

Раздел VII. Практические аспекты энергетики

УДК 62-799

Р.Н. Набиев, Г.И. Гараев

НЕКОТОРЫЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ СО СТУПЕНЧАТЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Дается блок-схема электронного нормализатора напряжения работающего по принципу ступенчатого регулирования, описывается работа всех элементов и функциональных блоков относящихся к этой схеме. В работе рассматриваются преимущества применения ключей на основе симисторов. Приводятся методы решения проблем подавления импульсных помех на входе и выходе стабилизатора, а также методы устранения влияния коммутационных помех. Представлены схема управления для обеспечения бесперебойного переключения симисторов, схема автоматического подключения внутренней нагрузки для уменьшения влияния переходных процессов, схема защиты и индикации при перегрузках.

Нормализатор; стабилизатор; регулятор; ступенчатое регулирование; переключение; симистор; реле; датчик тока; автотрансформатор; обнаружение пересечения нуля.

R.N. Nabiev, G.I. Garaev

SOME CIRCUIT TECHNICS FOR DESIGN OF THE VOLTAGE STABILIZER WITH STEPWISE REGULATION

In the article the block-scheme of an electronic voltage stabilizer which is working on the principle of stepwise regulation is given, and the operation of all elements and the functional blocks related to this scheme, is described. The paper considers advantages of triac switches' application. There are given methods of pulse noises rejection on input and output of the stabilizer and methods of switching noises suppression. The control scheme providing trouble-free switching of triacs, the connection circuit of internal load to reduce the impact of transient surges, and the circuit of protection and indication at overloadings are shown.

Normalizer; stabilizer; regulator; stepwise regulation; switching; triac; relay; current sensor; autotransformer; zero crossing detection.

Наиболее распространенный вид стабилизаторов – это нормализаторы напряжения, которые работают по принципу ступенчатого регулирования. В этих стабилизаторах основную мощность и массогабаритные показатели определяет автотрансформатор, у которого количество обмоток (секций) зависит от диапазона изменения входного и выходного напряжения. Полный расчет автотрансформатора дан в [1]. Чтобы поддержать выходное напряжение в нормальном диапазоне, сетевое напряжение, в зависимости от уровня на котором оно находится, необходимо подавать на соответствующую обмотку автотрансформатора. Поэтому в электронных стабилизаторах применение симисторов, в качестве ключей, расширяет их функциональные возможности и продлевает рабочий ресурс. Симисторы позволяют осуществлять коммутацию в каждом полупериоде синусоидального тока.

С применением симисторов и микроконтроллера (МК), стабилизаторы превратились из простого электротехнического, параметрического и компенсационного типа устройств в сложное электронное устройство, которое управляется программно.

На рис. 1 приведена оптимальная блок-схема стабилизатора. Она состоит из ключа К, входного и выходного RCвх., RCвых., фильтров и токовых трансформаторов ТТвх. и ТТвых., силовой цепи, блока управления БУ и цепи обнуления выходного напряжения ЦОВН. Силовая цепь состоит из симисторных ключей СК, токовых трансформаторов ТТс и автотрансформатора АТ.

