

# Расчет теплового баланса

## при установке синусоидальных фильтров в шкафы управления с частотными преобразователями

**В последнее время сложилась устойчивая тенденция к росту применения частотных преобразователей на промышленных предприятиях, в области энергетики, нефтегазовой отрасли, коммунальном хозяйстве и т. д. Это связано с тем, что частотное регулирование электропривода позволяет значительно сэкономить электроэнергию и другие производственные ресурсы, обеспечивает автоматизацию технологических процессов, повышает надежность функционирования системы в целом. Широкий диапазон мощностей и различные варианты систем управления позволяют подобрать решение практически для любой задачи.**

Руслан Черекбашев

Виталий Хаймин

filtr@sin3.ru

Преобразователи частоты (ПЧ) используются как в новых проектах, так и при модернизации производства. Однако, при всех явных преимуществах, они обладают особенностями, которые, нисколько не умаляя их достоинств, тем не менее требуют дополнительного применения специальных устройств. Этими устройствами являются входные и выходные фильтры и дроссели (рис. 1).

Электроприводы являются хорошо известным источником помех. Входные фильтры призваны минимизировать наводки и помехи как в электронном оборудовании, так и от него, что позволяет обеспечить требования по электромагнитной совместимости (ЭМС). Задача уменьшения влияния на электросеть гармонических искажений, возникающих при работе ПЧ, решается установкой линейных дросселей перед ПЧ и дросселей постоянного тока. Сетевой

дроссель на входе ПЧ снижает также влияние перекоса фаз питающего напряжения.

Выходные фильтры используются для защиты изоляции, снижения акустического шума двигателя и высокочастотных электромагнитных помех в кабеле двигателя, подшипниковых токов и напряжения на валу, увеличивая тем самым срок службы двигателя и периоды техобслуживания. К выходным относятся фильтры  $dU/dt$  и синусные фильтры.

Стоит отметить, что синусные фильтры могут использоваться с частотой коммутации выше номинального значения, но их нельзя применять, если частота коммутации ниже номинального значения более чем на 20%. А фильтры  $dU/dt$  могут использоваться с частотой коммутации ниже номинального значения, но следует избегать их использования с частотой коммутации выше номинального значения, поскольку это вызовет перегрев фильтра.

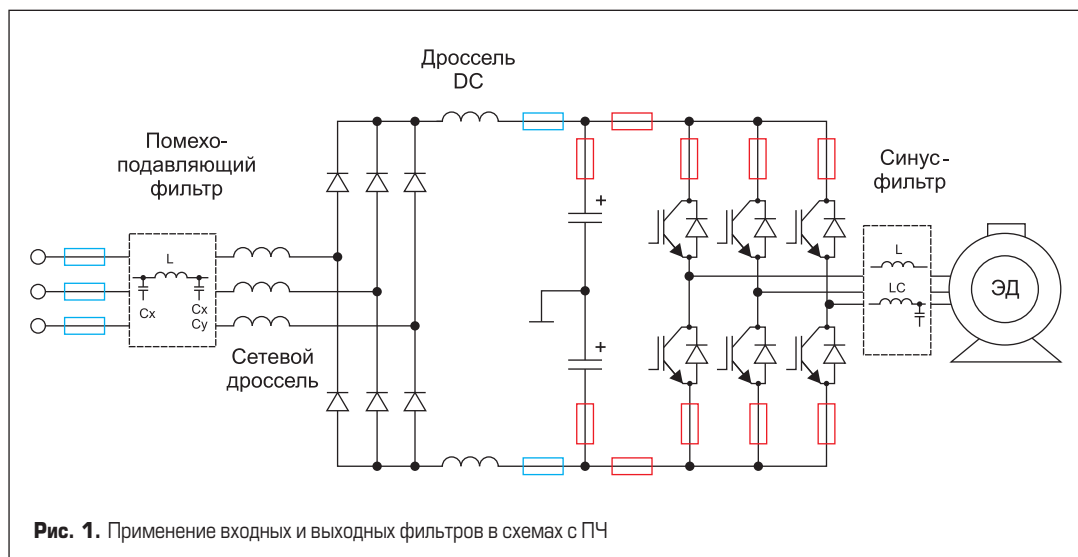


Рис. 1. Применение входных и выходных фильтров в схемах с ПЧ

В связи с тем, что фильтры/дроссели должны располагаться как можно ближе к ПЧ, они помещаются, как правило, вместе с ним в одном силовом шкафу, где также размещаются остальные элементы коммутации и управления (рис. 2).

