

Применение современных преобразователей частоты

В первом номере журнала «Силовая электроника» за 2004 год была опубликована статья «Современные преобразователи частоты. Методы управления и аппаратная реализация», в которой рассказывалось о методах построения современных преобразователей частоты (ПЧ) для управления асинхронными двигателями и о функциональном составе преобразователей. В данной статье будут описаны режимы работы преобразователей и основные области применения ПЧ в промышленности.

Дмитрий Петров

demien80@mail.ru

При написании статьи использовалась информация о работе ПЧ и реализуемых ими функциях, полученная на основе анализа продукции большинства присутствующих на рынке фирм, таких как LG, Mitsubishi, Vacon, Danfoss и др. В результате автор статьи пришел к выводам, что объем реализуемых функций у большинства ПЧ достаточно большой, однако в технической документации на них часто ограничиваются только формальным описанием этих функций и редко приводят примеры возможного их использования. Еще реже встречается информация о типичных областях применения преобразователя (таких, например, как поддержание давления, перекачка жидкости) и примера настройки преобразователя для работы в таком режиме. В результате большая часть поддерживаемых преобразователем функций остается невостребованной пользователем.

В данной статье автор описывает некоторые дополнительные функции ПЧ, использование которых может значительно повысить надежность работы преобразователя и двигателя и расширить спектр возможных применений преобразователей частоты. В статье также приведено несколько типовых примеров применения преобразователей частоты. Статья может оказаться полезной как разработчикам преобразователей частоты, так и их потенциальным потребителям.

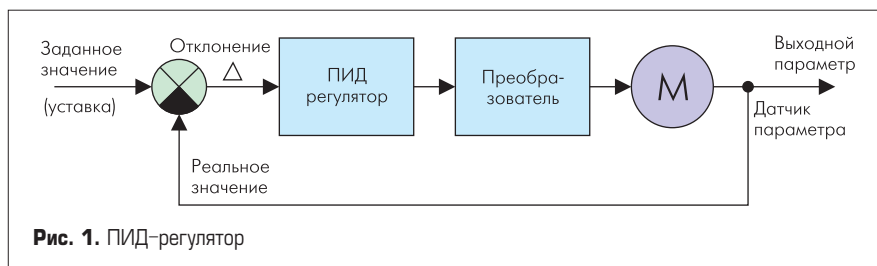
Режимы работы преобразователя

Можно выделить два принципиально отличающихся режима работы преобразователя частоты: работа в режиме поддержания выходной частоты и в режиме стабилизации внешнего параметра.

«**Частота**» — режим поддержания заданного значения частоты. Задание частоты может производиться с пульта управления, входа «задатчика» (аналогового входа) или комбинацией сигналов дискретных входов. Преобразователь непрерывно отслеживает сигнал задания частоты и изменяет в соответствии с ним свою выходную частоту.

Последние модели преобразователей многих производителей наряду с частотным реализуют также векторное управление двигателем. Это способ управления асинхронным двигателем, превосходящий по точности регулирования обычное частотное управление. Его применяют там, где требуется поддерживать момент на валу двигателя при малых скоростях вращения или обеспечить стабильную скорость при скачках нагрузки.

«**Параметр**» — работа ПЧ в режиме стабилизации внешнего параметра. Система стабилизации внешнего параметра строится на основе ПИД-регулятора, на входы которого подаются сигнал задания параметра (уставки) и сигнал с датчика регулируемого параметра. ПИД-регулятор формирует управляющий сигнал для преобразователя частоты, который за счет изменения скорости вращения двигателя поддерживает управляемую величину, равную заданной (рис. 1). В качестве внешнего параметра может использоваться расход жидкости, давление, температура и др. Информация с датчика поступает с внешнего аналогового входа. Значение уставки может задаваться с пульта управления, с внешнего аналогового входа или комбинацией сигналов дискретных входов.



