

*М.А. Аблаев, В.А. Иванов*

## ПУСКОВЫЕ И ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

*Приводятся технические решения, позволяющие использование пусковых и пускорегулирующих устройств типов Silcostart и Silcovert, серийно выпускаемых фирмой "Ансальдо" (Италия), в районах России с экстремальными температурными условиями. Предложена конструкция шкафа со съемными теплоизолирующими панелями, способного обеспечивать защиту оборудования от недопустимо низких и недопустимо высоких окружающих температур; приведен тепловой расчет такого шкафа и мощности подогревателей.*

Пусковые и пускорегулирующие устройства электрических двигателей Silcostart и Silcovert, серийно выпускаемые фирмой "Ансальдо" (Италия), по своим техническим характеристикам хорошо согласуются с потребностями таких отраслей народного хозяйства России, как нефтедобыча, газоразработка, геология.

Однако электротехнические устройства, включающие в себя такие электродвигатели и предназначенные для нужд указанных отраслей инженерной деятельности, часто эксплуатируются на открытом воздухе в малонаселенных районах Дальнего Севера, Сибири и Дальнего Востока России. Указанные районы характерны резко континентальным климатом с весьма низкими (до  $-55^{\circ}\text{C}$ ) температурами воздуха зимой и достаточно высокими (до  $+40^{\circ}\text{C}$ ) летом.

Выпускаемые ныне преобразователи Silcostart и Silcovert являются изделиями внутренней установки, не предназначены для работы под открытым небом и не отвечают требованиям по температурному режиму окружающего воздуха как при оперативной работе, так и при хранении и транспортировке.

Указанное обстоятельство существенно ограничивает применение названных устройств в России.

Для расширения возможности применения агрегатов Silcostart и Silcovert в России необходима модернизация указанных пусковых и пускорегулирующих агрегатов. Эти модернизированные агрегаты должны позволять наружную уста-

новку при низкой температуре окружающего воздуха.

При разработке преобразователя наружного исполнения перед разработчиком стоят две основные задачи:

- обеспечить защиту оборудования от атмосферных осадков (дождь, снег);
- обеспечить температурный режим элементов оборудования при работе, хранении и транспортировке, а также предотвратить попадание конденсата на изоляцию при резкой смене температуры.

Очевидно, пусковой (и пускорегулирующий) агрегат наружного исполнения должен включать в себя все элементы схемы плавного пуска двигателя, как специально разработанные именно для этого изделия и поставляемые сейчас в комплекте Silcostart и Silcovert, так и элементы общего применения (выключатели, предохранители и т.п.), необходимые в схеме, но не поставляемые ныне в составе Silcostart или Silcovert. Так, например, для изделия Silcostart в комплект поставки не входят следующие необходимые в общей схеме элементы:

- основной выключатель питающей сети;
- байпасный выключатель;
- комплект силовых предохранителей;
- предохранители цепей синхронизации и цепей управления;
- предохранители и цепи питания вентиляторов системы охлаждения.

Для агрегата наружного исполнения все эти элементы должны быть включены в комплект поставляемого изделия и размещены в едином шкафу, защищающем оборудование от атмосферных осадков вместе с остальной (поставляемой ныне) частью пусковой схемы электрического двигателя. Это определяет размеры шкафа.

Оборудование выпускаемого сейчас агрегата Silcostart (ниже, для примера, речь будет идти только о нем) предназначено для следующих условий по температуре окружающей среды: при работе от 0 до +40°C (при полной мощности), при хранении от -30 до +85°C.

Из практики разработки электротехнических устройств для Севера, Сибири и Дальнего Востока расчетная температура наружного воздуха может быть принята от -55 до +40°C.

В принципе при создании пускового устройства Silcostart наружного исполнения можно выбрать все элементы и материалы, допускающие указанную температуру как при работе, так и при хранении. Это может быть выполнено на базе использования электротехнических комплектующих и конструкционных материалов, применяемых в военной технике. В основном переработке должна быть подвергнута система управления — регулирования — сигнализации (панели CONSSA, TARSSA, SPAV1). Эти панели придется разрабатывать практически заново. Кроме того, требуется замена всех резиновых прокладок на более морозостойкие (например, паранитовые), замена вентиляторов системы охлаждения (подшипники и резиновые амортизаторы), замена некоторых изделий из пластмассы, возможно, потребуется замена проводов и кабелей как силовой части, так и системы управления — регулирования.