При этом необходимо понимать, что мощные силовые фильтры и дроссели при работе выделяют значительное количество тепла (нагревается как сердечник, так и обмотка). В зависимости от типа фильтра потери могут достигать нескольких процентов от мощности нагрузки. Например, трехфазный линейный дроссель SKY3TLT100-0,3 производства чешской компании Skybergtch в сети 380 В имеет падение напряжения 4%, что при рабочем токе 100 А создает мощность потерь 210 Вт. Мощность электродвигателя при таком токе будет примерно 55 кВт, т. е. абсолютная потеря мощности на дросселе будет небольшая, менее 0,5%. Но так как эта мощность потерь выделяется в закрытом шкафу, то необходимо принимать специальные меры для отвода тепла.

Количество выделяемого тепла, как правило, пропорционально мощности, но зависит также и от конструктивных особенностей моточного элемента. Синусные фильтры будут выделять большее количество тепла, чем, к примеру, фильтры  $dU/dt$ , так как в них установлены дроссели и конденсаторы большего номинала, позволяющие обеспечить более эффективное сглаживание и подавление высоких частот. Значительные потери вносит активное сопротивление обмотки. Часто производители в целях экономии используют обмоточный провод меньшего сечения, иногда изготовленный не из меди, а из алюминия. На теплограмме (рис. 3) показаны два синусных фильтра одинаковой мощности, но разных производителей. Оба фильтра имеют одинаковую мощность потерь, но хорошо видно, что у фильтра слева больше



**Рис. 2.** Шкаф с частотным преобразователем, фильтрами и коммутационными устройствами

**Таблица 1.** Определение точки росы

	Относительная влажность окружающей среды, %	Температура окружающей среды, °C							
		20	25	30	35	40	45	50	55
40	6	11	15	19	24	28	33	37	
50	9	14	19	23	28	32	37	41	
60	12	17	21	26	31	36	40	45	
70	14	19	24	29	34	38	43	48	
80	16	21	26	31	36	41	46	51	
90	18	23	28	33	38	43	48	53	
100	20	25	30	35	40	45	50	55	

нагреваются обмотки, а у фильтра справа — сердечник. Естественно, что при прочих равных условиях фильтр справа прослужит дольше фильтра слева, т. к. перегрев обмотки гораздо больше влияет на долговечность фильтра из-за увеличения токов утечки по причине появления микротрещин в изоляции обмоток.

Надо также отметить, что использование различных материалов сердечника также сильно влияет на мощность потерь, т. е. на тепловыделение. Особенно сильно это сказывается при наличии в цепи высокочастотных помех. Так, чешский производитель Skybergtch производит два типа фильтров с одинаковыми параметрами SKY3FSM110-400E и SKY3FSM110-400EL-Rev.A. Во второй модели используется сердечник из более качественного материала, за счет чего мощность потерь снижена примерно на 10%. Следует отметить, что стоимость фильтра с лучшими тепловыми параметрами почти на 80% выше стоимости аналога. Поэтому при выборе фильтра надо обращать внимание и на экономический фактор.