Режимы управления преобразователем

1. Ручное управление — пользователь непосредственно управляет преобразователем путем подачи команд с пульта управления. Все события, такие как пуск и останов двигателя инициируются пользователем вручную. Разумеется, преобразователь полностью обрабатывает свои защитные функции и в случае возникновения нештатной ситуации способен самостоятельно остановить двигатель и уведомить пользователя о возникновении аварии.
2. Управление по событиям — как правило, в составе преобразователя имеются часы реального времени и существует возможность запрограммировать определенные действия по наступлению заданного времени. В качестве действий можно установить запуск или останов двигателя, установку нового значения выходной частоты или поддержания параметра. Имеется возможность задать требуемые действия не только на определенное время, но и на определенный день недели (один или несколько). В комбинации это дает пользователю широкие возможности для настройки преобразователя в режиме автономного функционирования.
3. Управление по «сухим контактам» — в составе даже простых моделей преобразователей частоты имеется различное количество гальванически развязанных дискретных входов управления, которые принято называть «сухими контактами». Они могут иметь жестко определенные функции, такие как разгон, торможение, аварийный останов, установленные значения скорости, или же иметь возможность программирования функций пользователем. При управлении по «сухим контактам» преобразователь является составной частью внешней системы управления (ее исполнительным механизмом).
4. Внешнее управление — режим управления преобразователем от внешнего управляющего устройства. Как правило, для этого используется интерфейс RS232 или RS485. В качестве внешнего устройства управления может использоваться персональный компьютер со специальным программным обеспечением, позволяющий не только управлять преобразователем, но и просматривать информацию о его текущем состоянии. Часто имеется возможность управления преобразователем с внешнего пульта управления, который может располагаться на достаточном удалении (ограничения, накладываемые интерфейсом передачи данных на максимальную длину линии связи обычно составляют несколько сотен метров).

Дополнительные защитные функции

Увеличение мощности управляющих контроллеров и жесткая конкуренция производителей привели к появлению наряду с обязательными защитными функциями (защиты

от короткого замыкания, превышения или провала напряжения сети) некоторых дополнительных, которые позволяют увеличить надежность работы как преобразователя частоты, так и привода в целом.

Тепловая защита двигателя

Это программная реализация защиты от перегрева двигателя, вызванного превышением тока обмоток и выделением избыточного тепла. Может заменить тепловое реле в выходных цепях ПЧ. В преобразователях некоторых фирм данная функция имеет название «электронное тепловое реле». Ее применение не требует использования датчика температуры двигателя.

Этот вид защиты двигателя реализован путем непрерывного расчета контроллером ПЧ перегрева двигателя. Перегрев двигателя определяется как разность между количеством тепла, выделяющегося в обмотках двигателя (1) и количеством тепла, которое способен рассеять двигатель в общепромышленных условиях применения (2).

$$P_{\text{нагр}} = (I_{\text{ном}} \times K_{\text{пер}})^2 \times t \quad (1)$$

$$P_{\text{охл}} = (I_{\text{ТМ}})^2 \times t \quad (2)$$

Здесь $I_{\text{ТМ}}$ — ток тепловой модели двигателя (модели охлаждения двигателя). Вид тепловой модели двигателя показан на рис. 2. Модель определяет зависимость допустимых токов, протекающих через обмотки двигателя, от частоты вращения двигателя. Работа двигателя в пределах допустимой области графика может быть долговременной, без перегрева. При выходе значения тока за допустимые пределы происходит увеличение мощности, рассеиваемой в обмотках двигателя, и его повышенный разогрев.

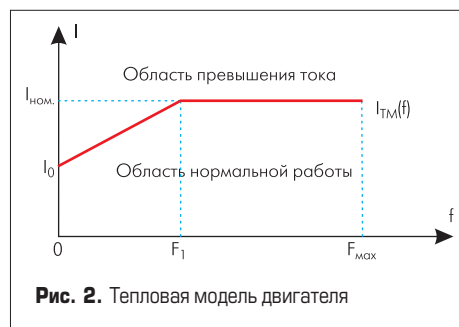


Рис. 2. Тепловая модель двигателя

Для описания тепловой модели двигателя необходимо задание трех параметров: $I_{\text{ном}}$, I_0 , F_1 . Они полностью определяют характер тепловой модели. Для общепромышленных условий применения двигателя значение тока I_0 составляет 30% от номинального тока ПЧ, частота F_1 составляет 40 Гц. Если условия эксплуатации двигателя иные (например, холодное помещение или специальный принудительный обдув двигателя), то пользователь может сам определить параметры тепловой модели для имеющихся условий эксплуатации.