Очевидно, указанное требует практически новой разработки, и вновь разработанное изделие будет существенно отличаться от выпускаемого ныне.

Однако в данном случае речь идет не о создании нового пускового устройства с новыми качествами (способность работать на открытом воздухе, работать при низких температурах и т.п.), а о возможности использования в России тех изделий, которые уже разработаны и выпускаются в настоящее время.

В данном случае задача решается очевидным способом: агрегат Silcostart вместе с добавочными необходимыми, но не поставляемыми ныне элементами помещаются в шкаф-контейнер, имеющий теплоизоляцию и нагревательное устройство.

Этот шкаф должен удовлетворять следующим требованиям:

а) нагреватель шкафа должен иметь мощность, достаточную для поддержания рабочей температуры внутри шкафа-контейнера при минимальной окружающей температуре неограниченно длительное время;

б) нагреватель должен быть оборудован системой терморегулирования, позволяющей поддерживать температуру хранения — I ступень либо рабочую температуру — II ступень;

в) шкаф-контейнер должен иметь теплоизоляцию, достаточную для сохранения температуры не ниже минимальной температуры хранения при исчезновении питающего напряжения на время до 30 мин при начальной температуре не ниже 0°C;

г) теплоизолирующие элементы шкафа должны иметь конструкцию, позволяющую их снятие на летний период времени и установку на холодное время года;

д) при конструировании шкафа-контейнера должны быть приняты меры для недопущения образования конденсата при резкой смене окружающей температуры, например путем обдува охлаждающим воздухом изоляционных поверхностей.

Отметим, что особенностью режима работы пускового агрегата Silcostart являются большое время нахождения в режиме ожидания, когда агрегат зашунтирован байпасным контактором, и кратковременные интервалы (до 80 с) загрузки на полную мощность. Штатный вентилятор системы охлаждения включается в нагрузочном режиме и выключен в режиме ожидания. Очевидно, воздух для охлаждения Silcostart не может забираться из окружающего пространства без установки воздушных фильтров. Это приведет к потере давления, снижению производительности вентилятора, установленного в Silcostart, и потребует установки дополнительного вентилятора. Кроме того, при минусовых температурах окружающего воздуха возможно выпадение росы на оборудовании, охлаждаемом вентилятором, а для нагрева струи воздуха с температурой  $-55^{\circ}\text{C}$  хотя бы до нулевой температуры требуется нагреватель весьма существенной мощности.

Учитывая кратковременность нагрузочных режимов пускового устройства Silcostart, более экономичным представляется другое конструктивное решение агрегата наружного исполнения. Предлагается использовать для собственной системы принудительного охлаждения Silcostart объем воздуха, заключенный в шкафу, т.е. рассчитать размеры шкафа не только по условиям размещения оборудования и создания необходимых изоляционных промежутков между разнопотенциальными частями, но также по условию создания в шкафу объема воздуха, достаточного для поглощения энергии потерь преобразователя за цикл рабочего режима. При этом автоматически решается вопрос о недопущении появления обильного конденсата, так как в начальный момент работы вентилятора Silcostart температуры воздуха и охлаждаемого объекта равны, а затем температура теплоотводящих поверхностей повышается быстрее, чем температура воздуха. Также отпадает необходимость в очистке охлаждающего воздуха.

Отметим, что в данной конструкции агрегата при летней температуре  $+40^{\circ}\text{C}$  и пусках с номинальной нагрузкой отсутствует перепад температур между внут-

ренним и наружным объемами воздуха. В этом случае представлялось бы необходимым искусственное охлаждение воздуха внутри шкафа с помощью холодильного устройства, что удорожает агрегат, увеличивает расход энергии и усложняет систему терморегулирования.

Представляется возможным избежать указанного следующим образом.