Значительный нагрев силовых фильтров при номинальной мощности может быть в пределах допусков производителя, но тем не менее должен учитываться наряду с тепловыделением ПЧ при расчете теплового баланса силового шкафа. Современные ПЧ имеют КПД на уровне 97–98% и, как правило, являются основным источником тепловыделения в шкафу, но далеко не единственным. Помимо ПЧ, тепло выделяют помехоподавляющий фильтр, входной дроссель, моторный дроссель или синусный фильтр, контакторы и даже двигатель вентилятора охлаждения. Таким образом, недостаточно в расчетах необходимого потока обдува опираться только на тепловыделение самого инвертора.

Несоблюдение температурного режима может привести к неприятным, а иногда и очень серьезным последствиям: от сокращения срока службы оборудования до его возгорания. Поэтому поддержание оптимальной температуры в шкафах с оборудованием является важнейшей задачей. Есть много способов решения этой проблемы: использование шкафа другого объема, применение принудительного обдува, специальных теплообменников (в том числе с использованием жидкостного охлаждения) и кондиционеров воздуха. В этой статье мы остановимся на особенностях расчета классического принудительного воздушного охлаждения.

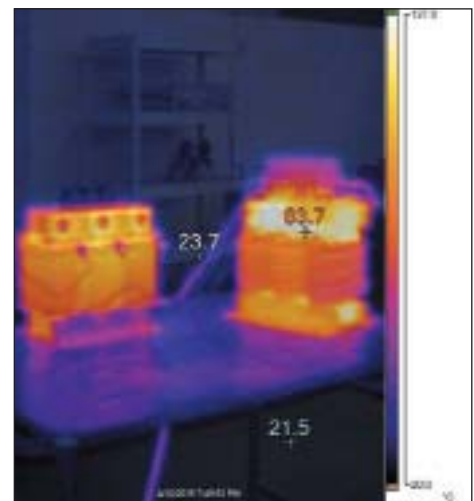
У производителей силовых шкафов есть специальные средства расчета теплового режима (к примеру, программа ProClima от Schneider Electric или ПО RittalPower Engineering, RittalTherm от производителя Rittal). Они по-

зволяют учесть тепловыделение всех элементов шкафа, включая автоматические выключатели, контакторы и пр. Учитывается при этом конструкция шкафа, его размеры и размещение относительно других шкафов.

Созданы эти программы для расчета теплового режима конкретных шкафов данного производителя, т. к. учитывают их конструктивные особенности, материал и т. д. Тем не менее, используя эти программы, вполне возможно произвести примерный расчет и для произвольного шкафа, если знать определенные исходные параметры.

Учитывать при этом надо как источники тепловыделения (потери мощности оборудования), так и площадь оболочки (поверхность шкафа). Должны быть известны данные по потерям мощности для всех встроенных устройств, размеры коммутационного шкафа. Необходимо задать также значения минимальной/максимальной температуры снаружи шкафа, влажность и высоту над уровнем моря (нужна будет для определения необходимой производительности потока воздуха). Относительная влажность используется для определения точки росы — температуры, ниже которой начинается образование конденсата. На нее надо ориентироваться при определении минимально допустимой температуры в шкафу (таблица 1).

Цель расчета — определение необходимости принудительного обдува/охлаждения/обогрева, при котором рассчитанная по потерям мощности внутренняя температура будет находиться в пределах максимально/минимально



**Рис. 3.** Теплограмма синусных фильтров разных производителей

**Таблица 2.** Выбор коэффициента  $b$  для определения эффективной площади оболочки

Тип установки	Коэффициент поверхности $b$
Открытая верхняя поверхность	1,4
Закрытая верхняя поверхность, например встроенных оболочек	0,7
Открытые боковые поверхности, например передняя, задняя и боковые стенки	0,9
Закрытые боковые поверхности, например задняя поверхность оболочек, смонтированных на стене	0,5
Боковые поверхности центральных оболочек	0,5

допустимых рабочих температур для устройств в шкафу.

Расчет теплового баланса силового шкафа с ПЧ состоит из нескольких этапов. На первом этапе необходимо рассчитать эффективную площадь поверхности теплообмена  $S_e$ . Поверхность шкафа контактирует с окружающей средой, температура которой отличается от температуры внутри шкафа. Эффективная площадь теплообмена  $S_e$  зависит от геометрических размеров и расположения шкафа, коэффициент для каждого элемента поверхности выбирается по таблице 2, в соответствии со стандартом МЭК 60890.

