

Компенсатор отклонения напряжения сети

Нестабильное напряжения сети может сделать невозможной нормальную работу электроприборов и даже привести к их повреждению и последующему возгоранию. К сожалению такие сверхнормативные отклонения напряжения не редкость для наших сетей и особенно характерны для слабых сетей в сельской местности. Обычно мы имеем дело с понижением напряжения сети, но при неравномерной нагрузке трёхфазной сети, а так же при её дефектах, напряжения на отдельных фазах могут сильно увеличиться относительно номинала. Например, некоторое время назад, я лично наблюдал случай, когда, из-за дефекта трансформатора ТП, напряжение в розетках близлежащих домов повысилось до 290 в и было таким в течении трёх дней, пока трансформатор окончательно не вышел из строя. Такое повышение напряжения случается крайне редко, но вот повышение напряжения до 245 .. 255 в или понижение до 165 .. 175 в вещь довольно обычная.

Что делать в таком случае?

Регулярно контролировать напряжение сети и своевременно отключать холодильник, стиральную машину и освещение? Подключить через феррорезонансные стабилизаторы наиболее ценные электроприборы (телевизор, видеомагнитофон, аудио комплекс и т.д.)?

В первом случае жизнь превратится в пытку, а во втором проблема будет решена частично. Решить проблему полностью можно, применив мощный стабилизатор напряжения сети, способный удерживать напряжение сети в допустимых пределах и имеющий мощность достаточную для питания квартиры или сельского дома.

Как правило, обычные бытовые электроприборы нормально работают при напряжения сети переменного тока $220 \pm 10\%$ в. Для удержания напряжения сети в указанных пределах можно использовать стабилизатор, выполненный на основе регулирующего трансформатора с дискретно изменяющимся коэффициентом трансформации. В простейшем случае регулирующий трансформатор имеет несколько отводов, которые коммутируются контактными или бесконтактными ключами. Момент включения того или иного ключа зависит от текущего напряжения сети. Регулирующий трансформатор должен иметь столько отводов, чтобы обеспечить возможность удержания напряжения нестабильной сети в допустимых пределах.

Стабилизатор такого типа не является стабилизатором в полном смысле этого слова, так как не может обеспечить непрерывной стабилизации напряжения сети, а является скорее всего компенсатором отклонения напряжения сети (КОН). Достоинством КОН является то, что он практически не вносит нелинейных искажений в напряжение сети и имеет минимальные массогабаритные параметры, что особенно существенно, так как КОН должен иметь мощность достаточную для питания городской квартиры или сельского дома.

Теме дискретных стабилизаторов напряжения посвящено достаточно много литературы [1, 2]. В [3] был описан стабилизатор переменного напряжения в котором обмотки регулирующего трансформатора коммутировались контактами электромагнитных реле. Так как электромагнитные реле имеют низкое быстродействие и их момент переключения практически невозможно синхронизировать с паузами в токе нагрузки, то в выходном напряжении КОН появляются паузы и всплески, которые вызывают радиопомехи и сбой в работе электрооборудования. Кроме этого контакты реле быстро подгорают, что снижает надёжность и максимальную мощность устройства. Использование полупроводниковых тиристорных ключей переменного тока позволяет избежать перечисленных недостатков.

В статье описан быстродействующий КОН, обеспечивающий на выходе напряжение $220 \pm 10\%$ в, при изменении напряжения сети в пределах от 165 до 290 в. Электрическая схема КОН изображена на рис.1. КОН собранный на основе автотрансформатора с тремя отводами, которые коммутируются тиристорными ключами, каждый из которых состоит из двух, включенных встречно-параллельно, оптотиристоров типа ТО125-12.5. Тиристорные ключи шунтированы защитными RC-цепочками R1C1, R2C2 и R3C3. Последовательно с тиристорными ключами включена цепочка, состоящая из двух, включенных встречно-параллельно, диодов VD1 и VD2. Напряжение с этой цепочки поступает в узел контроля и управления (УКУ), где используется в качестве входного сигнала датчика пауз тока. Трансформатор Т1, защищённый плавким предохранителем FU1, служит для питания УКУ. От токовых перегрузок схема КОН защищена автоматическим выключателем QF1.