Значение текущего перегрева определяется преобразователем по формуле (3).

$$S_{\text{мек}} = \left[\left(\frac{I_{\text{эфф}}}{I_{\text{ТМ}}} \right)^2 - 1 \right] \times t_{\text{инт}} \quad (3)$$

где $I_{\text{эфф}}$ — эффективный ток на выходе ПЧ для текущей частоты, усредненный за период интегрирования; $I_{\text{ТМ}}$ — значение тока тепловой модели для текущей частоты ПЧ; $t_{\text{инт}}$ — период интегрирования.

Значение допустимого перегрева двигателя обычно задается сочетанием двух параметров: коэффициента превышения тока и времени превышения тока. Первый определяет допустимое увеличение тока через двигатель (относительно тока тепловой модели). Второй параметр — максимальное время, в течение которого происходит это увеличение тока. Вычисленное значение программного перегрева по формуле (3) суммируется в цикле с предыдущими вычисленными значениями, и полученная сумма сравнивается с максимально допустимым перегревом, определяемым по формуле (4).

$$S_{\text{пер}} \% = [K_{\text{перегр}}^2 - 1] \times t_{\text{перегр}} \times 100\% \quad (4)$$

Введение программной защиты от перегрева и подобного описания тепловой модели позволяет значительно повысить надежность работы привода при долговременной работе.

Защита от резкого изменения регулируемого параметра

- Определение обрыва трубопровода. Это может помочь, например, при работе преобразователя на вентиляторную или насосную нагрузку. При обрыве трубопровода увеличивается расход жидкости или газа за счет больших утечек через разрыв, при этом скорость двигателя доходит до максимальной, а требуемое значение параметра не может быть достигнуто. В данной ситуации преобразователи, реализующие эту функцию, выдают предупреждающий сигнал на специальный выход.

- Определение блокировки трубопровода. В случае блокировки трубопровода (выше места установки датчика давления) давление в системе начинает уменьшаться и преобразователь увеличивает скорость работы насоса. Однако расхода жидкости или газа нет, и ток двигателя остается небольшим. Если скорость двигателя достигла максимальной при небольшом токе двигателя, преобразователь выдает предупреждающий сигнал на специальный вывод. В обоих случаях после выдачи предупреждающего сигнала преобразователь в зависимости от настроек может продолжить работу или остановиться.

Защита от кратковременных перегрузок

Применяется, например, для защиты от заклинивания вала двигателя. Срабатывает в случае, если ток больше, а частота меньше заданного значения в течение заданного времени. Так как при отсутствии датчика скорости преобразователь не имеет прямой информации о скорости вращения вала, то такая защита является разновидностью защиты от превышения тока.

Дополнительные функциональные возможности

Эти функции позволяют расширить спектр возможных применений преобразователя и строить на его основе достаточно эффектив-

ные системы автоматического управления и регулирования.

Управление дополнительным двигателем

При работе преобразователя в режиме поддержания внешнего параметра может возникнуть такая ситуация, что мощности двигателя, которым управляет преобразователь, окажется недостаточно (например, для поддержания заданного давления в магистрали, напора воды в резервуаре и др.). Для этого в преобразователях некоторых фирм имеется выход включения дополнительного двигателя. Преобразователь не управляет дополнительным двигателем, не осуществляет его плавный разгон или плавное торможение. Он только подает команду на его включение в случае, когда мощности основного двигателя недостаточно.

Включение дополнительного двигателя будет производиться при одновременном соблюдении следующих трех условий:

1. Частота ПЧ достигла $F_{\text{вых}}$ или большего значения.
2. Значение датчика параметра меньше значения уставки параметра на величину, большую заданной разности параметров.
3. Первые два условия соблюдаются в течение заданного времени.