Общая эффективная площадь оболочки вычисляется по формуле:

$$S_e = \sum(S_0 \times b).$$

На втором этапе рассчитывается мощность тепловых потерь, выделяемых оборудованием внутри шкафа. Тепловая мощность шкафа определяется как сумма потерь мощности отдельных элементов, установленных в шкафу:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \dots$$

Тепловые потери отдельного установленного оборудования можно уточнить по их электрическим характеристикам. Для оборудования и проводников с неполной нагрузкой можно определить потери мощности по следующей формуле:

$$Q = Q_n \times (I_b/I_n)^2,$$

где:  $Q$  — потери активной мощности;  $Q_n$  — потери номинальной мощности (при  $I_n$ );  $I_b$  — действительное значение тока;  $I_n$  — номинальный ток.

Далее, с учетом известных значений температур окружающей среды ( $T_{emin}$ ,  $T_{emax}$ ), можно найти максимальные и минимальные значения температуры ( $^{\circ}C$ ) внутри шкафа:

$$T_{imax} = Q/(K \times S_e) + T_{emax},$$

$$T_{imin} = Q/(K \times S_e) + T_{emin},$$

где  $K$  — постоянная, учитывающая материал оболочки. Для некоторых распространенных материалов, использующихся для изготовления шкафов, она будет иметь следующие значения:

- $K = 12 \text{ Вт/ м}^2/^{\circ}C$  для оболочки из алюминия;
- $K = 5,5 \text{ Вт/ м}^2/^{\circ}C$  для оболочки из окрашенного металла;
- $K = 3,7 \text{ Вт/ м}^2/^{\circ}C$  для оболочки из нержавеющей стали;
- $K = 3,5 \text{ Вт/ м}^2/^{\circ}C$  для оболочки из полиэфира.

Обозначим требуемые значения температур внутри шкафа как  $T_{smin}$  и  $T_{smax}$ .

Далее принимаем решение о выборе необходимой системы поддержания микроклимата.

Если максимальное расчетное значение температуры превышает заданное ( $T_{imax} > T_{smax}$ ), то необходимо предусмотреть систему принудительной вентиляции, теплообменник или кондиционер воздуха. Мощность системы можно определить из выражения:

$$P_{охлаждения} = Q - K \times S_e \times (T_{smax} - T_{emax}).$$

Необходимый поток воздуха [ $\text{м}^3/\text{ч}$ ] можно рассчитать:

$$V = f \times P_{охлаждения} / (T_{smax} - T_{emax}),$$

где  $f$  — поправочный коэффициент (коэффициент  $f = C_p \times \rho$ , произведение удельной теплоемкости и плотности воздуха на уровне моря). Для различных высот над уровнем моря коэффициент  $f$  имеет следующие значения:

- 0–100 м  $f = 3,1$ ;
- 100–250 м  $f = 3,2$ ;
- 250–500 м  $f = 3,3$ ;
- 500–350 м  $f = 3,4$ ;
- 750–1000 м  $f = 3,5$ .

Если максимальное расчетное значение температуры менее заданного максимального ( $T_{imax} < T_{smax}$ ), то системы поддержания микроклимата (охлаждения) не требуется.

Если минимальное расчетное значение температуры ниже заданного ( $T_{imin} < T_{smin}$ ), то необходимо предусмотреть электрический нагреватель, мощность которого можно рассчитать по формуле:

$$P_{обогрева} = K \times S_e \times (T_{smin} - T_{emin}) - Q.$$

Если минимальное расчетное значение температуры выше заданного ( $T_{imin} > T_{smin}$ ), то системы поддержания микроклимата (подогрева) не требуется.