УКУ контролирует напряжение сети и при его колебаниях в пределах от 165 до 290 в, посредством тиристорных ключей, переключает отводы регулирующего трансформатора. При этом с выхода КОН снимается напряжение $220 \pm 10\%$ в. При большем отклонении напряжения сети УКУ блокирует работу тиристорных ключей до момента возврата напряжения в указанные границы. Благодаря токовой синхронизации тиристорные ключи переключаются в паузах тока, что исключает перегрузку тиристорных и регулирующего трансформатора. Благодаря высокому быстродействию тиристорных ключей в выходном напряжении КОН отсутствуют паузы, способные вызвать сбой в работе различного электрооборудования. Описываемый КОН был изготовлен на мощность 2.2 кВА. Но выходная мощность КОН может быть легко увеличена, если использовать более мощные тиристорные ключи (например МТ0Т080) и более мощный автотрансформатор. При этом схема УКУ практически не меняется.

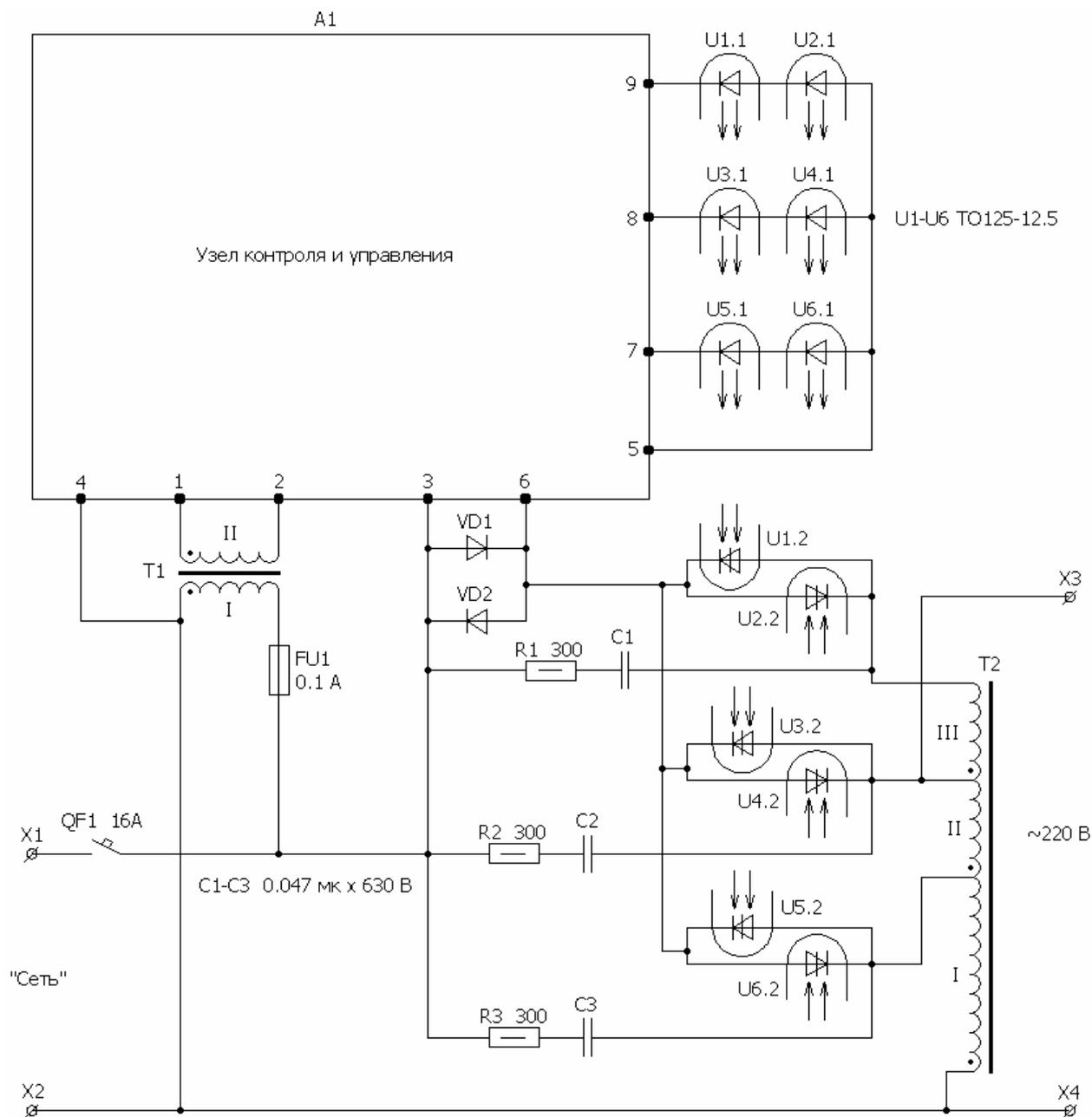


Рис.1

На рис.2 изображена принципиальная электрическая схема УКУ. На контакты 1 и 2 УКУ подаётся переменное напряжение с трансформатора Т1 (рис.1). Это напряжение выпрямляется диодным мостом, собранном на диодах VD3-VD6, и сглаживается на конденсаторе С4. Далее постоянное напряжение поступает на компенсационный стабилизатор, собранный на ОУ DA1, транзисторах VT1 и VT2, диоде VD7, стабилитроне VD8, конденсаторах С5, С6 и резисторах R4-R11. Стабилизированное напряжение +5 Вольт снимается с коллектора регулирующего транзистора VT1. Такое включение регулирующего транзистора позволяет получить минимальную разницу между стабильным напряжением и входным напряжением стабилизатора. В этом случае диапазон изменения входного напряжения стабилизатора получается шире, чем в случае, когда стабильное напряжение снимается с эмиттера регулирующего транзистора. Этот фактор является решающим при выборе стабилизатора для КОН, так как последний должен работать в широком диапазоне изменения напряжения сети. Но для компенсационных стабилизаторов данного типа типичной проблемой является начальный пуск стабилизатора, так как все цепи управляющие транзистором VT1 питаются с его выхода. Обычно между эмиттером и коллектором регулирующего транзистора VT1 включают пусковой резистор, через который и осуществляется питание схемы стабилизатора в первоначальный момент времени. Но резистор, шунтирующий VT1, ухудшает нагрузочные и регулировочные параметры стабилизатора, а так же может сделать его вообще неработоспособным при превышении входным напряжением некой критической величины, когда ток через пусковой резистор сравняется с током нагрузки стабилизатора. В описанной конструкции проблема начального пуска решена путём необычного управления транзистором VT2, который, в свою очередь,

