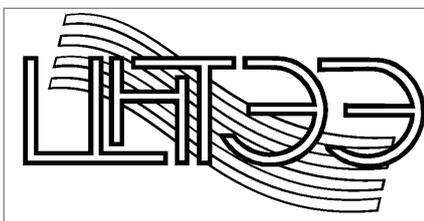


ОСОБЕННОСТИ АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ

Леута А.А. технический директор
Лавренов С.Н. ведущий инженер
Кузнецов М.А. инженер -
программист
ЗАО «Центр Новых Технологий
Электро Энергетики»

ДЛЯ СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СИСТЕМ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ



Рассматриваются проблемы создания статических преобразователей типа AC-DC, DC-DC, DC-AC, AC-DC-AC мощностью свыше 300 Вт агрегатов бесперебойного питания, построенных на основе современных цифровых технологий, раскрываются особенности схемотехники, обосновывается преимущества микроконтроллеров и особенности аппаратно-программных реализаций основных и сервисных функций системы управления с использованием элементов теории нечетких мно жеств – Fuzzy System.

К статическим преобразователям, как к элементам систем бесперебойного электропитания ответственных потребителей, предъявляются очень жесткие требования по качеству электроэнергии на выходе, при широком диапазоне возможных отклонений питающих напряжений на входах [1]. Особенности структурного построения таких систем подробно рассмотрены в [2], где излагаются решения, позволяющие обеспечивать такие основополагающие требования как «бесперебойность» питания потребителей и «унификация» элементов системы. В развитие данной тематики рассмотрим некоторые особенности построения современных статических преобразователей.

Основным отличием современных схемных решений является новая элементная база: силовые полупроводниковые элементы для цепей главного тока и микроконтроллеры для цепей управления. Это выводит схемотехнику статических преобразователей к новым рубежам – цифровым технологиям.

Эффективность цифровых технологий неоспорима и подтверждается многочисленными примерами ее внедрения практически во всех областях техники. Не являются исключением и статические преобразователи. При этом проблемы создания новых образцов статических преобразователей имеют не только классический характер, но и приобретают новые, «микропроцессорные», аспекты. Наряду с выбором структуры и элементной базы преобразователя, необходимо решить вопросы разделения функций между аппаратной и программной частями, разработки алгоритмов реализации функций контроля, управления и защит.

Статические преобразователи типа AC-DC, DC-DC, DC-AC и AC-DC-AC мощностью от 300 до 1500 Вт образуют типовой унифицированный

ряд функциональных устройств систем бесперебойного электропитания ответственных потребителей [1,2]. Именно в преобразователях такой мощности экономически оправдано применение микроконтроллеров широкого профиля, так как, кроме частных функций ШИМ-(ЧИМ и других видов модуляций)-регулирующего, они способны решать множество дополнительных функций по контролю и защите, а также ряд новых сервисных функций самоконтроля, самодиагностики, дистанционного управления и сигнализации о текущем состоянии аппаратуры, без существенных затрат на расширение аппаратной части схемы. Последнее тем более актуально в связи с повышением требований к статическим преобразователям, как элементам систем бесперебойного электропитания и общим «интеллектуальным» ростом технических средств и систем управления ими.

Рассмотрим классическую обобщенную схему статического преобразователя, изображенную на рисунке 1 с точки зрения особенностей аппаратной и программной реализации.

АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ

Разнообразие типов преобразователей (AC-DC, DC-DC, DC-AC и AC-DC-AC) реализуется вариантами исполнения данной схемы, путем исключения тех или иных узлов. Как правило, это входные и выходные выпрямители и фильтры, а также трансформаторы, обеспечивающие гальваническую развязку (когда это необходимо) по основному каналу передачи электроэнергии от входа к выходу.

