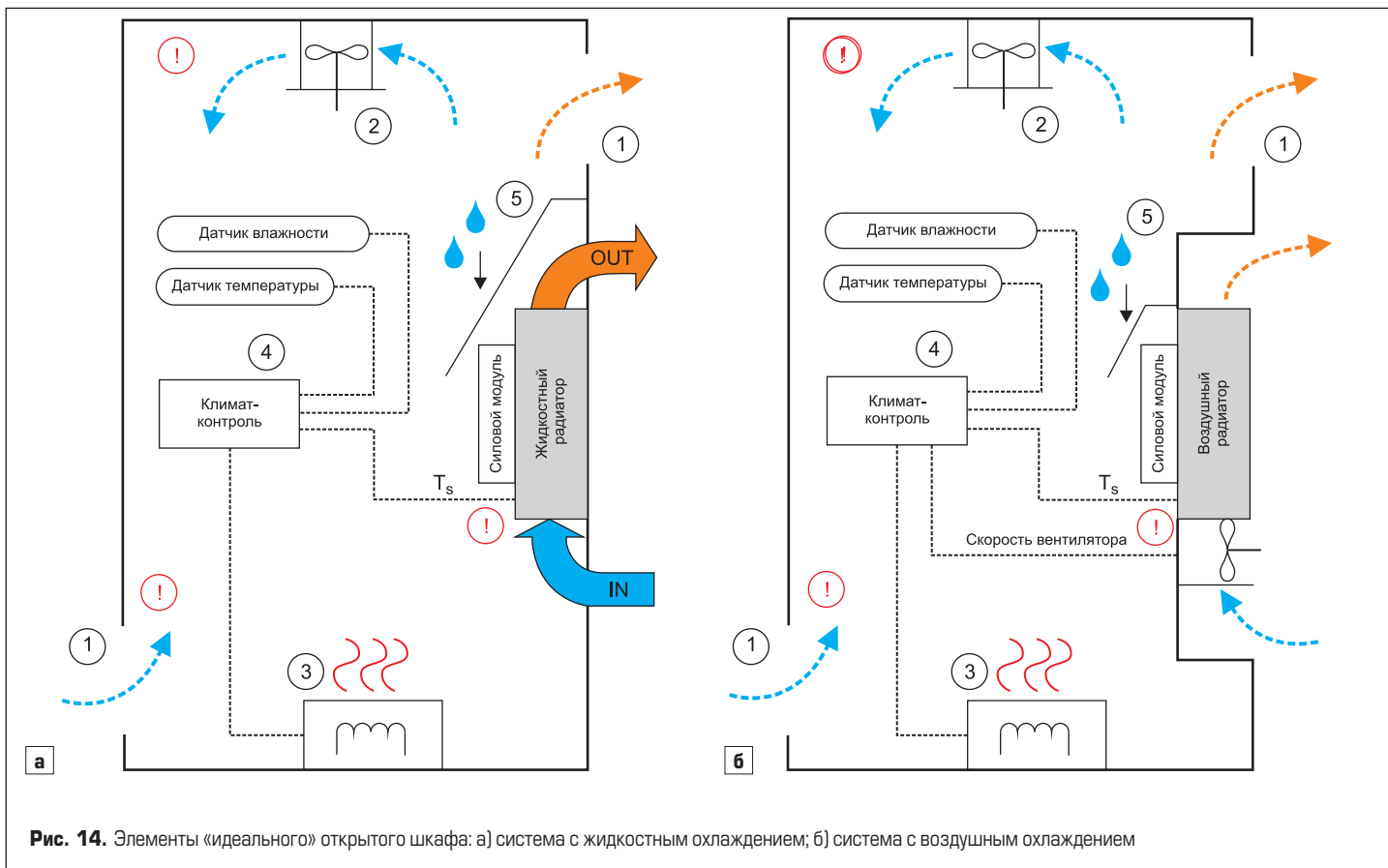


Рис. 14. Элементы «идеального» открытого шкафа: а) система с жидкостным охлаждением; б) система с воздушным охлаждением

в том, что все компоненты нагреты до минимальной температуры, до начала поступления внешнего охлаждающего воздуха, поскольку некоторые детали (например, радиаторы) имеют большую тепловую массу и требуют больше времени для достижения равновесия.

- **Климат-контроль:** блок (например, PLC или часть системного контроллера), осуществляющий мониторинг внутренней влажности, температуры воздуха и радиатора и управляющий нагревателем и вентиляторами по мере необходимости.
- **Критические зоны (!):** внешние стенки шкафа, воздухозаборники и радиаторы являются критическими зонами конструкции, т. к. образование конденсата на них наиболее вероятно, особенно когда воздух внутри шкафа становится намного теплее, чем в окружающем пространстве. В наиболее сложных случаях может потребоваться применение специальных капельных экранов для предотвращения попадания влаги на токонесущие элементы. В системах с жидкостным охлаждением впускной штуцер (холодный) должен располагаться ниже выходного штуцера (теплого), чтобы избежать попадания воздуха внутрь радиатора. Такое решение имеет дополнительное преимущество, состоящее в том, что влага с подверженного конденсации входного отверстия не попадает на силовые модули.