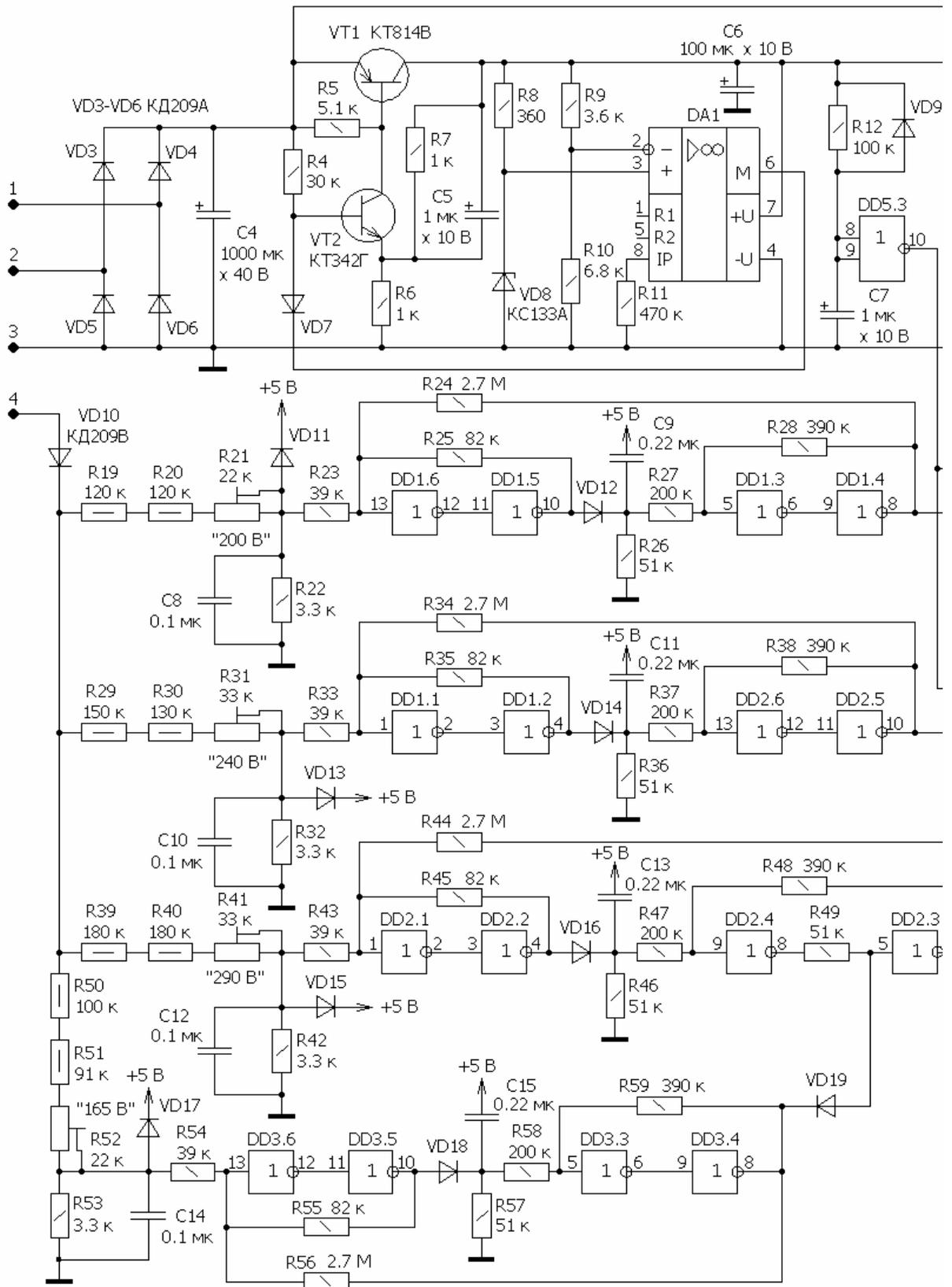


Рис.2а

управляет транзистором VT1. Транзистор VT2 открывается током поступающим не с выхода усилителя рассогласования, собранного на ОУ DA1, а с входа стабилизатора через резистор R4. Управление же транзистором VT2 осуществляется шунтированием части отпирающего тока через диод VD7 и выход ОУ DA1. При этом проблема пуска не возникает вообще. Если напряжение на входе стабилизатора ниже +5 Вольт, то оно практически без потерь проходит на выход стабилизатора, через открытый транзистор VT1. Как только входное напряжение стабилизатора превысит напряжение стабилизации на величину необходимую для работы

