

# РАЗРАБОТКА НАДЕЖНОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ АППАРАТУРЫ СВЯЗИ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*В. А. Костылев, доктор технических наук, Председатель Совета директоров;*

*В. Д. Комаров, доктор технических наук, научный директор;*

*А. В. Лысов, технический директор;*

*С. М. Кисляков, начальник НИО;*

*И. В. Белопольский, начальник отдела;*

*Д. В. Майоров, начальник отдела*

**СЦЕЛЮ** обеспечения безопасности различных объектов ЗАО НПФ «Сигма» проводит разработку и производство надежных помехоустойчивых модемов, терминалов и аппаратуры связи, систем гарантированного электроснабжения стационарных и полевых узлов связи, переносных зарядных устройств, обеспечивающих автоматический заряд аккумуляторных батарей (АБ), исключающих ошибки оператора и аппаратуры оповещения, позволяющей принимать меры в случае возникновения чрезвычайных ситуаций, способствующих предотвращению их последствий.

## 1. Создание помехозащищенных систем связи для эффективной передачи информации

Важной задачей является построение систем передачи информации по различным типам существующих каналов связи с высокой достоверностью и максимальными скоростями. При этом к разрабатываемой аппаратуре предъявляются высокие требования по помехоустойчивости.

Одним из путей её решения является внедрение в практику использования модельных экспериментов на этапах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и испытаний аппаратуры передачи данных. Моделирование канала связи дает возможность проведения испытаний различных устройств в условиях, максимально приближенных к реальным, обеспечивает высокую информационную емкость и объективность результатов, а также позволяет сократить объём испытаний.

Основными методами повышения помехоустойчивости при работе по аналоговым каналам ТЧ является: сигнально-кодовое кодирование на основе 4-хмерного сигнального созвездия (треллис-кодирование); формирование выходного сигнала передатчика с минимальной мощностью (шейпинг выходного сигнала передатчика); нелинейное предварительное кодирование; нелинейное растяжение сигнального созвездия.

Для каналов, образованных КВ радиосредствами, характерно наличие значительного частотного расогласования, которое в определенных ситуациях может находиться в диапазоне  $\pm 100$  Гц. Кроме того, при переходе пути распространения сигнала с одного луча на другой возникает существенный временной джиттер принимаемого сигнала. В таких условиях затруднительным оказывается не только быстрое вхождение в связь, но и удержание синхронизации. Для этого в приемнике КВ модема выпол-

няется двумерный поиск синхронизации по частоте и времени. Значения оцениваемых параметров уточняются на следующих стадиях обработки принятого сигнала.

В современных КВ модемах широко используются методы помехоустойчивого кодирования. В основном это сверточное кодирование и блочные коды Рида-Соломона в различных сочетаниях. Данные методы позволяют получать существенно лучшие результаты по сравнению с ранее использовавшимися более простыми кодами. В настоящее время идет интенсивный анализ возможности использования в КВ модемах высокоэффективных турбо-кодов и эффективных для определенных ситуаций вувен (woven)-кодов. Существенный выигрыш по помехоустойчивости к интерференционной помехе дают методы адаптивной компенсации помех.

Стандартными методами повышения достоверности в технологии DSL являются методы сверточного и решетчатого кодирования, методы декодирования с мягким решением, коррекция АЧХ и др. Данные методы используются в стандартах: G.961 (IDSL), G.991.1 (HDSL), G.991.2 (SHDSL) и G.992.1 (ADSL).

Ошибки, возникающие в каналах передачи информации, носят как случайный, так и системный характер (ошибки, возникающие из-за дефектов каналов, — повторные ошибки). Эффективными методами борьбы с дефектами каналов являются методы вычисления и хранения синдромов повторных ошибок. Появляющиеся повторные ошибки в каналах запоминаются, анализируются, и эта информация помогает более рационально использовать вычислительные ресурсы с максимальным энергетическим выигрышем и выигрышем по быстродействию.