Проблемы построения входных и выходных выпрямительных и фильтрующих каскадов, в данном случае будем считать «классическими», подробно освещенными в многочисленной технической литературе, хотя как показывает практика, следует учитывать некоторые схемотехнические

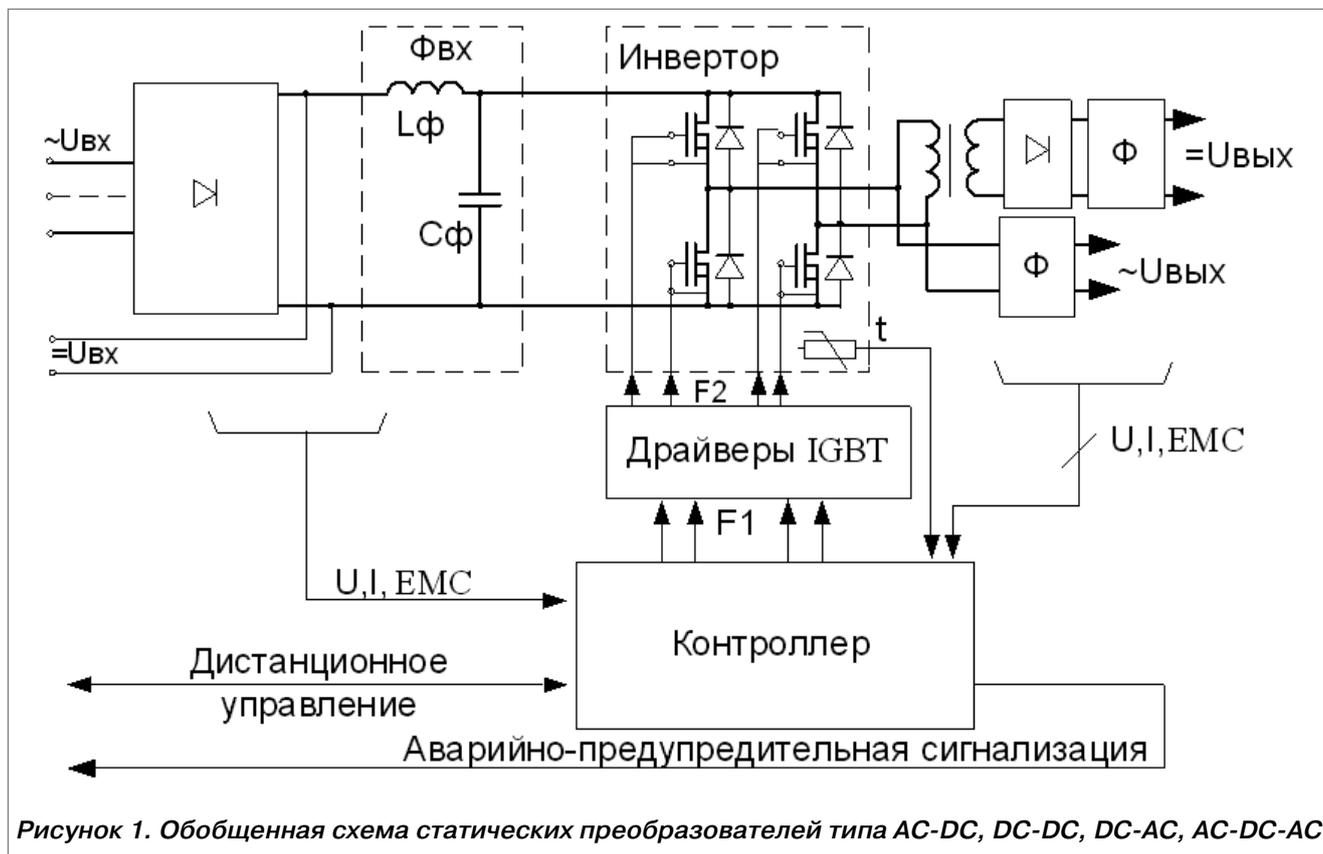


Рисунок 1. Обобщенная схема статических преобразователей типа AC-DC, DC-DC, DC-AC, AC-DC-AC.

и технологические особенности в обеспечении «мягкого» пуска и допустимого уровня пульсаций промежуточных и выходных напряжений, а также не забывать об ограничениях по габаритным размерам статических преобразователей, как элементов системы питания.