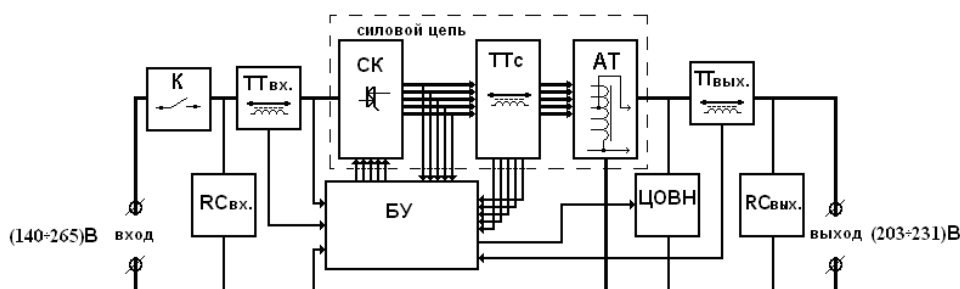


Рис. 1. Блок-схема стабилизатора

Ключ К – автомат, с механическими контактами, рассчитан на максимальную мощность. Отключение из сети стабилизатора при помощи этого ключа, самый надёжный способ по причине безопасности. При подключении в сеть феррорезонансных и электромеханических стабилизаторов с контактными ключами не создаются проблемы, а в электронных стабилизаторах происходит авария. Электронные приборы (тиристоры и симисторы) могут включиться в ненужный момент от выбросов напряжения, которые прикладываются к их управляющему или к основным электродам. Если в стабилизаторах со ступенчатым регулированием применяются эти приборы, этот случай представляет собой особую опасность.

Поэтому в момент включения в сеть или в рабочем режиме, для подавления выбросов напряжения, на вход и выход стабилизатора подключаются RC-фильтры, которые работают надёжно, имеют простое схематическое решение и малую стоимость.

При экспериментах для подавления выбросов напряжения, когда применялась только ёмкость, при замыкании ключа происходило одновременное включение нескольких симисторов и короткое замыкание (КЗ) между обмотками автотрансформатора. До включения стабилизатора конденсатор не заряжен, поэтому в момент включения его цепь замыкается накоротко. В момент КЗ в проводах возникает мощный короткий импульс и он, попадая в цепь управления, создает аварию. Сопrotивление соединительных проводов очень мало и с помощью резистора с сопротивлением 16 Ом, который подключается последовательно к конденсатору, можно ограничить ток, протекающий через КЗ цепь и уменьшить мощность импульсной помехи, при этом резистор препятствует возникновению высокочастотных (ВЧ) колебаний. Таким образом, после применения RC-фильтров, при включении стабилизатора в сеть или при подключении к нему в определенных пределах нагрузки, одновременное включение нескольких симисторов не наблюдалось.

С целью повышения надежности в цепи питания блока управления (БУ) применяется стандартный RLC-фильтр. Напряжение через RLC-фильтр подается низковольтному трансформатору. Фильтр не позволяет ВЧ-помехам попасть от сети к

БУ, и наоборот. Низковольтный трансформатор имеет две одинаковые вторичные обмотки, одна из которых подключается к БУ, а вторая к цепи измерения сетевого напряжения. Напряжение, которое прикладывается к цепи питания БУ, выпрямляется при помощи диодного моста, сглаживается ёмкостным фильтром и в нестабилизированном виде подается на вход интегрального стабилизатора с фиксированным выходным напряжением +5В и на входы высокочастотных ключей с импульсными трансформаторами (ВЧКИТ). С выхода интегрального стабилизатора напряжение +5В питает все низковольтные цепи, кроме ВЧКИТ.

Экспериментально исследованы воздействия коммутационных помех на электронный стабилизатор с мощностью 4 кВт, при включении и отключении индуктивной нагрузки. В результате наблюдалось одновременное включение нескольких симисторов, которое приводило к КЗ. Для выяснения с какой цепи помехи попадают в стабилизатор, были проведены опыты по следующей последовательности:

- 1) кроме одного рабочего симистора, управляющие электроды (УЭ) всех симисторов отключаются от БУ;
- 2) цепи УЭ всех симисторов восстанавливаются, а питание БУ осуществляется от аккумуляторной батареи.

В каждом случае опыты повторялись по несколько раз. В первом случае авария ни разу не произошла, во втором случае произошли одновременные включения нескольких симисторов, которые привели к авариям. Выяснено, что помехи поступают на БУ с измерительной цепи. После применения известной “схемы анти-дребезга” (САД), были устранены отрицательные влияния коммутационных помех на БУ и работу стабилизатора в целом. На рис. 2 показаны графики измерительных сигналов, на входе (рис. 2,а) и выходе (рис. 2,б) САД по которым определяется уровень сетевого напряжения.