## 2. Математическая модель и имитатор различных сред передачи информации

Рассмотренные выше механизмы повышения достоверности требуют реализации математической модели и имитатора среды передачи информации. Таким образом, актуальной является задача внедрения в практику использования модельных экспериментов. Моделирование канала связи дает возможность проведения испытаний различных устройств в условиях, максимально приближенных к реальным, обеспечивает высокую информационную емкость и объективность результатов, а также позволяет сократить объём испытаний.

Процессы передачи и приема информации необходимо рассматривать в зависимости не только от

случайных помех и дефектов в канале связи  $\sum_{j=1}^N \xi_{C_j}$ , но

и от случайных процессов возникновения ошибок и дефектов, вызванных аппаратурными отказами и сбоями, в передатчике  $\xi_{прм}$  и приемнике  $\xi_{прд}$ :

$$\{\hat{x}_i\} = D_{прм} \left\{ D_C \left[ D_{прд} (x_i + \xi_{прд}) \right] + \sum_{j=1}^N \xi_{C_j} + \xi_{прм} \right\},$$

где

$\{\hat{x}\}$  — принимаемое сообщение;

$\{x\}$  — передаваемое сообщение;

$D_{прм}, D_{прд}, D_C$  — операторы способов приема, передачи информации и среды распространения сигнала;

$N$  — число независимых источников помех в канале связи.

Искажения сигналов и помехи в реальном канале тональной частоты (ТЧ) весьма разнообразны. Тем не менее, математическая модель канала должна по возможности точно описывать основные особенности.

Рассмотрим модель проводного канала ТЧ. Как показывают многочисленные исследования, ее можно представить в виде последовательного соединения нелинейного безынерционного звена (БЗ) с амплитудной характеристикой  $\chi(\cdot)$  и линейного фильтра с импульсной характеристикой  $h(t, \tau)$  (рис. 1). Для реальных каналов характерно рассеяние (дисперсия) энергии передаваемого сигнала во времени или частоте, а также наличие мультипликативных  $\mu(t)$  и аддитивных помех  $n(t), p(t), c(t)$ . Аддитивные помехи содержат три составляющие: флуктуационную, импульсную (сосредоточенную по времени) и гармоническую (сосредоточенную по частоте).

Флуктуационная помеха  $n(t)$  в полосе частот канала ТЧ в большинстве случаев имеет нормальное распределение, а ее спектр приблизительно соответствует спектру белого шума. Причинами флуктуационных помех являются не только собственные шумы активных и пассивных элементов каналообразующей аппаратуры, но и взаимное влияние между отдельными каналами ТЧ высокочастотного тракта или цепями кабельных линий, а также внешние электромагнитные воздействия.

Импульсные помехи вызываются различными причинами естественного и искусственного происхождения и представляют собой специфический случайный процесс  $p(t)$ , в котором энергия сконцентрирована на небольших отрезках временной оси. Импульсные помехи чаще всего проникают в канал через линейный тракт системы передачи и на выходе канала. ТЧ представляют собой реакцию канала на ударное воздействие короткого импульса длительностью около 75 мкс. Форма импульсной помехи на выходе канала связи практически не зависит от точки попадания импульса в высокочастотном или низкочастотном тракте.

Сосредоточенные (гармонические) помехи  $c(t)$  напоминают по форме гармонический сигнал, модулированный по амплитуде и фазе медленно меняющимся

случайным процессом. Гармонические помехи представляют собой напряжения фона переменного тока частотой 50 Гц и их высших гармоник, а также синусоидальные помехи более высоких частот, попадающие в канал за счет передачи по соседним линиям служебных сигналов (импульсов абонентской платы, сигналов селекторного вызова и пр.). Фоновые напряжения частотой 50 Гц могут достигать эффективного значения до 100 мВ. Энергия такой помехи, в отличие от импульсной, сконцентрирована на небольших отрезках оси частот, что приводит на определенных интервалах времени к появлению не случайных ошибок, а дефектов в передаваемых битах информации.

Мультипликативные помехи  $\mu(t)$  в каналах связи представляют собой случайные процессы и выражаются в основном в изменении остаточного затухания, приводящего к плавным или резким изменениям уровня сигнала. Занижение уровня на значение более 17,4 дБ относительно номинального называется перерывом. При длительных перерывах на коммутируемых каналах происходит нарушение связи, и для ее возобновления требуется установление нового соединения.