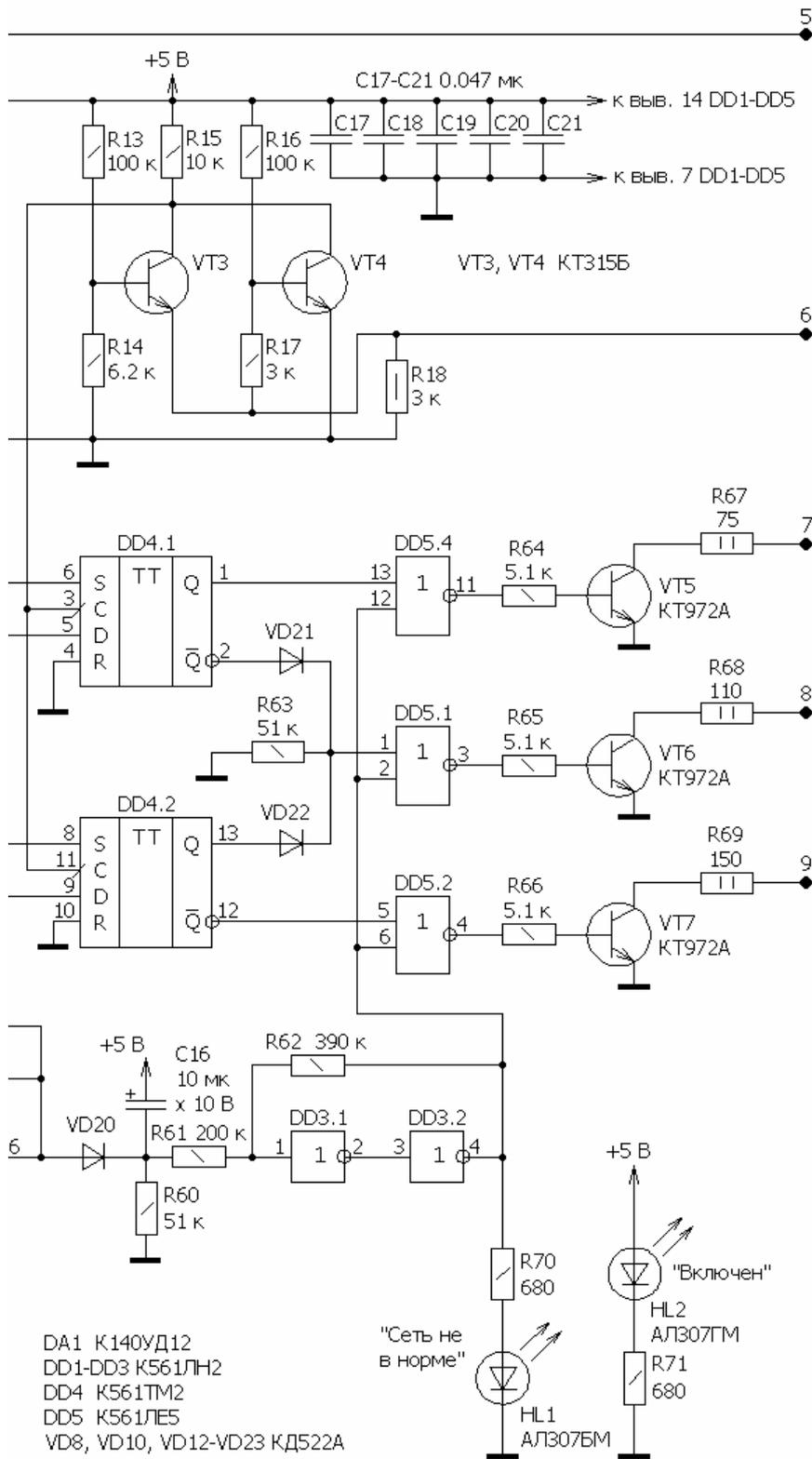


Рис.26

регулирующего транзистора ($>U_{кэ}$ нас), то сразу включается обратная связь и стабилизатор начинает функционировать. В описываемой конструкции компенсационный стабилизатор начинает работать при достижении напряжением сети величины 80 в и сохраняет свою работоспособность вплоть до 400 в. Корректирующая RC-цепочка R7C5, совместно с R6, не допускает неустойчивой работы стабилизатора. На стабилитроне VD8 и резисторах R8-R10 собран измерительный мост, с диагонали которого снимается сигнал рассогласования, возникающий при отклонении стабилизируемого напряжения от номинала, и подаётся на вход

усилителя рассогласования. Резистор R11 задаёт режим работы ОУ DA1. Светодиод HL2 показывает, что КОН “Включен” в сеть.

На инверторе DD5.3, диоде VD9, конденсаторе C7 и резисторе R12 собрана схема начальной установки триггеров DD4.1 и DD4.2.

Напряжение питающей сети контролируется при помощи четырёх быстродействующих компараторов сетевого напряжения. Напряжение на вход компараторов подаётся с контактов 3 и 4, через однополупериодный выпрямитель VD10. Использование однополупериодного выпрямителя замедляет в два раза время реакции КОН на изменение напряжения сети, но зато исключает возможность двойного переключения КОН в течении одного полупериода, что может привести к одностороннему намагничиванию сердечника автотрансформатора T1. Компараторы срабатывают при напряжении сети равном 165, 200, 240 и 290 в и собраны по аналогичной схеме, которая была подробно описана в [4, 5]. Рассмотрим кратко работу компаратора, настроенного на порог 200 в и состоящего из делителя напряжения R19, R20, R21, R22 и C8, диода VD11, первого триггера Шмидта R23, R25, DD1.6 и DD1.5, диода VD12, RC-цепочки C9R26, второго триггера Шмидта R27, R28, DD1.3, DD1.4 и резисторе R24. Импульсы выпрямленного напряжения поступают на делитель напряжения R19, R20, R21, R22. Подстроечный резистор R21 служит для настройки порога срабатывания компаратора. Конденсатор C8 отфильтровывает