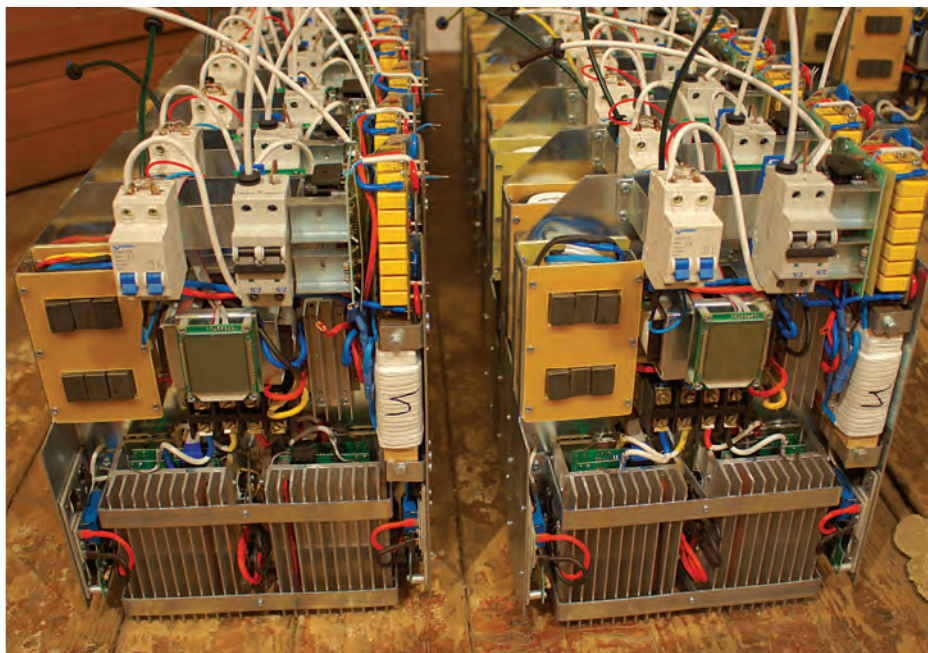


# Стабилизаторы: от А до Я



**Сергей ИГОЛКИН,**  
инженер, разработчик силовой электроники

Стабилизаторы на основе тиристорно-симисторных схем с вольтодобавкой появились на рынке как реакция на некачественное сетевое напряжение. Но такие решения начинают сегодня вытесняться системами с двойным преобразованием энергии, которые обладают целым рядом полезных потребительских качеств.

Популярность стабилизаторов переменного напряжения наблюдается на протяжении последних 25 лет. Обусловлена она увеличением потребления электроэнергии и возрастанием нагрузки на старые сети. Но есть и несколько базовых факторов: разводка от трансформаторных подстанций по потребителям «цепочкой», а не радиально, что создает неодинаковое напряжение в начале и в конце такой цепочки. При этом расчет выполняется с учетом среднего потребления, тогда как в пиковые моменты проседание напряжения у самого потребителя и его соседей может резко возрастать. Есть и другие факторы, неизбежные в принятой системе распределения, которую уже поздно менять. Кроме того, современная электроника более чувствительна к опасным перенапряжениям в сети, требует более качественного питания, чем даже регламентировано в стандартах.

Часто говорят, что современные электронные блоки питания — например, у ноутбуков, телевизоров и тому подобных устройствах, не нуждаются в стабилизации напряжения, так как рассчитаны на широкий диапазон. Но на самом деле это говорится только о среднем значении величин напряжения, без учета кратковременных,

но очень опасных выбросов и перенапряжений. То же самое верно и для освещения — не все источники способны давать ровный свет, например, при работе сварщика на той же линии, что и они.

## Экскурс в прошлое

Техническое развитие стабилизаторов переменного напряжения до настоящего момента шло по пути все более быстрой реакции на скачки напряжения. При этом значительно меньше внимания уделялось подавлению опасных выбросов, хотя для спасения хотя бы их собственной схемы варисторы обычно устанавливались. Но это только частичное решение проблемы косвенных ударов молнии, которое никак не спасало от коммутационных перенапряжений.