Следует отметить, что в обеих рекомендованных конструкциях канал охлаждения радиатора отделен от остальной части шкафа (рис. 13б и 14б). Очень часто используется конфигурация, показанная на рис. 15, где охлаждаемая

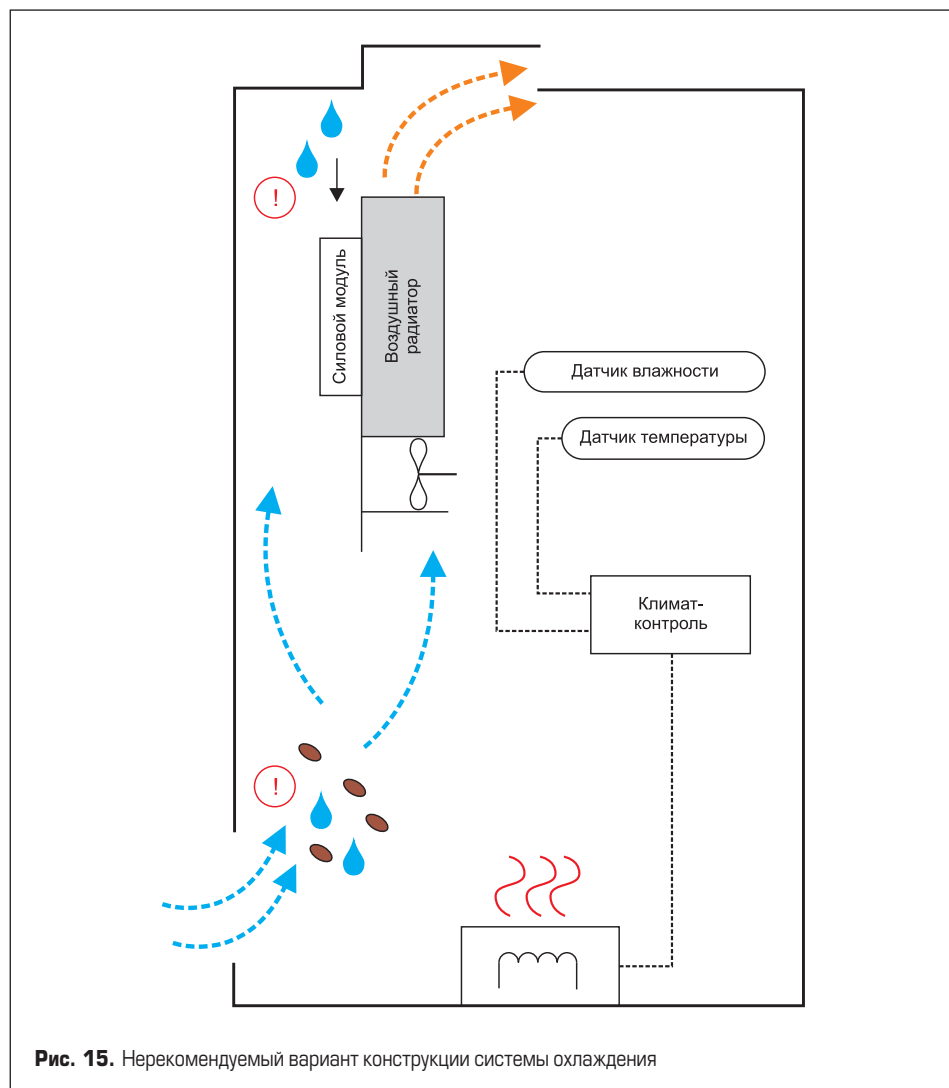


Рис. 15. Нерекондуемый вариант конструкции системы охлаждения

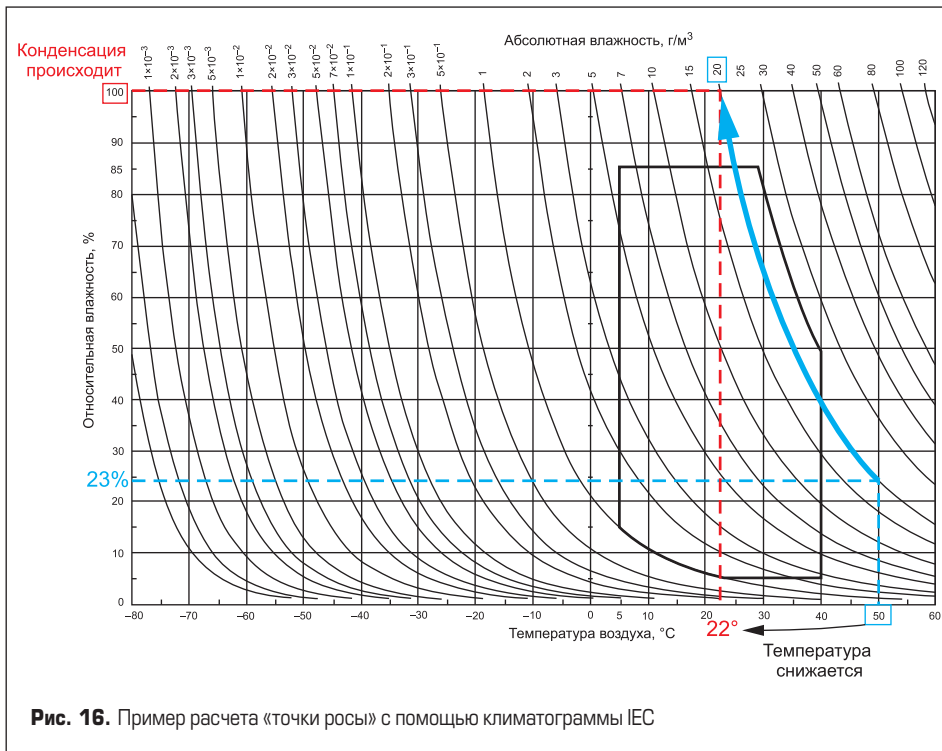


Рис. 16. Пример расчета «точки росы» с помощью климатограммы IEC

воздухом сборка целиком размещается внутри шкафа и все компоненты и радиатор обдуваются одним и тем же воздухом. Такое решение имеет следующие недостатки:

- Прокачка большого объема воздуха увеличивает вероятность загрязнения твердыми частицами (пыль, грязь), которые оседают на печатных платах и электрических соединителях, сокращая пути токов утечки и ухудшая изоляционные свойства. Добавление впускных фильтров помогает решить эту проблему, но при этом уменьшается эффективность охлаждения и они быстро загрязняются (зачастую такие фильтры нерегулярно чистятся или вообще удаляются обслуживающим персоналом).
- Образование конденсата, критическое для радиаторов и входов/выходов воздушных каналов, в этом случае напрямую угрожает чувствительным к влаге компонентам системы (печатные платы, электрические соединения), поскольку они находятся в одном пространстве с радиатором.
- По сравнению с ситуацией на рис. 14б больший объем воздуха приносит пропорционально больший объем влаги, усиливая риск образования конденсата на входах/выходах воздушных каналов. Кроме того, рост

скорости потока приводит к увеличению перепадов температуры, в результате чего температура в некоторых областях может опуститься ниже точки росы.

- Средства климат-контроля (нагреватели) оказываются менее эффективными, поскольку объем нагреваемого воздуха становится более динамичным из-за высокой скорости потока.

Климатограммы IEC

Климатограммы IEC (B.3 из EN 60721-3-3 или A.7 из EN 50178) предлагают альтернативный способ расчета при возможности образования конденсата. Если температура и относительная влажность воздуха известны, то абсолютное значение влажности можно зафиксировать и определить температуру, при которой достигается величина RH = 100% (точка росы).