импульсные помехи проникающие из сети. Диод VD11 защищает вход первого триггера Шмидта от повышенного напряжения. К выходу делителя напряжения подключен вход первого триггера Шмидта, который, при превышении напряжением сети порога срабатывания компаратора, формирует на своём выходе прямоугольные импульсы, следующие с частотой 50 Гц. Эти импульсы, через диод VD12, разряжают конденсатор C9. Параметры RC-цепочки C9R26 выбраны таким образом, чтобы конденсатор C9 не успевал зарядиться до напряжения срабатывания второго триггера Шмидта и поэтому на выходе второго триггера Шмидта присутствует постоянный высокий уровень. Как только напряжение сети снизится, на выходе первого триггера Шмидта перестанут формироваться прямоугольные импульсы, конденсатор C9 зарядится до порога срабатывания второго триггера Шмидта и на его выходе сформируется низкий уровень.

Компараторы на инверторах DD2.1, DD2.2, DD2.3, DD2.4 и DD3.3, DD3.4, DD3.5, DD3.6 контролируют аварийное отклонение напряжения сети выше 290 в и ниже 165 в, когда КОН уже не в состоянии компенсировать отклонение напряжение. В случае аварийного отклонения напряжения сети на выходе инвертора DD2.3 будет сформирован высокий логический уровень, который, через диод VD20 разрядит конденсатор C16. На выходе триггера Шмидта, собранного на инверторах DD3.1, DD3.2 и резисторах R61, R62, будет так же сформирован высокий уровень, который заблокирует работу 2ИЛИ-НЕ элементов DD5.1, DD5.2 и DD5.4, с выхода которых управляются тиристорные ключи, коммутирующие светодиоды оптотиристоров тиристорных ключей. Одновременно загорится светодиод HL1, показывающий, что “Сеть не в норме”. Как только напряжение сети нормализуется, на выходе инвертора DD2.3 будет сформирован низкий уровень, диод VD20 закроется и через некоторое время, определяемое постоянной времени RC-цепочки R60C16, напряжение на C16 достигнет порога срабатывания триггера Шмидта, собранного на DD3.1 и DD3.2. Низкий уровень с выхода DD3.2 разрешит работу 3ИЛИ-НЕ элементов DD5.1, DD5.2 и DD5.4.