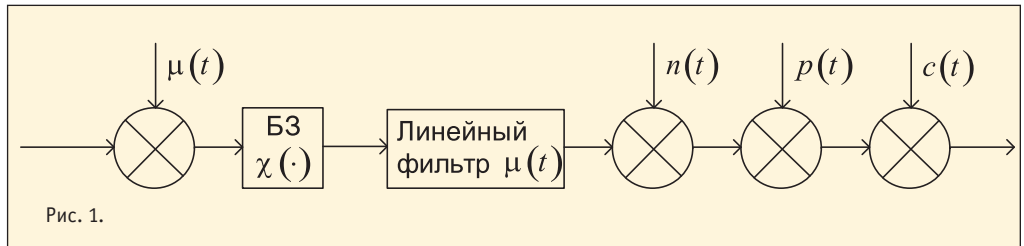


Рис. 1.

Модель непрерывного канала связи можно описать следующим выражением:

$$y(t) = \int_0^t \chi[\mu(t) \cdot s(t-\tau)] \cdot h(t, \tau) \cdot d\tau + n(t) + p(t) + c(t)$$

Для того чтобы выбрать модель канала, адекватную реальной передающей среде, рассмотрим более подробно основные ее первичные характеристики. В их число входят: амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)  $K(\omega, t) = |K(\omega, t)| \cdot e^{-j\varphi(\omega, t)}$ ,  $\omega \in (\omega_1, \omega_2)$ , линейная часть канала, представляющая собой преобразование Фурье от импульсной характеристики  $h(t, \tau)$ ; амплитудная характеристика  $\chi(\cdot)$  нелинейного звена; мультипликативные и аддитивные помехи. Нелинейность характеристик канала, помехи и шумы вызывают искажения элементов сигнала данных и приводят к появлению ошибок на выходе приемного УПС.

В реальной ситуации АЧХ  $K(\omega, t) = |K(\omega, t)|$  меняется со временем и отлична от идеальной характеристики, а фазо-частотная характеристика (ФЧХ)  $\varphi(\omega, t)$  — нелинейна. Это обуславливает линейные искажения сигнала, вызывающие изменение спектральных составляющих сигнала и его временной формы.

Изменение во времени функции  $K(\omega, t)$  происходит относительно медленно для проводных каналов по сравнению со скоростью передачи сигналов данных В. Поэтому эту функцию можно считать локально-постоянной на интервале времени  $T_{лп} \pm T$ , где  $T = 1/B$  — длительность передачи символа, т. е.  $K(\omega, t) = K(\omega)$  при  $t \in T_{лп}$ . Соответствующая ей импульсная характеристика будет при этом зависеть только от одного временного параметра.

При измерении частотных характеристик канала обычно имеют дело не с ФЧХ, а с групповым временем прохождения (ГВП)  $\tau(\omega) = d\varphi/d\omega$  ввиду более простого его измерения. Для идеального канала  $\tau(\omega) = t_0 = const$ . В реальном канале характеристики  $K(\omega)$  и  $\tau(\omega)$  постоянны в заданной полосе частот  $\omega \in (\omega_1, \omega_2)$  и должны отвечать определенным нормам.

Нелинейные искажения сигнала в канале ТЧ вызваны отличием его амплитудной характеристики  $\chi(\cdot)$  от линейной зависимости. В существующих и разрабатываемых высокочастотных системах передачи это отличие вызвано постоянным включением в четырехпроводную часть всех каналов ТЧ ограничителя амплитуд для защиты от перегрузки. Однако, поскольку характеристика в достаточно большом диапазоне ее линейности строго нормируется, то при соблюдении требований на уровень передаваемого сигнала нелинейными искажениями можно пренебречь, за исключением маловероятных случаев перегрузок усилителей. Степень линейности амплитудной характеристики канала определяется коэффициентом нелинейных искажений на частоте  $f = 800$  Гц. Его величина при  $n$  переприемных участков (ППУ) не должна превышать  $1,5\sqrt{n}\%$  [4\_02, 4\_03, 4\_06].