Выключение дополнительного двигателя производится, когда мощности основного двигателя снова становится достаточно для поддержания требуемого значения внешнего параметра. Условия выключения дополнительного двигателя:

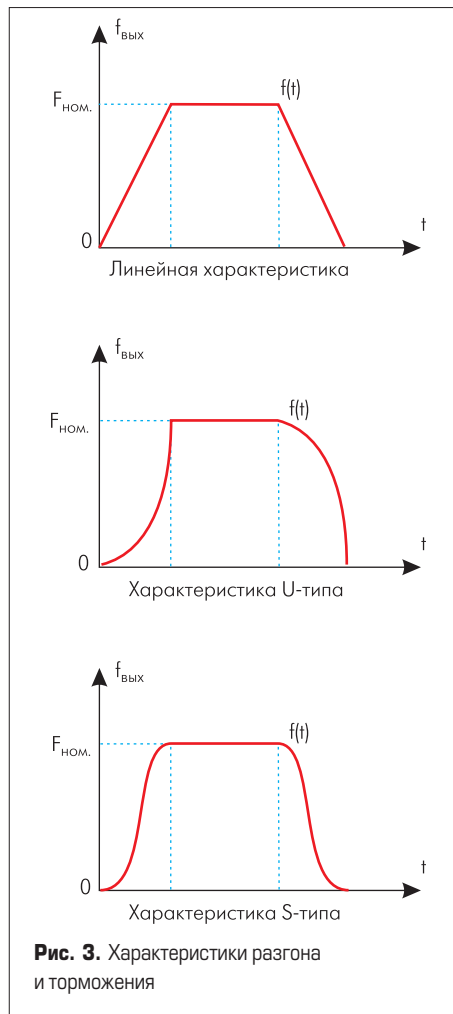
1. Частота на выходе ПЧ снизилась до значения $F_{\text{вых}}$ или меньшего значения.
2. Значение датчика параметра при этой частоте превышает значение задатчика на величину, большую заданного значения.
3. Первые два условия соблюдаются в течение времени большего, чем заданное.

Непосредственно перед включением (выключением) дополнительного двигателя ПЧ может немного снизить (повысить) выходную частоту. Это делается для предотвращения резкого броска внешнего параметра (для насосов, например, — для исключения гидроудара).

Поиск скорости двигателя

Эта функция полезна тогда, когда необходимо подключить к преобразователю частоты уже вращающийся двигатель. Обычно преобразователь осуществляет свой запуск со стартовой частоты и доходит до заданной частоты за некоторое время разгона. Если двигатель при этом вращается, произойдет рывок, что часто недопустимо. Преобразователи, оснащенные функцией поиска скорости, анализируют параметры двигателя и начинают вращать двигатель именно с той частоты, на которой он вращается в данный момент. Области применения данной функции — там, где требуется «подхват» вращающегося двигателя после перебоя в питании или при переходе с питания от сети на питание от преобразователя частоты.

При использовании внешней контактной аппаратуры возможно управление несколькими двигателями от одного преобразователя. Плавный разгон каждого двигателя осуществляется преобразователем, после чего двигатель



переключается на питание от сети, а преобразователь производит разгон следующего двигателя. Для этого необходимо предварительно синхронизировать двигатель по фазе и частоте с питающей сетью.

При работе в таком режиме один из двигателей обычно является основным, то есть эксплуатируется большую часть времени. Для равномерной выработки ресурса всех подключенных двигателей статус основного двигателя присваивается по очереди каждому из них.

Различные настройки разгона и торможения

Для уменьшения перегрузок при включении и отключении двигателя преобразователь осуществляет его плавный разгон и торможение. Для эффективного управления приводами различного промышленного назначения используются различные виды характеристик разгона и торможения. Наиболее распространенные из них показаны на рис. 3.

- Линейная характеристика — стандартная характеристика, используемая для постоянного момента нагрузки двигателя.
- Характеристика S-типа — характеристика плавного разгона и торможения, которая предотвращает рывки и колебания механизма во время разгона и торможения.
- Характеристика U-типа — используется для эффективного разгона и торможения механизмов с вентиляторной и насосной нагрузкой.