Проблемы реализации трансформаторных схем тесно связаны с необходимостью решения оптимизационных задач выбора несущей частоты с ограничениями по массогабаритным характеристикам трансформатора и с учетом нелинейного характера влияющих параметров напряжений, токов (мощности) используемой элементной базы статического преобразователя. Теория и практика решения данной проблемы менее освещены в технической литературе и разработчикам статических преобразователей приходится самостоятельно добиваться положительных результатов, часто путем нескольких итераций.

Ядром схемы, или ее неизменной частью, являются мостовой инвертор, драйвер и система управления.

Мостовой инвертор реализуется на силовых полупроводниковых структурах типа IGBT или MOSFET, в зависимости от требуемых характеристик и ограничений на допустимые входные напряжения. Современные MOSFET-структуры имеют предельные напряжения не более чем 700...900 В, в то время как IGBT-структуры допускают уровни напряжений в 1200 В и выше, что позволяет иметь больший запас надежности схемы, с учетом возможных аварий-

ных импульсных «выбросов» в питающих напряжениях и импульсных всплесках напряжений в процессе работы инвертора. Однако при прочих равных условиях большее преимущество сулит применение MOSFET-структур, так как остаточное сопротивление в открытом состоянии может быть значительно ниже, чем в IGBT-структурах. Следует тщательно анализировать технические данные, предоставляемые производителями элементной базы.

На выбор драйверов может оказывать влияние, как рабочее напряжение звена постоянного тока, так и тип (или производитель) силовых ключей. Большинство лидирующих производителей силовых полупроводников, как правило, выпускают и соответствующие им драйверы или рекомендуют конкретные схемы и типы драйверов других производителей. Практика показывает что, когда это необходимо, вполне реально создать и воплотить схему драйвера на дискретных элементах.

Что касается системы управления, то при микроконтроллерной реализации, ее аппаратная часть неизменна и практически обосновано иметь один вариант для всех модификаций статических преобразователей. Унификация системы управления достигается тем, что в работе преобразователя необходимо контролировать известный перечень параметров. Датчики напряжений, токов, температуры располагаются при этом вне системы управления и вырабатывают согласованные уровни сигналов во

всех диапазонах рабочих параметров. Микроконтроллер со стандартным набором встроенных периферийных устройств (АЦП, ШИМ, ЦВВ - например PIC16F87х) должен иметь минимальную «обязку» и узлы согласования для сигналов ввода-вывода данных и управляющих воздействий на драйверы и дистанционную сигнализацию. Наиболее практичным и оптимизированным, с точки зрения электробезопасности и надежности, решением является технология согласования внешних связей микроконтроллера и силовой части преобразователя с помощью схем с гальванической развязкой, как по аналоговым, так и по дискретным сигналам. На рисунке 2. даются примеры реализации схем согласования и гальванической развязки сигналов ввода и вывода микроконтроллера.

Не следует забывать и о такой важной аппаратной части статического преобразователя как встроенный источник питания для собственных нужд. В случае, когда входные напряжения могут изменяться в широком диапазоне к нему будут предъявляться особые требования по надежности и стабильности работы. Ясно, что встроенный источник питания и система управления должны начинать работать несколько раньше и надежнее, чем силовая часть статического преобразователя, поэтому к выбору схемной реализации следует относиться очень серьезно. Если не удается применить промышленный DC/DC-преобразователей небольшой (не более 5...10 Вт) мощности, то приходится искать

«нестандартные» решения.

Таков краткий перечень основных проблем, с которыми приходится сталкиваться разработчику. Каждая из названных проблем может решаться в отдельности, но более правильным представляется поиск «комплексных» решений, основанный на методе активного эксперимента, включающего анализ исходных данных (технических требований, ограничений и технической информации по компонентам) с целью формирования критериев для сравнительной оценки альтернатив предполагаемых решений, имитационного моделирования и/или макетирования для получения фактических данных по всем технико-экономическим параметрам рассматриваемых вариантов реализации схемы статического преобразователя. Более подробно эти вопросы будут раскрыты в других публикациях.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Разработка программного обеспечения для микроконтроллеров статических преобразователей, входящих в состав агрегатов бесперебойного питания (АБП), является одной из актуальных задач обеспечения потребителей электроэнергией требуемого качества.