Из технических данных на преобразователь следует, что при необходимости эксплуатировать его при повышенных (выше  $+40^{\circ}\text{C}$ ) окружающих температурах (но не более  $+65^{\circ}\text{C}$ ) необходимо снижать мощность преобразователя на 1,2% при повышении температуры окружающего воздуха на каждый градус выше  $40^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, если Silcostart недогружен на 30% (и более) против своей номинальной мощности, предельно допустимую температуру воздуха внутри шкафа можно принять равной  $+65^{\circ}\text{C}$ .

Так, если для обслуживания асинхронного двигателя мощностью 160 кВт взять не STAT 310 мощностью 160 кВт, а следующий по типоряду Silcostart типа STAT 430 мощностью 220 кВт (на 38% больше необходимой), максимально допустимой температурой воздуха в шкафу можно считать  $+65^{\circ}\text{C}$ . Габаритные размеры того и другого агрегата равны, стоимость STAT 430 всего на 9% выше стоимости STAT 310. Предельно допустимый расчетный перепад температур наружного воздуха и воздуха внутри шкафа может быть принят равным  $25^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, при разработке шкафа для пускового устройства Silcostart-0 следует руководствоваться следующими положениями:

— мощность Silcostart выбирается не менее чем на 30% большей, чем мощность обслуживаемого двигателя;

— размеры шкафа должны быть такими, чтобы температура воздуха в нем при температуре наружного воздуха  $+40^{\circ}\text{C}$  при отсутствии теплоизоляционных стенок и  $0^{\circ}\text{C}$  при наличии теплоизоляции за время цикла работы не превысила  $65^{\circ}\text{C}$ ;

— при минусовых температурах окружающего воздуха стенки шкафа дополнительно утепляются панелями с теплоизоляцией, а внутри шкафа предусматривается подогрев, мощность которого обеспечивает температуру воздуха внутри шкафа не ниже  $0^{\circ}\text{C}$  при температуре наружного воздуха  $-55^{\circ}\text{C}$ .

Для примера ниже приводится расчет размеров шкафа и мощности подогревателей для шкафа-контейнера упомянутого агрегата STAT 430.

а) *Летний режим.* Расчетная температура наружного воздуха  $+40^{\circ}\text{C}$ . У стенок шкафа, выполненных, например, из стали толщиной  $\delta=1,5$  мм, отсутствует теплоизоляция. Площадь стенок шкафа  $F$  для передачи мощности  $P$ , выделяющейся внутри шкафа, наружному воздуху должна быть:

$$F = P/K(T_2 - T_1),$$

где  $K$  — коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ ;  $T_2 = 65^{\circ}\text{C}$  — допустимая температура воздуха в шкафу;  $T_1 = 40^{\circ}\text{C}$  — максимальная температура наружного воздуха.

$$K = 1/(1/\alpha_{\text{в}} + \delta/\lambda_{\text{с}} + 1/\alpha_{\text{н}}),$$

где  $\alpha_{\text{в}}$  — коэффициент теплоотдачи от воздуха внутри шкафа к стенкам. При скорости рециркуляции 5 м/с коэффициент теплоотдачи будет\*

$$\alpha_{\text{в}} = 21,78 \text{ ккал}/(\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot^{\circ}\text{C});$$

$\lambda_{\text{с}}$  — коэффициент теплопроводности для стали\*:

\* Нутце. Справочник инженера: Пер. с нем. Т. I. — М.: ГТИ, 1929. — 1194 с.

$$\lambda_c = 45 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}) = 52 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C});$$

$\alpha_n$  — коэффициент теплоотдачи от стенок к наружному воздуху. При отсутствии принудительного обдува коэффициент теплоотдачи будет

$$\alpha_n = 4,6 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}) = 5,324 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}),$$

тогда  $K = 4,394 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Площадь стенок шкафов и ориентировочные размеры шкафов будут при мощности потерь 840 Вт, заданной в паспорте:

$$F = \frac{840}{4,394(65 - 40)} = 7,646 \text{ м}^2.$$

Ориентировочные размеры шкафа:

$$L \times B \times H = 1,0 \times 0,7 \times 1,8 \text{ м}.$$

При этом поверхность стенок

$$F = 2(L \times B + L \times H + B \times H) = 2(1 \times 0,7 + 1 \times 1,8 + 0,7 \times 1,8) = 8,02 \text{ м}^2.$$

Объем шкафа  $M = L \times B \times H = 1 \times 0,7 \times 1,8 = 1,26 \text{ м}^3$ .