Быстродействие стабилизаторов — один из достаточно важных вопросов. Самые медленные — это сервоприводные (единицы секунд при большом скачке, при небольших отклонениях — доли секунды). Далее — релейные, маломощные до киловатта — могли бы теоретически реагировать за 5–7 мс, но не были своевременно разработаны методы анализа входного напряжения для

быстрой реакции, потому еще на эту процедуру дополнительно расходуются 10–20 мс, а то и больше (в зависимости от схемы). К тому же мощные релейные устройства медленно переключаются, так как используемые реле имеют более тяжелую подвижную систему контактов, к тому же в них сложно подавить возникающую при переключении дугу. Это значит, что они подвержены износу даже больше, чем сервоприводные с их мотором и подвижным контактом. Однако попытки применять релейные схемы продолжают, например, существуют так называемые «гибриды», где тиристор размыкает общую цепь питания по входу, после чего реле переключаются без тока через контакты (не давая дуги). Конечно, это еще больше увеличивает время переключения, но зато с меньшим износом контактов — дешевое решение, востребованное из-за цены.

Итак, все известные решения оказались подвержены износу и требовали технического обслуживания. Поэтому лет 25 назад в компании «Электромир» и РЭТА (обе из Донецка) инженеры разработали стабилизаторы на тиристорных ключах.

И хотя это был где-то даже технологический прорыв, но и таким стабилизаторам тоже требуется время на изменение напряжения на входе. Даже примерно 8–10 лет назад типичный тиристорный или симисторный стабилизатор реагировал примерно за 40 мс. Попытка китайских производителей выйти на этот рынок с временем реакции 100 мс (как у плохих релейных) — почти или вовсе провалилась. С тех давних пор все время совершенствовались вначале схемы приборов, а после перехода на микропроцессоры, алгоритмы программ. Цель ставилась одна — максимально быстро измерять текущее значение напряжения, чтобы быстрее реагировать на его изменения.

Теперь некоторые производители заявляют о времени реакции своих тиристорных стабилизаторов на скачок входного напряжения в пределах от 10 до 20 мс (20 мс для наихудшего случая). Теоретический предел при естественном закрывании тиристорных, составляет 10 мс (для наихудшего случая), ведь если скачок напряжения произошел в начале полупериода, то до его конца коммутация невозможна. Напомним, 20 мс — это период синусоидальной функции частотой 50 Гц — напряжение именно такой формы и частоты с действующим значением 220 В и амплитудой 310 В используется для подачи потребителям на отечественных электросетях. Требуемый нормативными документами переход на сетевое напряжение 230 В связан, однако, с определенными сложностями, в связи с чем отечественные и европейские стандарты временно допускают использование как 220 В, так и 230 В.

## Достижения и проблемы

Почему важно знать, за какое время реагирует стабилизатор на скачки входного напряжения? Представим себе, что на вашей линии у кого-то включена мощная нагрузка. «Просевшая» из-за этого сеть выдает, предположим,

160 В. Если использовать стабилизатор — он выправит положение, будет 220 В с нормальной точностью. Но если напряжение на входе внезапно станет нормальным (220 В), то на выходе за 20–30 мс (а ранее бывало и на 40–50 мс) появится выброс на 300 В. Не все электронные приборы могут это выдержать.

Производители, естественно, стараются решать эту проблему, совершенствуя алгоритмы анализа входного напряжения. Но как бы быстро ни считал процессор — все равно при резком повышении входного напряжения переключиться на более низкое выходное тиристор сможет только в конце полупериода сетевого напряжения, когда через него перестанет течь ток. Хотя схемотехнически эти проблемы в общем-то решаются.

Если вспомним про радиальную и цепочечную разводку по домам, то понятно, что какая-то часть потребителей — как минимум те, кто «в конце цепочки» — будут иметь пониженное напряжение. Чтобы решить их проблемы, электрик может зависить напряжение на клеммах ТП на холостом ходу до 262–265 В, но это уже будет некоторой проблемой для первых потребителей в цепочке.