Программное обеспечение статических преобразователей с полупроводниковыми силовыми ключевыми исполнительными элементами и микроконтроллерами в качестве системы управления относится к классу ПО систем «реального времени». Причем, следует отметить, что опыт создания систем «реального времени» на основе процессоров для ПК здесь неприемлем поскольку, никакие системы типа QNX и RTK не могут применяться, учитывая особенности функционирования и жесткие ограничения по использованию вычислительных ресурсов современных микроконтроллеров. Это обусловлено тем, что стремление оптимизировать соотношение надежности и стоимости преобразователя накладывает существенные ограниче-

ния на элементную базу. Так наилучшим выбором является применение PIC-микроконтроллеров фирмы «MicroChip», имеющих в своем составе аппаратно-программное ядро и всю необходимую периферию для реализации алгоритмов управления и обработки данных при функционировании статических преобразователей. Однако, несмотря на распространяемые через Интернет фрагменты ПО для данных процессоров, каждый разработчик реальной аппаратуры должен создавать собственные алгоритмы и программы, чтобы получить наилучшие характеристики, сообразуясь со схемными решениями и индивидуальными техническими заданиями.

Оптимальное быстродействие алгоритма управления может быть обеспечено эффективным использованием механизма прерываний, целочисленной арифметики и элементов теории нечетких множеств. Первые два утверждения не вызывают сомнений у разработчиков. Механизм прерываний позволяет получить гарантированное время реакции на «события», как в виде появления или исчезновения внешних для процессора сигналов, так и в виде «внутренних» сигналов процессора, реализуемых программой. Целочисленная арифметика, бесспорно, реализуется более простыми и короткими алгоритмами обработки данных, при условии, что точность вычислений удовлетворяет принятой разрядности для ввода и вывода данных микроконтроллером.

Необходимость использования элементов теории нечетких множеств обоснована тем, что если задачу управления статическим преобразователем рассматривать как задачу управления сложным техническим объектом или технологическим процессом, то справедливо утверждение, что, из-за недостатка знаний особенностей протекания таких процессов, им не может быть поставлена в соответствие адекватная и одновременно достаточно простая модель, позволяющая решать эту задачу методами

обычной теории управления.

Вместе с тем, опыт управления сложными системами человеком-оператором, в условиях наличия искажений, шумов, нелинейностей, взаимозависимости параметров и зависимости их от времени, весьма показателен [1] и дает основания для формализации алгоритмов принятия решений с помощью аппарата теории нечетких множеств и реализации достаточно простых алгоритмов управления с помощью ЭВМ [2]. Многочисленные примеры применений размытых систем управления даются в [3], где также дается сравнение результатов применения этих алгоритмов с результатами, полученными при использовании различных типов обычных регуляторов.

Представляя статический преобразователь (рис. 1) как дискретную систему управления, имеющую математическое описание вида

$$S = f(k_1 \cdot S_1 + k_2 \cdot S_2 + \dots + k_n \cdot S_n), \quad (1)$$

где S - совокупность допустимых состояний преобразователя; $S_i, i=1, n$ - множество состояний по конкретному (i -му) параметру; k_i - коэффициент влияния (передачи) для параметра; $k_i \cdot S_i$ - допустимое множество состояний конкретного параметра; f - функция передачи, позволяющая однозначно определить состояние преобразователя по текущим состояниям всех параметров, включая статические и динамические характеристики, мы должны быть уверены, что все элементы системы имеют четкое математическое и достоверное представление. В противном случае, т.е. если хоть один элемент системы может быть представлен как размытое множество (например приближенное значение коэффициента обратной связи, независимо от причины: из-за неточности измерений, разброса параметров элементов, или температурной нестабильности), вся система должна быть отнесена к классу «размытых» систем, и, используя аппарат теории нечетких множеств (Fuzzy