В соответствии с рис. 16 в замкнутой системе при температуре окружающего воздуха +50 °C и относительной влажности 23% пересечение этих двух линий приходится на 20 г/м³ абсолютной влажности (толстая синяя линия). С понижением температуры кривая абсолютной влажности следует до верхней

части графика, где величина RH составляет 100% (конденсация происходит). Температура по оси X, совпадающая с этой точкой, является точкой росы (+22 °C).

Большинство силовых модулей SEMIKRON удовлетворяет требованиям климатического класса 3К3 стандартов EN 60721-3-3, EN 50178. При существующих изоляционных свойствах (обусловленных длинами токов утечки) они могут работать при уровне загрязнения 2, описанном в стандартах EN 50178 и EN 61800-5-1. Установка оборудования недопустима в местах, где возможно брызгообразование или конденсация влаги, способная ухудшить изоляционные свойства элементов преобразовательного устройства. При уровне загрязнения 2 образование конденсата возможно в течение короткого времени и только при обесточенной системе. Накопление остаточной влаги недопустимо при всех обстоятельствах.

Климатический класс 3К3 допускает работу аппаратуры в защищенных от погодных воздействий зонах, при максимальной допустимой относительной влажности RH = 85% и абсолютной 26 г/м³. В соответствии с климатограммой это означает, что, например, при температуре +40 °C величина RH не должна превышать 50%. Абсолютная влажность может меняться более чем на 1 г/м³ в течение суток (наибольшие изменения наблюдаются после выпадения осадков).

Литература

1. P. Drexhage, J. Lamp. Effect of Humidity and Condensation on Power Electronics Systems. SEMIKRON AN 16-001. 2016.
2. A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann. Application Manual Power Semiconductors. 2nd revised edition. ISLE Verlag. 2015.
3. IEC Standard 60721-3-3 ed. 2.2, 2002. Part 3-3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Stationary use at weather protected locations.
4. A. L. Buck. New Equations for Computing Vapor Pressure and Enhancement Factor. // J. App. Meteorology. Vol. 20. Dec., 1981.
5. Venting W. L. Gore & Associates, Inc. www.gore.com
6. IEC Standard 60529:1989+A1:1999+A2:2013, 2013. Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)
7. C. Zorn, N. Kaminski. Temperature Humidity Bias (THB) Testing on IGBT Modules at High Bias Levels. CIPS. 2014.