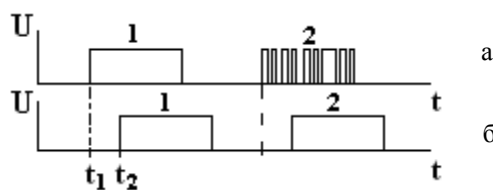


Рис. 2. Графики входных и выходных сигналов САД

В первом случае воздействие помехи на измерительный сигнал отсутствует, а выходной сигнал смещается относительно входного сигнала на время $t_2 - t_1$. Длительность этих импульсов равна, поэтому результат измерения не меняется. Во втором случае помеха воздействует на входной сигнал, но выходной сигнал остается неизменным. В дальнейшем, все функции САД были переведены на МК с помощью дополнительно написанной программы, по которой МК определяет уровень сетевого напряжения по длительности входного сигнала, амплитуда которого превышает его внутреннее опорное напряжение. В зависимости от результата, МК дает сигнал разрешения для включения выбранного им симистора. Кроме того, МК дает разрешение для питания ВЧКИТ, этим же сигналом обеспечивается отключение внутренней нагрузки, который обнуляет выход стабилизатора, контролирует состояния симисторов, входные и выходные токи. А также управляет блоком индикации (БИ), который дает визуальную информацию о работе стабилизатора. Выходной сигнал схемы защиты по току (СЗТ) сбрасывает МК в нулевое состояние.

Когда стабилизатор подключается к сети при помощи автомат-ключа, подача напряжения питания на ВЧКИТ и включение выбранного симистора соответственно происходят с задержкой и по специальному алгоритму, который предусмотрен в программе. Помехоустойчивость при включении за счет этой задержки повышается.

Чтобы управлять каждым симистором в отдельности, в их цепи управления подключены ВЧКИТ. Трансформаторное управление, вместе с гальванической развязкой имеет следующие преимущества и позволяет:

- ◆ приложить управляющее напряжение к симистору в любой момент или при любом значении сетевого напряжения;
- ◆ изменить величину управляющего напряжения и выбрать нужную величину управляющего тока, изменением количества витков на первом и втором обмотках;
- ◆ снять управляющее напряжение и предотвратить нагрев УЭ, после включения симистора.

Чтобы получить ВЧ импульсы, на основе одной из широко распространенных схем на логических элементах «И-НЕ», на микросхеме К155ЛА3 собран импульсный генератор. Частота генератора выбрана около 93 кГц, чтобы уменьшить габаритные размеры импульсного трансформатора.

На рис. 3 приведена схема цепи управления одного симистора. Чтобы открыть выбранный симистор, на вход ВЧКИТ, который подключен к нему через разделительный конденсатор C_p , прикладываются ВЧ импульсы с эмиттерной нагрузки $R_э$ эмиттерного повторителя (ЭП), собранного на транзисторе VT1. Разделительный конденсатор не позволяет постоянному напряжению попасть в базу выходного транзистора VT2. Он разряжается через VD_6 при паузах между импульсами и это способствует прохождению ВЧ импульсов через него. Чтобы ВЧ импульсы, которые вырабатывает генератор, поступили на вход ВЧКИТ, должны выполняться два условия.

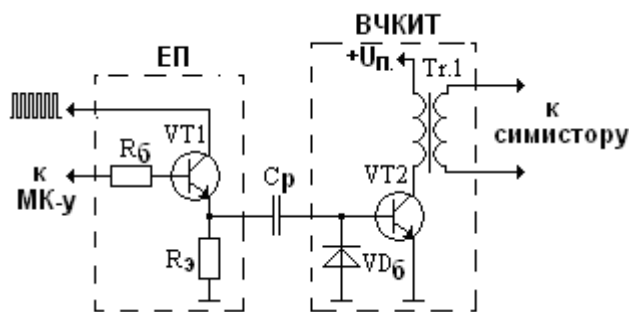


Рис. 3. Схема цепи управления симистора

Первое, на коллектор ЭП должны поступить ВЧ импульсы. Все коллекторы ЭП подключаются к коллектору транзисторного усилителя, который играет роль буферного ключа (рис. 4). База транзистора подключается к выходу логического ключа на элементе двухвходового «И-НЕ». К одному входу логического ключа поступают ВЧ импульсы от генератора Г, а другой вход соединяется с выходом компаратора Кс, который контролирует состояние симисторов. С момента включения одного симистора до его выключения естественным способом на выходе компаратора получается сигнал с нулевым уровнем, который запрещает прохождение ВЧ импульсов через логический ключ. После выключения симистора, если падение напряжения на его

основных электродах превысит 10В (это подтверждает гарантированное закрытия симистора и значение этого напряжения зависит от коэффициента передачи тока оптрона), на выходе компаратора получается высокий уровень, с которым дается разрешение ВЧ импульсам проходить через логический ключ. Таким образом, ВЧ импульсы поступают на коллектор ЭП в усиленном виде.