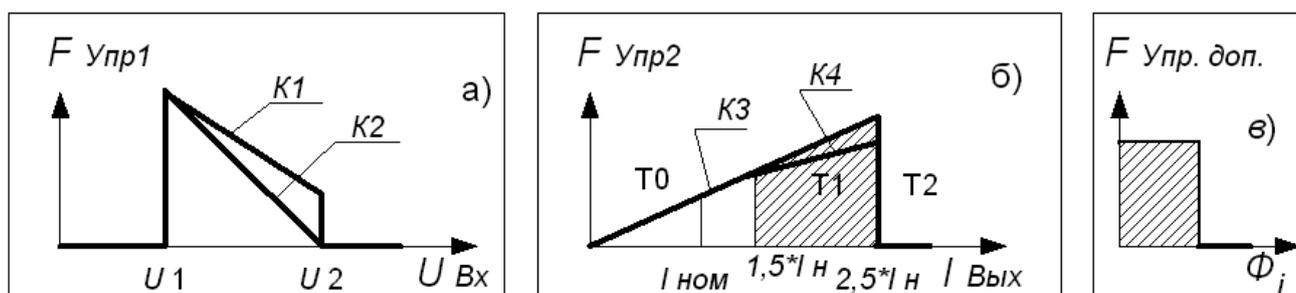


Рисунок 2. Вид функций принадлежности для учета факторов величины входного напряжения (а), выходного тока (б), температуры и входного тока в алгоритме формирования импульсной последовательности $F_{Упр}$.

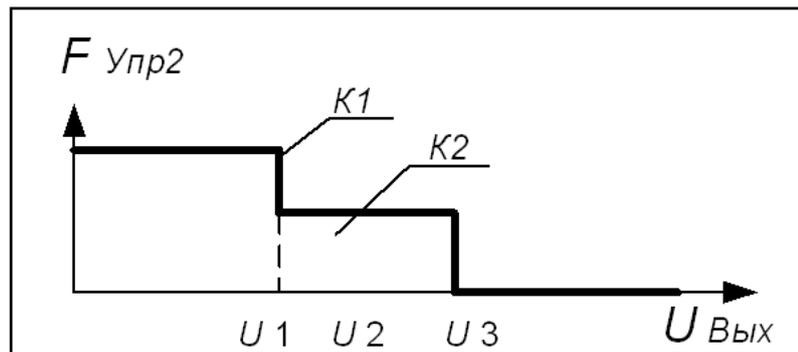


Рисунок 3. Вид функций принадлежности для учета фактора величины выходного напряжения.

Sets), аппарат логики принятия решений (Fuzzy Logic) и функции алгоритмов нечеткого управления (Fuzzy Systems), мы должны представить ее описание в модифицированном виде

$$S = \phi(\mu_1 \cdot S_1 + \mu_2 \cdot S_2 + \dots + \mu_n S_n), \quad (2)$$

где $\mu_i, i = \overline{1, n}$ – являются функциями принадлежности конкретных параметров к множеству выходных состояний.

Размытые вход-выходные множества могут быть представлены как векторы степеней принадлежности в некотором числе точек, соответствующих некоторым уровням дискретизации [4], а операции, выполняемые при этом, просты, так как они сводятся к комбинациям операций сравнения, учитывая «минимаксный» характер основных операций теории размытых множеств.

Возвращаясь к поставленной задаче, алгоритм управления силовыми ключами статического преобразователя АБП может быть описан как некоторая функция суммы факторов с различной степенью влияния (например, для четырех факторов):

$$F_{Упр} = \phi(\mu_1 \cdot U_{Вх} + \mu_2 \cdot U_{Вых} + \mu_3 \cdot I_H + \mu_4 R_{Д}), \quad (3)$$

где $F_{Упр}$ – величина скажности импульсов отпирания силовых ключей, $U_{Вх}$ – входное напряжение статического преобразователя, $U_{Вых}$ – выходное напряжение, I_H – ток нагрузки, $R_{Д}$ – дополнительное суммарное воздействие на систему управления различных дестабилизирующих факторов, $\mu_1 \dots \mu_4$ – функции принадлежности, или иначе, переменные коэффициенты влияния указанных факторов.

Выражение (3) общего вида и универсально, так как справедливо для любого закона формирования импульсной последовательности, будь то ШИМ, ЧИМ, АИМ или их всевозможных комбинаций.