Переключение отводов автотрансформатора должно производиться в моменты прохождения тока через ноль, когда открытый перед этим тиристор гарантированно закрылся. Только в этом случае переключение произойдёт безболезненно. В противном случае может получиться ситуация, когда одновременно окажутся подключенными два вывода автотрансформатора, что приведёт к короткому замыканию и к перегрузке или повреждению открытых тиристоров. В [1] для такой синхронизации используются трансформаторы тока. Практика показала, что использование для синхронизации трансформаторов тока оправдано, если в токе нагрузки КОН отсутствует постоянная составляющая. Реально в токе нагрузки КОН иногда может присутствовать постоянная составляющая, вызванная нелинейностью нагрузки, резким изменением входного напряжения или какими-либо другими причинами. Так как трансформатор тока пропускает только переменную составляющую контролируемого тока, то, при наличие постоянной составляющей тока, он искажает реальную картину и показывает паузы тока там, где их на самом деле нет. В этом случае ценность принципа коммутации тиристоров в паузах тока сводится к нулю. В описываемой конструкции КОН используется принцип непосредственного контроля падения напряжения на встречно-параллельно включенных диодах VD1 и VD2, через которые протекает ток тиристорных ключей. Для контроля этого напряжения используется датчик пауз тока собранный на транзисторах VT3, VT4 и резисторах R13-R18. Так как прямое падение напряжения на открытых диодах VD1 и VD2 соизмеримо с отпирающим напряжением $U_{бэ}$ транзисторов VT3, VT4, то для нормальной работы схемы на базы транзисторов VT3, VT4 подаётся небольшое положительное смещение при помощи делителей напряжения R13, R14 и R16-R18.

С резистора R15, являющегося общей коллекторной нагрузкой для транзисторов VT3 и VT4, импульсы токовой синхронизации, формируемые в момент прохождения контролируемого тока через ноль, поступают на входы синхронизации триггеров DD4.1 и DD4.2. По переднему фронту импульса синхронизации происходит запись в триггеры DD4.1 и DD4.2 логического состояния на выходах компараторов 200 в и 240 в. Выходные логические уровни триггеров DD4.1 и DD4.2, при помощи элемента 2ИЛИ, собранного на диодах VD21, VD22 и резисторе R63, преобразуются в позиционный код, который, через 2ИЛИ-НЕ элементы DD5.1, DD5.2, DD5.4 и резисторы R64-R65, поступает на транзисторы VT5-VT7, каждый из которых управляет своим тиристорным ключом. Единственно может быть открыт, разумеется, только один транзистор. В коллекторные цепи

транзисторов включены резисторы R67-R69, устанавливающие ток управления для каждого тиристорного ключа, в зависимости от напряжения сети.

Детали: В качестве диодов VD1 и VD2 можно использовать любые мощные диоды, рассчитанные на средний прямой ток 10А, например диоды Д242А, Д243А, Д245А, Д246А. Каждый из диодов должен быть установлен на пластину из алюминия толщиной 3мм и размером 50 x 50 мм.

Оптотиристоры U1, U3, U5 можно установить на общую пластину из алюминия толщиной 3мм и размером 100 x 50 мм. Каждый из оптотиристоров U2, U4 и U6 установлен на отдельную пластину из алюминия толщиной 3мм и размером 100 x 50 мм.

Если диоды VD1, VD2 выбрать из унифицированного ряда, например Д112-10, то удобно диод VD1 выбрать с индексом "X"(с катодом на корпусе), а диод VD2 без индекса "X"(с анодом на корпусе). В этом случае диоды VD1, VD2 и оптотиристоры U1, U3, U5 можно расположить на одной пластине из алюминия толщиной 3мм и размером 100 x 100 мм.

В качестве трансформатора Т1 использован готовый силовой трансформатор от реле контроля фаз ЕЛ-8УЗХЛ4. Трансформатор намотан на сердечнике Ш11х15. Первичная обмотка трансформатора содержит 6910 витков провода ПЭВ-1 Ø0.08мм, а вторичная – 473 витка провода ПЭВ-1 Ø0.2мм.

Трансформатор Т2 намотан на сердечнике Ш40х65. Секция I трансформатора содержит 304 витка провода ПЭВ-1 Ø1.68мм, секция II- 64 витка провода ПЭВ-1 Ø2.44мм и секция III- 70 витков провода ПЭВ-1 Ø2.44мм.