При расчете воздушного потока, создаваемого вентилятором, необходимо учитывать потери нагрузки, вызванные выпускными компонентами (воздухораспределительная решетка и фильтр, наличие или отсутствие вентиляционной решетки).

При проектировании должно быть обеспечено равномерное распределение потерь мощности внутри оболочки (шкафа), а расположение встроенного оборудования не должно препятствовать циркуляции воздуха. Несоблюдение этих правил потребует проведения более сложных тепловых расчетов для исключения вероятности локальных перегревов и эффекта байпаса. Комплектующие элементы должны быть рассчитаны таким образом, чтобы действующий ток цепей НКУ не превышал 80% номинального тока  $I_n$  устройств.

Рассмотрим расчет теплового баланса на конкретном примере.

### Исходные данные

Имеем шкаф из окрашенной листовой стали с габаритами ( $B \times Ш \times Г$ )  $2 \times 1 \times 0,6$  м, стоящий в ряду. В шкафу установлены два ПЧ, два сетевых фильтра и два выходных синусных фильтра, а также элементы коммутации, но ввиду их малой рассеиваемой мощности по отношению к указанному оборудованию ими можно пренебречь. Окружающая температура в помещении может изменяться в диапазоне  $-10 \dots +32$   $^{\circ}C$ . Относительная влажность 70%. Допустимая максимальная температура внутри шкафа  $+40$   $^{\circ}C$ . Минимальная допустимая температура в шкафу во избежание образования конденсата должна быть не менее точки росы, т. е. в нашем случае  $+26$   $^{\circ}C$  (табл. 1).

### Расчет

В соответствии с таблицей 2 общая эффективная площадь оболочки:

$$S_e = \sum S_0 \times b = 1,4(1 \times 0,6) + 0,5(2 \times 0,6) + 0,5(2 \times 0,6) + 0,9(2 \times 1) + 0,9(2 \times 1) = 5,64 \text{ м}^2.$$

На основании известной рассеиваемой мощности отдельных элементов оборудования находим ее суммарное значение. Для частотного преобразователя, КПД которого составляет 97–98%, за рассеиваемую мощность принимаем 3% от заявленной паспортной мощности. Так как при проектировании учитывается, что максимальная нагрузка не должна превышать 80% от номинального значения, то применим для коррекции суммарной тепловой мощности коэффициент 0,8:

$$Q = 1650 \times 2 + 340 \times 2 + 260 \times 2 = 4500 \times 0,8 = 3600 \text{ Вт}.$$

Далее, с учетом известных значений температур окружающей среды ( $T_{emin}$ ,  $T_{emax}$ ), находим максимальные и минимальные значения температуры внутри шкафа без охлаждения:

$$T_{imax} = 3600 / (5,5 \times 5,64) + 32 = 148,05 \text{ }^{\circ}C;$$

$$T_{imin} = 3600 / (5,5 \times 5,64) - 10 = 106,05 \text{ }^{\circ}C.$$

Поскольку максимальное расчетное значение температуры значительно превышает заданное ( $148,05 > 40$ ), то необходимо предусмотреть принудительную вентиляцию, мощность которой:

$$P_{охлаждения} = 3600 - 5,5 \times 5,64 \times (40 - 32) = 3351,84 \text{ Вт}.$$

Теперь мы можем посчитать необходимую производительность обдува. Для учета потерь нагрузки, вызванных выпускными компонентами (воздухораспределительная решетка, фильтр), заложим запас 20%. В итоге получаем, что для поддержания температурного баланса шкафа в рамках заданных значений необходим поток воздуха производительностью:

$$V = 3,1 \times 3351,84 / (40 - 32) = 1298,8 \times 1,2 = 1558,6 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Обеспечить такой поток воздуха можно установкой нескольких вентиляторов, поток воздуха от которых суммируется. Можно использовать, к примеру, вентиляторы Sunon A2179HBT-TC. Однако при этом следует также учесть падение производительности при наличии сопротивления потоку от установленных элементов шкафа. С учетом этого фактора в нашем случае можно будет установить два вентилятора W2E208-BA20-01 EBM-PAPST либо четыре вентилятора A2179HBT-TC от производителя Sunon. При выборе количества и места установки вентиляторов следует учитывать, что последовательное их включение увеличивает статическое давление, а параллельное — воздушный поток.