Использование внешнего тормозного прерывателя

Максимальная скорость разгона двигателя ограничена максимальной мощностью или

моментом, который может обеспечить преобразователь при разгоне двигателя.

Максимальная скорость торможения ограничена допустимым увеличением напряжения в звене постоянного тока. Увеличение напряжения происходит за счет того, что при торможении двигатель работает в рекуперативном режиме и кинетическая энергия его вращения преобразуется в электрическую энергию, которая возвращается в звено постоянного тока преобразователя. Это приводит к увеличению напряжения на конденсаторах звена постоянного тока. При увеличении его выше максимально допустимого предела возможен выход из строя либо конденсаторов, либо выходных силовых ключей.

Некоторые преобразователи позволяют использовать внешний тормозной прерыватель, который подключается параллельно звену постоянного тока и состоит из силового ключа и мощного резистора, на котором происходит рассеяние избыточной энергии конденсаторов звена постоянного тока. Применение тормозного прерывателя позволяет уменьшить время торможения. Это может быть особенно полезным для механизмов с большим моментом инерции.

Пропуск резонансных частот

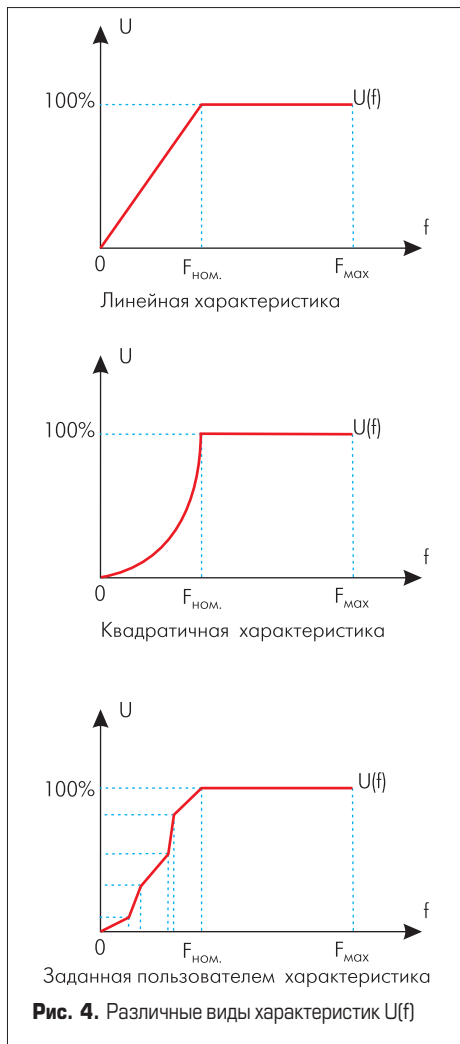
При работе преобразователя существует возможность пропускать при разгоне и торможении двигателя частоты, при которых в механизме наблюдаются вибрации и резонансные явления. Это позволит продлить ресурс привода и избежать нежелательных шумов при разгоне и торможении. Обычно имеется возможность задания от 2 до 5 резонансных частот, а также задания ширины резонансной зоны.

Различные виды характеристики $U(f)$

Характеристика $U(f)$ определяет зависимость амплитуды напряжения, подаваемого на двигатель, от частоты его вращения. При подаче на двигатель полного значения номинального напряжения при частоте вращения близкой к нулю возможен выход двигателя из строя из-за превышения тока обмоток и их перегрева. Использование специальной зависимости напряжения, подаваемого на двигатель, от частоты его вращения, позволит продлить время работы двигателя и повысить надежность работы привода в целом.

Обычно преобразователь предоставляет пользователю возможность выбора одного из предустановленных типов характеристик $U(f)$ или же возможность задания собственного вида характеристики в табличной форме (рис. 4).

- Линейная характеристика используется при постоянном моменте нагрузки. Выходное напряжение пропорционально выходной частоте от нуля до номинальной частоты.
- Квадратичная характеристика используется при переменном моменте нагрузки. Выходное напряжение пропорционально квадрату выходной частоты. Применяется в механизмах с вентиляторной нагрузкой.
- Пользовательская характеристика предназначена для специального применения. Пользователь может самостоятельно определить вид характеристики применительно к конкретному механизму.