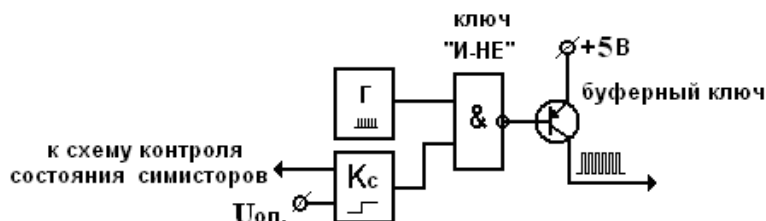


Рис. 4. Цепь формирования ВЧ импульсов

Второе, на вход ЭП должен поступить сигнал разрешения от МК-а. Коллекторы всех ЭП подключены к коллектору буферного ключа, поэтому ВЧ импульсы воздействуют на них одновременно. После определения уровня сетевого напряжения, только на одном из выходов МК-а, которые подключены к входам ЭП, создается сигнал разрешения. Этот сигнал сохраняется до тех пор, пока рабочий симистор не переключится, несмотря на его открытое состояние, при этом поступление ВЧ импульсов на коллектор ЭП запрещается.

Силовые ключи собраны на симисторах, которые имеют двустороннюю проводимость и успешно применяются в цепях переменного тока (рис. 5).

Чтобы защитить симисторы от выбросов напряжения, могущих открыть или пробить их при отсутствии управляющего сигнала, между основными электродами каждого симистора подключается RC-цепь. Для повышения помехоустойчивости, между УЭ и первым основным электродом (в зарубежной литературе G и MT1, соответственно) ставится шунтирующий резистор Rg, который препятствует накоплению электрического заряда в этом переходе.

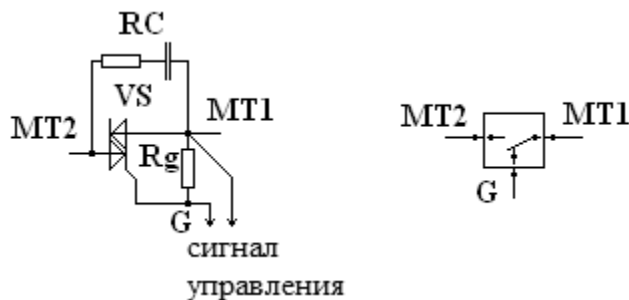


Рис. 5. Схема силового ключа на симисторе

Силовые ключи подсоединяются к автотрансформатору с помощью плавких предохранителей, которые используются для отсоединения силовых линий, при КЗ в их цепях.

Чтобы поддержать выходное напряжение в определенном диапазоне, при изменении уровня сетевого напряжения, его нужно подавать в соответствующую обмотку автотрансформатора, с помощью симисторного ключа. В процессе регулирования, в зависимости от уровня сетевого напряжения, приходится переключать рабочие симисторы и для безаварийного переключения симисторов, эту опе-

рацию надо выполнять после выключения открытого симистора. Открытый симистор, при нулевом значении синусоидального тока нагрузки, закрывается естественным способом, когда управляющий сигнал отсутствует. Если после этого момента открыт следующий симистор, в нагрузочном напряжении не будет провалов. Чтобы определить нулевое значение тока нагрузки, к этой цепи последовательно подключается токовый датчик [3]. Например, в [4] используются два встречно-параллельно включенных диода, в качестве датчика тока. Определение состояния симистора в указанном порядке не выгодно по соображениям энергопотребления. При больших мощностях, на встречно-параллельно включенных диодах рассеивается большая мощность.