б) *Зимний режим.* Температура наружного воздуха от  $-55$  до  $0^\circ\text{C}$ . Стенки шкафа закрыты теплоизоляционными панелями с теплоизоляцией из пенопласта марки КЦ-101 толщиной  $\delta = 50$  мм с теплопроводностью  $\lambda_n = 0,057 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

За время рабочего режима ( $t = 80$  с) мощность, выделяемая Silcostart, расходуется на повышение температуры воздуха внутри шкафа и передачу тепла наружному воздуху.

Объем внутри шкафа и площадь его стенок должны быть такими, чтобы в конце рабочего режима температура воздуха в шкафу не превышала  $+65^\circ\text{C}$ .

Дифференциальное уравнение, описывающее процесс нагрева, сопровождающийся теплоотдачей:

$$P dt = C \cdot V \cdot \gamma \cdot d\theta + K \cdot F \cdot \theta_\gamma \cdot dt, \quad (1)$$

где  $P$  — мощность потерь, Вт;  $C$  — удельная теплоемкость воздуха ( $1,005 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{с}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ );  $V$  — объем воздуха,  $\text{м}^3$ ;  $\gamma$  — удельный вес воздуха при  $60^\circ\text{C}$  ( $1,06 \text{ кг}/\text{м}^3$ );  $K$  — коэффициент теплопередачи стенок шкафа с теплоизоляцией;  $F$  — поверхность стенок шкафа,  $\text{м}^2$ ;  $\theta_\gamma$  — превышение температуры воздуха в шкафу над температурой наружного воздуха.

При неизменном  $P$ , когда вся энергия отводится наружу и внутри шкафа устанавливается перегрев  $\theta_\gamma$ ,  $d\theta = 0$  и из формулы имеем:

$$P = K \cdot F \cdot \theta_\gamma, \quad (2)$$

т.е.

$$\theta_\gamma = P/K \cdot F. \quad (3)$$

При отсутствии теплоотдачи наружному воздуху  $K \cdot F \cdot \theta = 0$  и из формулы (1) будет:

$$P t = C \cdot V \cdot \gamma \cdot \theta. \quad (4)$$

За некоторое время  $t = \tau$  можно получить  $\theta_t = \theta_\gamma$ , а уравнение (4) примет вид:

$$P\tau = C \cdot V \cdot \gamma \cdot \theta_\gamma,$$

откуда

$$\theta_\gamma = P \cdot \tau / C \cdot V \cdot \gamma. \quad (5)$$

Из (3) и (5) получим постоянную времени  $\tau$ :

$$\tau = C \cdot V \cdot \gamma / K \cdot F. \quad (6)$$

Это время, за которое перегрев воздуха в шкафу достиг бы того же значения, что и при наличии теплоотдачи наружу. Интегрируя (1) и принимая во внимание, что при  $t = 0$  имеем  $\theta_t = \theta_0$ , получим уравнение:

$$\theta_t = \theta_\gamma (1 - e^{-t/\tau}) + \theta_0 \cdot e^{-t/\tau}. \quad (7)$$

Поскольку рабочий режим начинается при  $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ , уравнение примет вид:

$$\theta_t = \theta_\gamma (1 - e^{-t/\tau}). \quad (8)$$

Коэффициент теплопередачи  $K$ , когда стенки шкафа утеплены панелями с пенопластом, будет:

$$K = 1 / (1/\alpha_B + \delta_1/\lambda_C + \delta_p/\lambda_C + \delta_n/\lambda_n + 1/\alpha_n),$$

где  $\delta_1$  — толщина стальных листов;  $\delta_1 = 1$  мм и  $K = 0,906$  Вт/м<sup>2</sup>·°С.