Помимо указанных причин, вызывающих изменение формы сигнала, поступающего на вход приемного устройства системы передачи данных, для каналов ТЧ характерны также специфические искажения сигнала за счет частотного сдвига  $\Delta f$  его спектральных составляющих, фазовые скачки и фазовое дрожание  $\varphi_{ФДР}(t)$  несущего колебания. Частотный сдвиг, фазовые скачки и фазовое дрожание обуславливают паразитную модуляцию сигнала в полосе частот  $0 \div 300$  Гц на выходе приемного УПС.

В современных линиях связи параметры  $\Delta f$  и  $\varphi_{ФДР}(t)$  жестко нормируются и в принципе могут быть сведены к нулю. Стандартами на каналы ТЧ любой длины допускается величина  $\Delta f \leq 1,5$  Гц.

Структурная схема имитатора канала ТЧ представлена на рисунке. Исследуемый сигнал  $s(t)$  после аналого-цифрового преобразователя поступает на блок имитации нелинейных искажений. Нелинейное искажение достигается пропуском сигнала через симметричную относительно нуля нелинейную характеристику вида:

$$S_{ВЫХ} = \text{sign}(S_{ВХ}) \cdot \left( 1 - e^{-|S_{ВХ}|/p} \right),$$

где  $S_{ВХ}$  — входное значение сигнала;  
 $S_{ВЫХ}$  — выходное значение сигнала;  
 $\text{sign}(S_{ВХ})$  — знак входного сигнала;  
 $p$  — параметр, определяемый коэффициентом

нелинейных искажений. Коэффициент нелинейных искажений задается в диапазоне от 0 до 5 %. Заданное значение коэффициента нелинейных искажений соответствует создаваемому имитатором канала ТЧ нелинейному искажению гармонического сигнала с уровнем  $-23$  дБм и частотой 1020 Гц при определении коэффициента искажений по третьей гармонике.

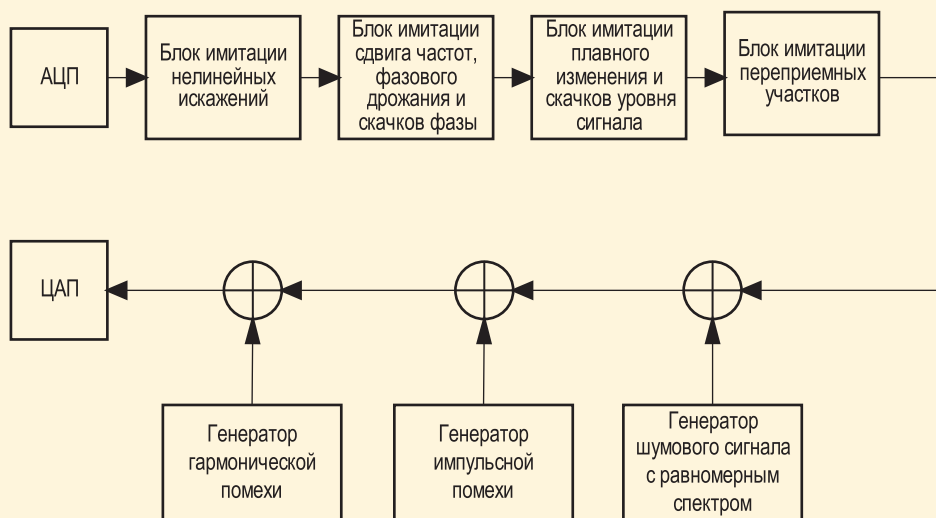


Рис. 2.

После воздействия нелинейных искажений сигнал поступает на вход блока имитации сдвига частот, фазового дрожания и скачков фазы. В блок имитации сдвига частоты происходит сдвиг спектра частот исходного сигнала. В соответствии с существующими нормами максимальный сдвиг частот не должен превышать  $\pm 5$  Гц. Дрожание фазы имитируется как фазовая модуляция передаваемого сигнала по гармоническому закону.