В схеме стабилизатора по величине падения напряжения между основными электродами определяется состояние симистора [5] (при открытом состоянии симистора падение напряжения на его основных электродах составляет не более 2В). В этом случае информация получается от самого симистора, поэтому в схему не добавляется дополнительный элемент, который вносит потерю в общую схему. В схеме состояние каждого симистора контролируется отдельно (рис. 6).

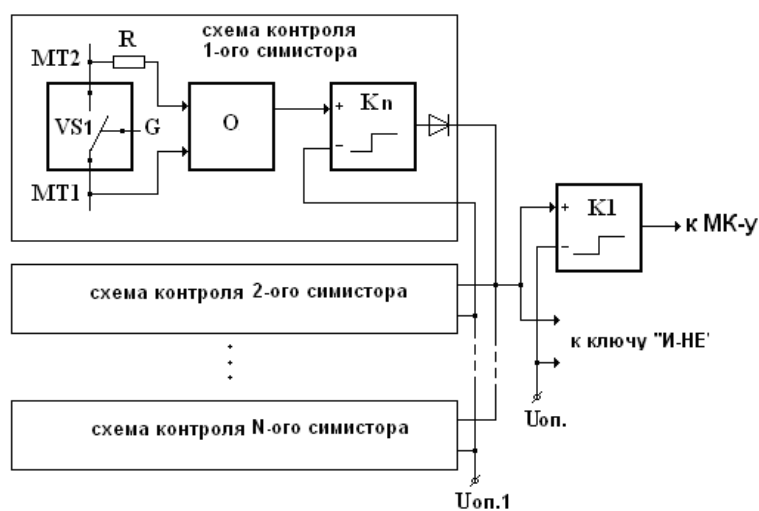


Рис. 6. Схема контроля состояния симисторов

Чтобы контролировать состояние одного симистора, его основные электроды при помощи резистора R сопротивлением 100 кОм, отдельно подключаются к входу оптрона O.

Вход оптрона рассчитан на переменный ток и состоит из двух встречно-параллельно включенных светодиодов. Выходной сигнал оптрона подключается к неинвертирующему входу компаратора Кп, который определяет состояние симистора VS1. Этот сигнал сравнивается с опорным напряжением $U_{оп1}$, который прикладывается к инвертирующим входам всех компараторов, которые контролируют состояние остальных симисторов. Выходные напряжения компараторов суммируются при помощи диодов и сравниваются с опорным напряжением ($U_{оп}$) двух компараторов К1 и Кс, первый подключен к МК-у, второй – к логическому ключу «И-НЕ» (см. рис. 4.). Выходные напряжения К1 и Кс находятся в противофазе. При включенном состоянии одного из симисторов, на выходе К1 создается «1», на выходе Кс «0» – это означает, что в течение этого времени МК не даст разрешение на открытие следующего симистора и на выходе логического ключа не могут появляться ВЧ импульсы.

Чтобы выключить стабилизатор, который предусмотрен в программе, по правилу, написанному в МК, нужно удерживать в нажатом состоянии кнопку в передней панели в течение 2-х секунд, тогда снимается сигнал разрешения с открытого симистора и дается сигнал запрещения всем симисторам. Когда стабилизатор выключается и нагрузка на него не подключена, после выключения всех симисторов, за счет RC-цепей, которые подключены к их основным электродам, на его выходе создается напряжение в диапазоне $140 \div 180$ В, опасное для человеческой жизни. Внутреннее сопротивление источника этого напряжения большое и для обнуления выходного напряжения, резистор сопротивлением 22 Ом, в качестве обнуляющей нагрузки (ОН) подключается к выходу стабилизатора при помощи маломощного симистора VS2 (рис. 7.). Таким образом, напряжение понижается до безопасной величины (около 3–8 В).