Как известно, ключевым понятием теории нечетких множеств и,

в частности, практической ее интерпретации для систем управления, так называемой Fuzzy System, является функция принадлежности, носящая в общем случае переменный (нелинейный) характер, но имеющая частные случаи реализации для каждого фактора, учитываемого в законе управления.

Так входное напряжение преобразователя имеет нижний и верхний допустимые пределы, ограничивающие формирование импульсной последовательности системы управления. При этом часть функции управления, зависящая от входного напряжения, выражаемая формулой $F_{Упр} = \mu_1 \cdot U_{Вх}$ может иметь графическую интерпретацию, показанную на рис 2. а). Как видно из рисунка, при величинах меньше и больше зоны допустимых входных напряжений импульсная последовательность не формируется, а в зоне допустимых отклонений имеет обратно-пропорциональный характер. Конкретный вид используемой кривой (K1, K2) зависит от практических ограничений в реализации на программном или аппаратном уровне.

Выходной ток преобразователя имеет два пороговых уровня превышения номинала с различными временными характеристиками отключения управления силовыми ключами преобразователя. На рис 2. б) приведены зоны T0, T1 и T2 с различными выдержками времени, формируемыми в соответствии с техническим заданием для функции управления.

$$F_{Упр3} = \mu_3 \cdot I_H$$

В качестве дополнительных дестабилизирующих факторов напрямую используются: предельно допустимое значение температуры датчика, установленного внутри преобразователя непосредственно на корпусе одного из ключевых элементов ($\theta_{Кл}$) и величина входного тока ($I_{Вх}$) имеющие функции принадлежности одного вида, показанного на рис 2. в). Осталь-

ные дестабилизирующие факторы (например, электромагнитные излучения) учитываются только опосредованно, через влияние на величину выходного напряжения ($F_{Упр2} = \mu_2 \cdot U_{Вых}$), имеющиеся датчики, аппаратуру преобразователя и проводники печатных плат или монтажные провода, причем характер этого влияния невозможно описать математическими зависимостями. В связи с этим качество стабилизации выходного напряжения будет существенно зависеть от вида соответствующей функции принадлежности μ_2 , простейший вариант которой приведен на рис. 3.

Таким образом, алгоритм управления статическим преобразователем на основе аппарата нечеткой логики представляет собой компиляцию отдельных алгоритмов «минимаксных» функций $F_{Упр, i}$, достаточно простых в реализации даже для микроконтроллеров среднего класса и не высоким быстродействием, не требующих никаких сложных вычислений над операндами в форме с плавающей точкой. Сказанное подтверждается авторским опытом реализации подобных алгоритмов на экспериментальных образцах статических преобразователей типа AC-DC, DC-DC, DC-AC в диапазоне мощностей от 200 до 1500 Вт имеющих повышенные технические требования к качеству функционирования и условиям эксплуатации.

«Программа автоматического регулирования и управления стабилизации «ПАРУС-А» реализована на базе семейства микроконтроллеров PIC16F87X и официально зарегистрирована Российским агентством по патентам в Реестре программ для ЭВМ. ☺

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.А. Губанов. Централизованное электропитание корабельных систем управления. Научно-технический сборник (вып.4) «Системы управления и обработки информации» ФНПЦ «НПО Аврора», С-Пб, 2002 г. с22.
2. Леута А.А., Турусов С.Н. Развитие структуры систем бесперебойного электропитания. Электропитание № 2 2003 г. С-Пб. С 46-49.
3. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. - М: Мир, 1997. – 167 с.
4. Леута А.А., Макаров А.А. Программное обеспечение автоматизированной системы оценки качества электроэнергии. Тез.докл. НТК «Прикладная информатика автоматизированных систем проектирования, управления, эксплуатации. Калининград, 1987. С.68.
5. Tong R.M. A cjntrol engineering review of fuzzy systems. – Automatica, 1977, v.13, N16.
6. Гусев Л.А., Смирнова И.М. Развитие теории размытых множеств // Измерения, контроль, автоматизация №3(15), 1978