Дополнительные сервисные функции

Режим экономии электроэнергии. Используется для экономии энергии на пониженных нагрузках. По окончании разгона в случае пониженной нагрузки преобразователь снижает выходное напряжение. Необходимо заметить, что в случае резкого увеличения нагрузки в этом режиме возможно срабатывание токовой защиты.

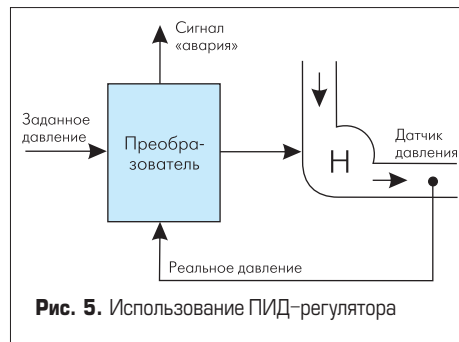
Статистика работы. Для определения выработанного ресурса двигателя применяется приближенная оценка среднего времени его работы. При использовании преобразователя частоты возможен учет времени работы двигателя средствами самого преобразователя. Это значение будет заведомо более точным и не потребует от пользователя дополнительных расчетов.

Статистика аварий. Большинство преобразователей сохраняет в энергонезависимой памяти историю срабатывания защит или аварий с указанием точного времени и причины аварии. Это является особенно полезным при автономной работе устройства в необслуживаемом режиме.

Примеры применения преобразователей частоты

Использование ПИД-регулятора, поддержание давления в магистрали

В данном примере преобразователь работает в режиме поддержания внешнего парамет-



ра. Преобразователь частоты устанавливается между питающей сетью и электродвигателем для обеспечения обратной связи. Информация о значении параметра поступает с датчика давления, установленного в магистраль на выходе насосного агрегата. Кроме того, на преобразователь подается сигнал задания давления (сигнал уставки). Преобразователь определяет разницу между действительным и заданным значением давления, вычисляет требуемое выходное воздействие (значение выходной частоты) согласно заданным параметрам закона регулирования и управляет подключенным насосом (рис. 5).

Для повышения надежности работы такой системы уместно использовать защиты от возможного разрыва трубопровода и от возможной его блокировки.

Управление от сухих контактов, поддержание уровня жидкости

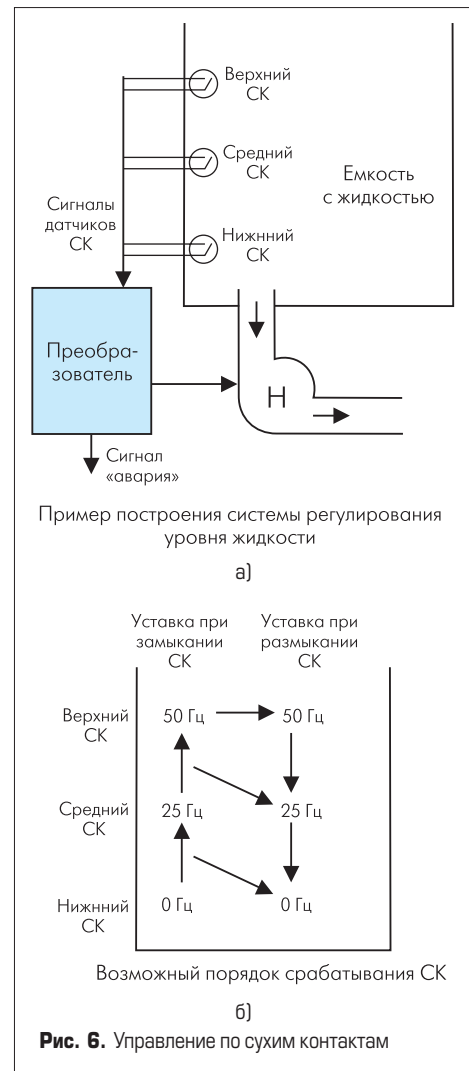
В этом примере используется управление преобразователя от внешних дискретных входов — сухих контактов. Преобразователь в данном случае работает в режиме поддержания выходной частоты. Задаваемые значения частоты (значения уставки) сопоставлены замыканию и размыканию контактов. Схема подключения преобразователя и сухих контактов показана на рис. 6а. Подобное применение преобразователей наиболее часто используется на канализационно-насосных станциях.