Настройка: Для настройки КОН необходимо иметь следующее оборудование:

1. Разделительный трансформатор 220х380 в, мощностью 150-200 в_а.
2. ЛАТР 0-250 в, 2 а.
3. Ампервольтметр
4. Осциллограф.
5. Лампочка накаливания 220 в 60вт.

Первоначально трансформатор Т2 должен быть полностью отключен.

Через ЛАТР и разделительный трансформатор подаем напряжение сети на клеммы X1, X2 КОН. Сначала контролируем наличие напряжения +5 Вольт на коллекторе VT1. При изменении входного напряжения КОН в пределах 80-380 Вольт это напряжение должно оставаться стабильным.

Далее приступим к настройке быстродействующих компараторов КОН.

Подключим осциллограф к 6 ножке DD2.3. С помощью резистора R41 добиваемся, чтобы уровень на выходе DD2.3 менялся с низкого на высокий при повышении напряжения переменного тока выше 290 в. Возможно потребуется уточнение номиналов резисторов R39 и R40. Переключение уровня должно быть чётким, без всяких импульсных включений. Если такого не происходит, то можно попытаться немного увеличить величину резистора R46.

Далее подключим осциллограф к 8 ножке DD3.4. С помощью резистора R52 добиваемся, чтобы уровень на выходе DD3.4 менялся с высокого на низкий при понижении напряжения переменного тока ниже 165 в. Возможно потребуется уточнение номиналов резисторов R50 и R51. Переключение уровня должно быть чётким, без всяких импульсных включений. Если такого не происходит, то можно попытаться немного увеличить величину резистора R57.

При повышении переменного напряжения выше 290 в и понижении ниже 165 в должен загораться светодиод HL1 "Сеть не в норме".

Далее подключим осциллограф к 10 ножке DD2.5. С помощью резистора R31 добиваемся, чтобы уровень на выходе DD2.5 менялся с низкого на высокий при повышении напряжения переменного тока выше 240 в. Возможно потребуется уточнение номиналов резисторов R29 и R30. Переключение уровня должно быть чётким, без всяких импульсных включений. Если такого не происходит, то можно попытаться немного увеличить величину сопротивления R36.

Теперь подключим осциллограф к 8 ножке DD1.4. С помощью резистора R21 добиваемся, чтобы уровень на выходе DD1.4 менялся с высокого на низкий при понижении напряжения переменного тока ниже 200 в. Возможно потребуется уточнение номиналов резисторов R19 и R20. Переключение уровня должно быть чётким, без всяких импульсных включений. Если такого не происходит, то можно попытаться немного увеличить величину сопротивления R26.

Выходы тиристорных ключей U1U2, U3U4 и U5U6 объединим и подключим к ним, в качестве нагрузки, лампочку накаливания 220 в 60 в_т.

Установим напряжение источника переменного тока равным 220 в и подключим осциллограф к коллектору транзистора VT3 или VT4. Осциллограф должен показать наличие коротких импульсов токовой синхронизации.

При изменении напряжения переменного тока в пределах от 160 в до 245 в должно происходить чёткое переключение тиристорных ключей, о чём свидетельствует поочередное появление высокого логического уровня на выходах логических элементов DD5.4, DD5.1 и DD5.2. При этом пропорционально поданному напряжению должна изменяться яркость свечения лампочки накаливания.

Подключим регулирующий автотрансформатор Т2.

К выходным клеммам X3 и X4 КОН подключим, в качестве нагрузки, лампочку накаливания 220 в 60 в_т. Исключим разделительный трансформатор и подадим питание на КОН непосредственно от сети, через ЛАТР.

При помощи ЛАТРа, плавно понизим напряжение на входе КОН от 250 до 0 в. При изменении входного напряжения в диапазоне от 250 до 165 в, выходное напряжение КОН должно оставаться в пределах от 200 до 240 в. При снижении входного напряжения ниже 165 в должна отключиться нагрузка и должен загореться индикатор НЛ1 “Сеть не в норме”. При нормализации входного напряжения, с некоторой выдержкой, должна включиться нагрузка КОН. На данном этапе можно уточнить настройку порогов срабатывания быстродействующих компараторов КОН.

После окончательной настройки можно приступать к эксплуатации КОН.

При подключении КОН к сети необходимо помнить, что клемма X1 соединена с фазным, а клемма X2 с нулевым сетевым проводом!