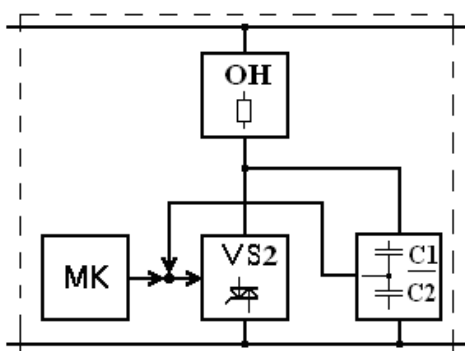


Рис. 7. Структурная схема цепи обнуления выходного напряжения и подавителя выбросов

В рабочем режиме, когда мощная нагрузка отключается при помощи контактного выключателя или один из проводов питания разрывается, по закону коммутации ток в цепи старается сохранить свое прежнее значение. При отключении нагрузки сопротивление цепи возрастает до бесконечности и за счет энергии, накопленной в обмотках автотрансформатора, получается выброс напряжения. Высота выброса напряжения теоретически может расти до бесконечности, но практически ограничивается сопротивлением изоляции проводов. Если нагрузка носит индуктивный характер, выброс напряжения может достигать до значения критического уровня, который при отсутствии управляющего сигнала может пробить симистор или произойти его самопроизвольное включение. Если к выходу стабилизатора подключить внутреннюю нагрузку с определенным сопротивлением, когда отключается основная нагрузка, накопленная энергия разрядится, и выброс напряжения не повысится до опасного предела. В качестве внутренней нагрузки используется ОН, как нагрузка – гаситель. Чтобы при перенапряжениях подключить ОН, УЭ симистора VS2 подсоединяется к ёмкостному делителю. Отношение значений ёмкостей делителя выбрано таким образом, что сетевое напряжение с частотой 50 Гц и амплитудой 300 В не сможет открыть симистор, а когда высота выброса напряжения превысит 100 В, VS2 откроется, подключая ОН к выходу стабилизатора. ОН отключается при нулевом значении тока, в этом случае опасное перенапряжение не произойдет.

Таким образом, в силовой цепи стабилизатора применяются два способа для подавления импульсной помехи: первый – на его входные и выходные цепи, на основные электроды силовых ключей постоянно подключаются RC-фильтры; второй в момент действия импульсной помехи, – на выход стабилизатора подключается активная нагрузка.

Токовые трансформаторы конструктивно состоят из одной обмотки, намотанной на ферритовое кольцо, надеваются на входную и выходную линии и на каждый провод, который соединяет симисторы с отводами автотрансформатора.

Токовые трансформаторы ТТс в цепях симисторов служат для выключения стабилизатора при КЗ в их цепях и на выходе стабилизатора. Их выходы соединены со схемой логического суммирования.

Схема логического суммирования состоит из выпрямительных диодных мостов. Сигналы от токовых трансформаторов, при помощи диодных мостов выпрямляются, логически суммируются и результирующий сигнал, через делитель напряжения, прикладывается к базе транзисторного ключа. Сигнал транзистором усиливается, инвертируется и ограничивается на ТТЛ уровне. Отношение сопротивлений делителя выбрано таким образом, что когда ток перегрузки достигает до 80А, на коллекторе транзистора получается «0». С выхода транзистора сигнал поступает на вход избирательной схемы, который сбрасывает МК. Схема защиты по току (СЗТ), которая состоит из схемы логического суммирования и избирательной схемы, описывается в [6].

Токовые трансформаторы ТТвх. и ТТвых., которые подключены на входные и выходные линии, служат для отключения стабилизатора в течение 2–3 с, при 20 %-ной перегрузке. Их выходные сигналы суммируются с помощью диодов VD1, VD2 и подаются на вход компаратора Кпг. (рис. 8). Выход компаратора, одновременно подключается к светодиоду VD3, который находится в блоке индикации и к одному выводу МК, который используется как вх./вых. (I/O – input/output).