Сухие контакты, расположенные на разных уровнях, являются датчиками уровня жидкости в резервуаре. Обычно контролируются минимальный, максимальный и один или несколько промежуточных уровней. Настройкой сухих контактов задается реакция преобразователя на срабатывание каждого датчика. Пример возможной настройки датчиков показан в таблице 1.

На рис. 6б показан порядок срабатывания контактов при увеличении и уменьшении уровня жидкости в резервуаре. При отсутствии замкнутых контактов уровень жидкости в резервуаре минимальный. Насос отключен. При замыкании нижнего контакта уровень все еще считается допустимым, включать насос пока нет необходимости. Уставка частоты

Таблица 1. Пример настройки датчиков СК

Расположение контакта	Приоритет срабатывания контакта	Уставка на замыкание контакта	Уставка на размыкание контакта
Нижний	0	0 Гц	0 Гц
Средний	1	25 Гц	25 Гц
Верхний	2	50 Гц	50 Гц



на замыкание контакта 0 Гц. При замыкании среднего контакта насос включается на половину оборотов: уставка на замыкание 25 Гц. При замыкании верхнего контакта насос включается на полную мощность — уставка 50 Гц.

При размыкании «сухих контактов» частота снижается в обратном порядке. При размыкании верхнего контакта снижения оборотов насоса не происходит — понижение уровня жидкости пока не является достаточным. При размыкании среднего частота насоса снижается наполовину: уставка на размыкание контакта 25 Гц. При размыкании всех контактов двигатель насоса останавливается — уставка 0 Гц.

Для повышения надежности работы системы возможно использование защиты от не последовательного срабатывания сухих контактов. Для этого каждому контакту задается приоритет срабатывания и проверяется условие, что замыкание контакта с наибольшим приоритетом должно быть подтверждено замыканием всех контактов с меньшими приоритетами. Невыполнение этого условия означает выход из строя одного или нескольких датчиков и позволит предотвратить некорректную работу системы.

Управление по событиям, поддержание давления в магистрали

Задача преобразователя в данном примере — поддержание заданного давления в магистрали насосной станции, которая обеспечивает водопроводной водой один или несколько жилых домов.



Режим работы преобразователя — поддержание заданной выходной частоты. Управление преобразователем в этом примере производится по событиям (наступление заданного пользователем момента времени). Реакция преобразователя на наступление события — изменение уставки выходной частоты.

В данном примере не используется датчик давления, установленный в магистраль, и регулирующий давление ПИД-регулятор. Это сделано из-за того, что при достаточно

большом количестве потребителей воды ее расход хорошо описывается статистическими закономерностями и график расхода является примерно одинаковым для каждого дня. Упрощенный вид графика суточного расхода воды показан на рис. 7.

Из графика видно, что в пределах одних суток расход воды меняется почти в 6 раз. Считая, что двигатель насоса при максимальной подаваемой на него мощности сможет обеспечить напор воды в трубопроводе, достаточ-

Таблица 2. Расписание работы преобразователя

Время наступления события	Мощность работы насоса
0 час	45%
1 час	15%
5 час	20%
6 час	45%
7 час	70%
8 час	100%
9 час	50%
18 час	60%
20 час	80%
22 час	100%
23 час	60%

ный для покрытия пиковой потребности потребителей, можно привести примерные настройки преобразователя, соответствующие показанному графику расхода воды. Пример настроек показан в таблице 2. Так как зависимость мощности насоса от частоты вращения двигателя нелинейна, то для повышения наглядности в качестве реакции на событие показана не частота вращения двигателя насоса, а доля от максимальной мощности, развиваемой насосом.