Принимаем, что оборудование занимает около 20% внутреннего объема и объем воздуха в шкафу:

$$V_p = 0,8 \cdot 1,26 = 1,008 \text{ м}^3.$$

$$\tau = C \cdot V_p \cdot \gamma / K \cdot F = 147,78 \text{ с},$$

$$\theta_\gamma = P \cdot \tau / C \cdot V_p \cdot \gamma = 115,6^\circ\text{C},$$

$$\theta_{80} = \theta_\gamma (1 - e^{-t/\tau}) = 48,32^\circ\text{C},$$

что не превышает допустимой температуры  $65^\circ\text{C}$ .

При температуре наружного воздуха  $-55^\circ\text{C}$  для поддержания температуры внутри шкафов  $0^\circ\text{C}$  необходима мощность электронагревателей

$$P = K \cdot F (t_2 - t_1) = 0,906 \cdot 8,02 \{0 - (-55)\} = 400 \text{ Вт}.$$

15% общего количества отказов комплектующего оборудования вагонов. Проведенный анализ позволил выявить следующие причины отказов ПТК: скрытые дефекты комплектующих изделий (67% отказов), недоработки схемотехнического (13%) и технологического (15%) характера, а также нарушение условий эксплуатации (5%).

В перечне некачественных комплектующих элементов оказались, например, отдельные диоды, конденсаторы и резисторы. Схемотехнические ошибки проявились, в частности, случайными функциональными сбоями, обусловленными воздействием электромагнитных помех. Нарушения технологии производства сопровождались, к примеру, пробоем изоляции между обмотками маломощных трансформаторов или возникновением электрической дуги между контактами силовых разъёмов. Курьёзом на этом фоне выглядит факт эксплуатации ПУМ с неплотно закрытыми крышками.

Обобщение опыта эксплуатации ПТК привело к смене отдельных поставщиков комплектующих изделий и усилению контроля — входного и пооперационного — на стадии производства, а также к ужесточению режимов испытаний готовых узлов и ПТК в целом.

Устранение неисправностей в ПТК, выявляющихся в процессе эксплуатации, осуществляется в сервисных (Москва и г. Адлер) и ремонтном (г. Тверь) центрах. При этом отказавшие функциональные блоки и блоки управления определяются соответственно с помощью встроенных средств индикации и диагностики, а неисправные силовые узлы или отдельные элементы — по характерным признакам, свойственным их электрическому, механическому или тепловому разрушению. Почти годовой опыт ремонта отказавших изделий свидетельствует о том, что среднее

время восстановления работоспособного состояния ПТК не превышает 1 ч.

## **Выводы**

1. Разработан комплект частотно-регулируемых преобразователей для питания установок кондиционирования воздуха в отечественных пассажирских вагонах.
2. Освоен серийный выпуск этих комплектов преобразователей и осуществляется регулярная поставка их на вагоностроительный завод (г. Тверь).
3. Накоплен опыт успешной эксплуатации отечественных пассажирских вагонов с кондиционированием воздуха (на южном и восточном направлениях железных дорог РФ), что позволяет говорить о целесообразности дальнейшего совершенствования выпускаемых преобразователей и расширения сфер их применения.

В частности, на очередном заседании МВК, которое состоялось в Твери в ноябре 2000 г., НИЦ "ЭЛСИЭЛ" представил модернизированные опытные образцы ПТК-2М (в подвагонном и внутривагонном исполнении), которые обеспечивают питание как установок кондиционирования воздуха, так и бытовых электроприборов в вагонах. Подобные преобразователи могут найти применение не только на новых пассажирских вагонах, но и на вагонах электропоездов. Ими также могут быть оснащены эксплуатируемые пассажирские вагоны (в ходе их капитального ремонта).

*Более подробную информацию о деятельности НИЦ "ЭЛСИЭЛ" ВЭИ в области приводных преобразователей частоты можно получить по адресу:  
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, дом 12,  
телефон (факс): (095)361-94- 61,  
e-mail: elsyel@vei.ru*