Далее в блоке имитации плавного изменения и скачков уровня сигнала имитируется изменение коэффициента передачи канала.

Затем в сигнал вносятся амплитудные и фазовые искажения в блоке имитации ППУ. Искажения частотных характеристик передачи сигнала обеспечивается формирующим цифровым фильтром с конечной импульсной характеристикой посредством выбора набора коэффициентов соответствующих определенному количеству переприемных участков ППУ.

После внесения частотных искажений сигнал поступает на блок имитации задержки сигнала в канале, в котором, проходя через управляемую линию задержки, приобретает время запаздывания  $\tau$  в интервале от 0 до 0,6 с., соответствующее реальному времени запаздывания в канале ТЧ. Затем к исследуемому сигналу добавляется: шумовой сигнал с равномерным в полосе частот от 300 до 3400 Гц спектром; импульсная и гармоническая помеха.

Далее исследуемый сигнал преобразуется в аналоговый вид посредством цифро-аналогового преобразователя.

Использование математических моделей и имитаторов различных сред передачи данных позволяет понять их особенности для реализации эффективных

методов повышения помехоустойчивости и достоверности передачи информации. Использование современных вычислителей (процессоров цифровой обработки сигналов) с высокой производительностью позволяет использовать алгоритмы, ранее абсолютно недоступные, и, как следствие, получать качественно новые характеристики системы.

### 3. Повышение достоверности и отказоустойчивости систем передачи информации

Для повышения достоверности передачи информации и повышения отказоустойчивости ООД применяются коды, корректирующие ошибки.

Существующие методы использования корректирующих кодов для повышения помехоустойчивости в принципе не отличаются от общих методов обнаружения и исправления случайных ошибок, возникающих в каналах передачи дискретной информации и ООД, но не учитывают особенностей ошибок, большинство которых в течение некоторого интервала времени связано с ошибками в течение последующего интервала времени и имеют фиксированные местоположения. Местоположение, или позиция, ошибки может быть достаточно просто определено как при кодировании, так и при декодировании и использовано для исправления последующих ошибок этой же позиции.

Математически связь выхода со входом можно описать соотношением:

$$y_i = \begin{cases} \xi_i & , i \in S_0 \\ 1 \oplus \xi_i & , i \in S_1 \\ x_i \oplus \xi_i & , i \in \overline{S_0 \cup S_1} \end{cases}$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ ;

$\xi_i$  — независимые при различных  $i$  случайные величины  $\xi_i = \{0, 1\}$  с вероятностями  $q = 1-p$  и  $p$  соответственно;

$S_0, S_1$  — непересекающиеся подмножества, характеризующие дефекты в виде переходов  $1 \rightarrow 0$  и  $0 \rightarrow 1$ . Если  $p = 0$ , то при кодировании информации возможно построение такого алгоритма, основанного на применении корректирующего кода, обнаруживающего ошибки, что при считывании будет обеспечено автоматическое исправление искаженных кодовых слов. При  $p \neq 0$  необходимо применение кодов, исправляющих ошибки.

Если при декодировании вероятность одновременного возникновения двух и более ошибок в  $n$  — разрядном считываемом кодовой слове — близка к нулю,  $p \neq 0$  и  $S_0, S_1$  — не пустые подмножества, покажем, что справедливо следующее утверждение: если для коррекции ошибок применен  $(n, K)$  код, представляемый полиномами, которые образуют в конечном поле  $GF(2^n)$  подмножество многочленов, которое состоит из вычетов рассматриваемого множества многочленов степени меньше  $n$  по модулю неприводимого многочлена  $P_r(x)$  степени  $r < n$  и известен синдром ошибки, возникший в  $i$ -ом разряде  $S_i(x)$ , то синдром ошибки, возникший в  $j$ -ом разряде  $S_j(x)$ , определяет

ся в виде суммы по  $mod 2$  синдрома  $S_i(x)$  и синдрома  $S_{i,j}(x)$ , полученного при наличии ошибок в  $i$ -ом и  $j$ -ом разрядах.