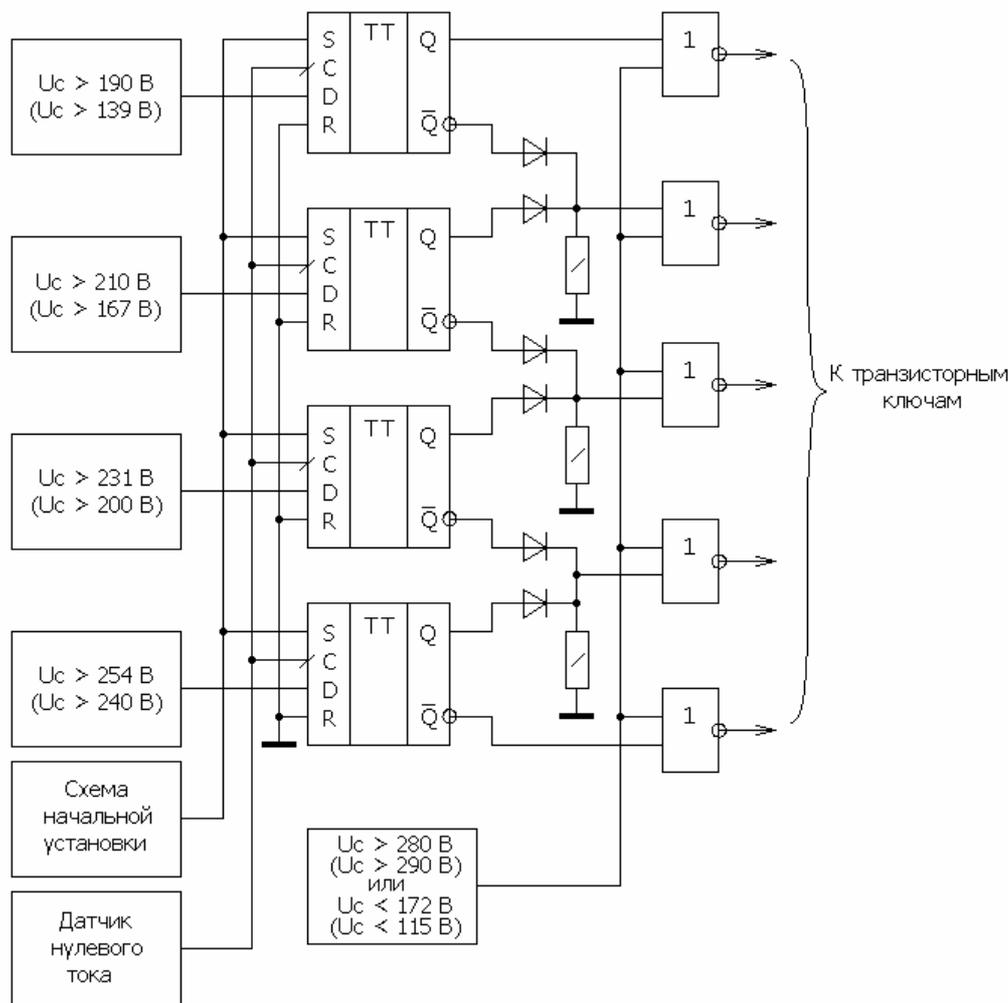


Рис.3

В дополнение хотелось бы сказать, что при необходимости можно очень легко уменьшить разброс выходного напряжения КОН или же увеличить диапазон изменения входного напряжения КОН путём увеличения количества ступеней регулирования трансформатора. На рис. 3 приведён вариант модернизации схемы УКУ, позволяющий управлять пятью тиристорными ключами. Для этого в схему УКУ нужно добавить ещё два компаратора и два триггера.

Например, если мы хотим уменьшить разброс выходного напряжения КОН до $\pm 5\%$, то настраиваем компараторы на значения указанные без скобок, а если необходимо увеличить допустимый диапазон изменения входного напряжения до 115-290 в, то настраиваем компараторы на значения указанные в скобках. Разумеется в этом случае регулирующий трансформатор должен быть рассчитан на конкретное применение и будет отличаться от описанного в статье.

Литература:

1. Борисов В. П., Иванчук Б. Н., Колосков И. И. Стабилизаторы напряжения с переключаемыми регулируемыми элементами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 13 с.
2. Миловзоров В. П., Мусолин А. К. Дискретные стабилизаторы и формирователи напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Ященко О. Стабилизатор переменного напряжения. – Радио, 1981, N1. 10 с.
4. Володин В. Компаратор сетевого напряжения. – Радиолюбитель, 2000, N11, 12. 15 с., 14 с.

5. Володин В. Я. Быстрый компаратор сетевого напряжения на КМОП микросхеме. Радиоаматор – электрик, 2000, №9. 21 с.