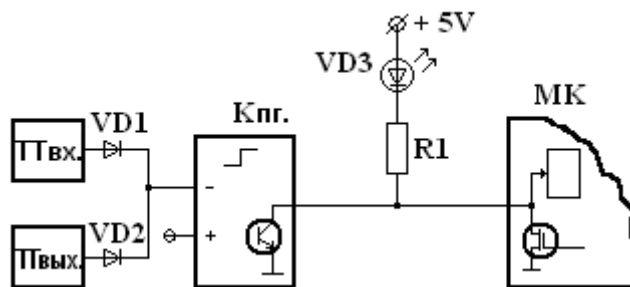


Рис. 8. Схема контроля и индикации перегрузки

Выход МК имеет триггер Шмидта на входе и открытый сток на выходе, выходной каскад компаратора открытый коллектор, поэтому такое соединение опасности не составляет. При запуске стабилизатора вывод МК настраивается как «вход» и принимает информацию о перегрузке. При перегрузке на выходе компаратора получается «0» и VD3, индицируя об этом, начинает светиться, и эта же информация подается на вход МК. Если перегрузка продлится более 3 с, МК выключает стабилизатор, при этом на его выходе прекращается действие перегрузки и исчезает сигнал с компаратора, который подается одновременно на VD3 и вход МК. Чтобы сохранить информацию об аварийном отключении стабилизатора, когда стабилизатор отключается от перегрузки, с помощью программы вывод МК настраивается как «выход» и он оставляет VD3 в режиме индикации. Пока стабилизатор остается в сети подключенным, эта информация не теряется.

Заключение. Сигнал для определения состояния симистора берется от его основных электродов, и это упрощает электрическую схему и уменьшает расход энергии в целом.

Для подавления переходных перенапряжений, возникающих при соединении и разъединении к стабилизатору мощных нагрузок, в качестве ограничителя пере-напряжения используется внутренняя нагрузка.

Применение новой схемы защиты и индикации обеспечивает надежное вы-ключение стабилизатора при перегрузках со следующей индикацией и хранением события.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Набиев Р.Н., Велиев С.М., Гашимова А.Ю.* Методика расчета автотрансформатора для электронного стабилизатора переменного сетевого напряжения // МАА-nın elmi əsərləri. – 2004. – № 2. – Р. 139-149.
2. *Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А.* Полупроводниковые приборы / Под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергомиздат, 1990. – 590 с.
3. *Кривецкий А.* Нормализатор напряжения сети // Схемотехника. – 2007. – № 4. – С. 34-37.
4. *Володин В.Я.* Компенсатор отклонения напряжения сети // РадиоХобби. – 2004. – № 1. <http://valvolodin.narod.ru/articles/Kompens.pdf>.
5. *Пашаев А.М., Набиев Р.Н., Гараев Г.И.* Схема защиты от одновременного открывания двух или более симисторов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 2 (127). – С. 130-135.
6. *Raşayev A.M., Nəbiyev R.N., Qarayev Q.İ.* Simistorlu stabilizatorlarda yüksək cəldlikli elektron qoruyucusu // МАА-нын elmi əsərləri. – 2007. – № 2. – Р. 3-10.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Набиев Расим Насиб оглы – Национальная академия авиации Азербайджана (г. Баку); e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; AZ1045, г. Баку, пос. Bina, 25 km.; д.т.н.; начальник отдела Авиационной электроники НИИ ТАП.

Гараев Гадир Исахан – д.т.н.

Nabiev Rasim Nasib Ogli – National Aviation Academy of Azerbaijan (Baku city); e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; AZ1045, Baku city, Pos Bina; dr. of eng. sc.; chief of Electronic Aviation National Aviation Academy of Azerbaijan.

Garaev Gadir Isakhan – dr. of eng. sc.

УДК 621.3.013; 629.054

А.З. Бадалов, Р.Н. Набиев, А.З. Мамедов

УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОЙ И СТАБИЛЬНОЙ ЛЕВИТАЦИИ МАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА

Рассмотрены вопросы, касающиеся исследования динамических свойств систем магнитной левитации. Ставится задача оценки показателей качества динамически скорректированной системы магнитной левитации (СМЛ) с целью определения ее запасов устойчивости. В работе приведена принципиальная электрическая схема СМЛ и ее математическая модель. Представлены результаты расчетов параметров необходимых и достаточных условий обеспечения состояния устойчивой и стабильной левитации магнитного сердечника. Показаны графики зависимостей параметров передаточных функций модели СМЛ от параметров соленоида.

Левитация; сердечник; соленоид; магнитная левитация.