Принудительное воздушное охлаждение может быть реализовано вытяжкой нагретого воздуха (вентилятор установлен на выходе) из объема шкафа или нагнетанием холодного воздуха (вентилятор на входе). Выбор необходимого метода лучше делать еще на начальном этапе проектирования. У каждого из этих методов есть свои плюсы и минусы. Нагнетание воздуха позволяет обеспечить более эффективный обдув наиболее нагретых элементов, если те будут правильно расположены и попадут в основную струю воздуха. Усиление турбулентности потока позволяет увеличить общий отвод тепла. К тому же создаваемое нагнетанием избыточное давление не позволяет пыли проникнуть внутрь корпуса. У вытяжной же вентиляции из-за пониженного давления в объеме

шкафа пыль втягивается внутрь через все щели и отверстия. Увеличивается при расположении вентилятора на входе и его собственный ресурс, так как работает он при этом в струе холодного входного воздуха. Однако при размещении вентилятора на выпускной стороне тепло от работы самого вентилятора сразу отводится наружу и не влияет на работу оборудования. К тому же за счет создающегося при вытяжной вентиляции небольшого разрежения подсос воздуха осуществляется не только через основное отверстие впуска, но и через другие вспомогательные отверстия. При их оптимальном расположении вблизи источников тепла обеспечивается лучшее управление потоком.

При установке вентиляторов на входе рекомендуется их размещать в нижней части оболочки. Воздуховыпускную решетку, через которую удаляется нагретый воздух, при этом следует разместить в верхней части шкафа. Воздуховыпускная решетка должна обладать необходимой степенью защиты, при которой обеспечивается нормальная работа электроустановки. Следует при этом учесть, что установка выпускного фильтра того же размера, что и вентилятор, уменьшает реальную производительность вентилятора на 25–30%. Поэтому размер выпускного отверстия с фильтром должен быть больше размера входного отверстия с вентилятором.

При установке вентилятора на выходе они размещаются в верхней части шкафа. Впускные отверстия для воздуха при этом располагаются внизу и, дополнительно, вблизи источников наиболее интенсивного тепловыделения, что облегчает их охлаждение.

Добавим, что выбор необходимого метода обдува остается за проектировщиками, кото-

рые, с учетом всех вышеприведенных факторов, требуемой степени защиты IP и особенностей оборудования, должны выбрать наиболее подходящий. Важность же обеспечения оптимальной температуры в шкафах с оборудованием бесспорна. Приведенная методика расчета, опирающаяся на методы, предлагаемые разработчиками шкафов Schneider Electric, Rittal, в соответствии с МЭК 60890 допускает некоторые упрощения, использование эмпирических значений, но позволяет при этом с достаточной достоверностью осуществить практический расчет системы поддержания оптимального теплового баланса силовых шкафов с ПЧ и силовыми фильтрами.

## Литература

1. Хаймин В., Бахарь Е. Фильтры и дроссели компании Skybergtech // Силовая электроника. 2014. № 3.
2. IEC/TR 60890(2014) Узлы комплектного распределительного устройства низкого напряжения. Метод верификации повышения температуры с помощью расчета.
3. Каталог Sarel. Регулирование температуры в распределительных щитах. [www.schneider-electric.ru](http://www.schneider-electric.ru)
4. Правила создания НКУ согласно ГОСТ Р МЭК 61439. Техническая библиотека Rittal.
5. Охлаждение распределительных шкафов и процессов. Техническая библиотека Rittal 2013.
6. Вихарев Л. Как нужно работать, чтобы не сгореть на работе, или Кратко о методах и системах охлаждения полупроводниковых приборов. Часть 2 // Силовая электроника. 2006. № 1.