Таким образом, когда ошибка обнаруживается в первый раз, запомним соответствующий синдром  $S_j$ . При последующем обнаружении ошибки той же позиции ( $S_{j,i} = S_i$ ) классифицируем ошибку как отказ. Если появляется ошибка другой позиции ( $S_{j,i} \neq S_i$ ), то синдром, соответствующий этой ошибке, определяется как  $S_j = S_{j,i} \oplus S_i$ . Итоговая последовательность ошибок, непосредственно используемая для коррекции, равна  $E_j = E_{j,i} \oplus E_i$ .

Сложение по  $mod 2$  определенного таким образом вектора ошибки  $E_j$  с искаженным выходным словом  $y$  и хранимым в памяти  $E_i$  позволяет скорректировать значение выходного слова:

$$y = y \oplus E_j \oplus E_i.$$

Данный метод повышения достоверности и отказоустойчивости позволяет более эффективно исправлять ошибки и дефекты, возникающие как в каналах связи, так и в ООД. Этот метод нашел практическое применение при разработке устройств преобразования сигналов.

Использование современной элементной базы — сигнальных процессоров с высокой производительностью, программируемых логических интегральных схем высокой емкости, быстродействующих запоминающих устройств — позволяет использовать информацию о канале связи, сохраняющуюся в течение достаточно длительного времени, для эффективной борьбы с мешающими воздействиями, возникающими в каналах связи.

### 4. Принципы построения современных систем гарантированного электроснабжения

Основой систем гарантированного электроснабжения являются источники вторичного электропитания (ИВЭП), которые осуществляют преобразование электроэнергии первичных сетей в сети с параметрами, требуемыми потребителями. По оценкам специалистов, 50 % отказов всех сложных систем приходится на системы электропитания или связаны с ним. Таким образом, одним из важнейших факторов повышения надежности аппаратуры является качественное улучшение характеристик и надежности ИВЭП, что является основным требованием к современным источникам питания. Другими важными факторами, предъявляемыми к ИВЭП, являются: удельная мощность, КПД, наработка на отказ, рабочий диапазон температур.

Важнейшими показателями, обеспечивающими надежность, являются: защита от перегрузки по току и превышения/понижения выходного напряжения; дистанционное включение/выключение; регулировка выходного напряжения; защита от пониженного/повышенного входного напряжения; параллельное включение; защита от перегрева. Выполнение данных условий требует реализации механизмов защиты, что усложняет схему и увеличивает габариты, а также требует применения элементов РЭА с расширенными характеристиками.

Мощные ИВЭП строятся по схеме, представленной на рисунке 3. AC/DC-преобразователь представляет

собой корректор коэффициента мощности (ККМ), выходом которого является нестабилизированное высокое постоянное напряжение. Стабилизацию и понижение напряжения до требуемого значения осуществляет DC/DC преобразователь — стабилизатор напряжения (СН).

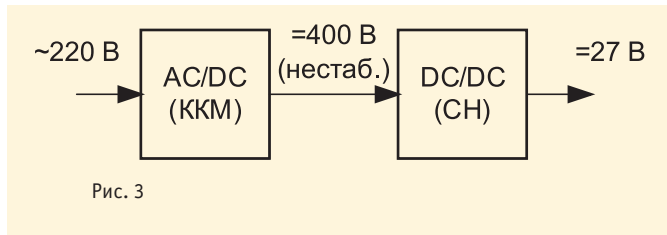


Рис. 3

Повышенные требования, предъявляемые к системам электроснабжения, требуют реализации сложных программно-аппаратных средств по контролю параметров ИВЭП, блоков распределения нагрузки и т. д. Наибольшие трудности возникают при разработке универсальных систем электроснабжения большой мощности. Помимо указанных требований к ним предъявляются требования по помехам, возможность цифрового управления от ЭВМ, универсальность и др.

**Таким образом, при разработке универсальных ИВЭП необходимо реализовать схему управления, обеспечивающую выполнение следующих функций:**

- управление работой силовых транзисторов ККМ и СН;
- реализацию механизмов защиты от различного рода факторов;
- высокий КПД схемы в целом;
- компактность;
- цифровой интерфейс управления;
- универсальность.

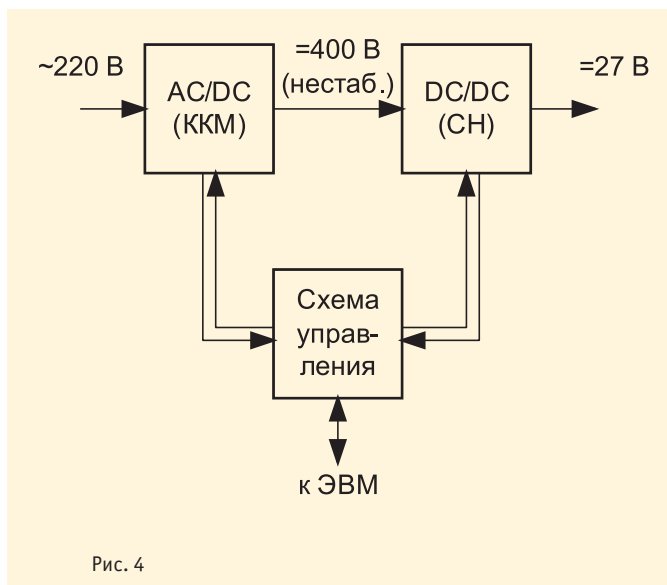


Рис. 4

Реализация мощного универсального ИВЭП на базе такой схемы будет выглядеть как показано на рис. 4. Схема управления осуществляет совместное управление и ККМ, и СН, для чего в ней реализо-

вано необходимое количество каналов ШИМ. Информация с датчиков тока и напряжения поступает в схему управления, обрабатывается по заданному алгоритму и принимается решение о параметрах ШИМ для каждого канала. В случае возникновения нештатных ситуаций (КЗ, перегрузка по току) схема управления ограничивает предельные значения тока в соответствии с заданным режимом. При повышенном/пониженном входном напряжении схема управления обеспечивает отключение потребителя и ИВЭП от сети для предотвращения выхода из строя аппаратуры потребителя и ИВЭП.

Реализация такой схемы управления возможна с использованием современных универсальных RISC-микроконтроллеров. Сбор и обработка всей информации осуществляется в цифровом виде. Для этого информация с датчиков предварительно преобразуется через широкополосный АЦП и поступает на обработку в микроконтроллер. На основе собранной информации формируются сигналы ШИМ для силовых транзисторов.

В настоящее время имеются универсальные микроконтроллеры, позволяющие построить рассмотренную схему управления на одном кристалле. Например, микроконтроллеры фирмы Atmel имеют достаточную производительность для реализации алгоритмов управления, достаточное количество каналов ШИМ для управления силовыми транзисторами ККМ и СН и работающих на скоростях около 100 кГц, и достаточное число каналов АЦП со скоростью работы для подключения необходимого количества датчиков.

Таким образом, возможно построение универсальных ИВЭП, объединяющих в себе ККМ, СН и цифровую схему управления и контроля. Применение в схеме управления микропроцессоров и цифровой обработки обеспечивает гибкую архитектуру системы с возможностью получения более широкого динамического диапазона выходных токов и напряжений. Реализация в схеме управления методов контроля и защиты обеспечивает дополнительную надежность системы в целом. Возможность цифрового управления и задания требуемых режимов обеспечивает улучшение потребительских качеств и возможность удаленного контроля и управления.

Вместе с тем, реализация алгоритмов управления в виде программной части предъявляет повышенные требования к программному обеспечению и требует обеспечения жестких условий по «времени реагирования» на нештатные ситуации.

**Заключение**

Внедрение современных концепции и разработок ЗАО НПФ «Сигма» позволяет повысить качество и надежность связи, систем управления, а также сократить эксплуатационные расходы за счет унификации технических средств. Подробная информация о продукции ЗАО НПФ «Сигма» размещена на сайтах:

- [www.npf-sigma.ru](http://www.npf-sigma.ru)
- [www.mvd.informost.ru](http://www.mvd.informost.ru)
- [www.informost.ru](http://www.informost.ru)