Напомним еще про «слабый ноль» и перекосы фаз. И окажется, что не только «просевшее напряжение» является проблемой, но часто и завышенное становится постоянно действующим негативным фактором. Опасность для оборудования, например при использовании компрессоров (холодильники, кондиционеры), есть и при пониженном напряжении сети. Двигатель, который не смог стартовать, перегревается и может выйти из строя, если специально не защищен от этого случая.

В условиях плотной городской застройки или недостатка средств в условиях сельской местности разделение линий для производственных и жилых помещений — тоже проблема. Да и на производствах, наряду с мощным оборудованием, что создает проблемы в сети, есть компьютеры в бухгалтерии, которые эти проблемы получают.

## И что, скоро конец банкета?

Известно, что общий срок службы тиристорных (симисторных) стабилизаторов часто превышает два десятка лет, и даже более того. Вторичный рынок почти пуст. Кстати, тиристорным стабилизаторам всего-то от роду лет 25, толком никто и не знает, сколько они еще прослужат. Конечно, иногда они попадают в сервис. Но общий процент отказов даже за такой срок не особенно напрягает даже крупных производителей, на ремонте занято минимум работников, которые обычно совмещают ремонт со сборкой новых устройств. То есть клиент однажды купил стабилизатор, и он уже навсегда потерян, даже обслуживание не приносит большой прибыли.

---

**Клиент, купивший качественный стабилизатор напряжения, реально уже навсегда потерян для производителя.**

---

Дальнейшее улучшение качества сетевого напряжения могли бы предоставить ИБП двойного преобразования, но они намного дороже стабилизаторов. О гарантиях следует сказать отдельно. Длительный срок может дать тот, кто уверен, что его не разорят ремонты.

Чем это может закончиться? Если народонаселение не растет, то существующие «проблемные точки» либо перестанут быть проблемными — энергетики подведут новые линии, установят больше ТП, обеспечат подключаемую мощность с запасом и т.д. Либо те проблемы, которые могут быть решены стабилизаторами, уже будут решены отечественным производителем среднего и премиум-сегмента на десятки лет вперед, их нынешние 10-летние (это пока) гарантии тому порука. Хотя, возможно, решатся не все проблемы — но об этом ниже. Плохая перспектива для рынка, не так ли?

## Конец света отменяется

На самом деле двигаться всегда есть куда, поскольку решены еще не все проблемы энергосети. Новая современная нежная электронная техника и старые изношенные сети, равно как и новые, выполненные по старым стандартам, — это не очень хорошее сочетание. Однако новых сетей в ближайшее время можно не ожидать, поэтому, как писали братья Стругацкие: «Ты должен сделать добро из зла, потому что больше его просто не из чего делать».

Выше было особо отмечено, что стабилизаторы, даже лучшие из них — тиристорные, пока не идеальны. Идеальный стабилизатор — это устройство, которое не только держит 220 В на выходе во всех мыслимых и немыслимых случаях, перечисленных выше, но и обеспечивает безопасность потребителя при воздействии ряда внешних факторов.

Пока что известно основное направление, позволяющее решить проблемы «до конца» — ИБП двойного преобразования. Существуют они на рынке очень давно и по-прежнему дороги настолько, что иногда превышают стоимость всего оборудования в доме. Некоторые из них могут работать без аккумулятора — получается как раз хороший стабилизатор, реально «не реагирующий на проблемы входа и всегда дающий 220 В на выходе». Зато после входного выпрямителя у них обычно стоит такая накопительная емкость электролитических конденсаторов, что даже мощные коммутационные перенапряжения чаще всего им просто не страшны. Качественно и безопасно. Но нужна доступная по цене альтернатива, и естественно, что после многих попыток разных разработчиков она не могла не появиться.

## Лучшее — альтернатива хорошему

Радикально улучшить безопасность электропитания для современной электронной техники и качество

стабилизации при самых тяжелых условиях в сети смогли инверторные стабилизаторы переменного напряжения. Они используют высокочастотную ШИМ на быстрых мощных IGBT-транзисторах, специальные алгоритмы, цифровые сигнальные процессоры (DSP) для «мгновенной реакции на изменения входного напряжения».

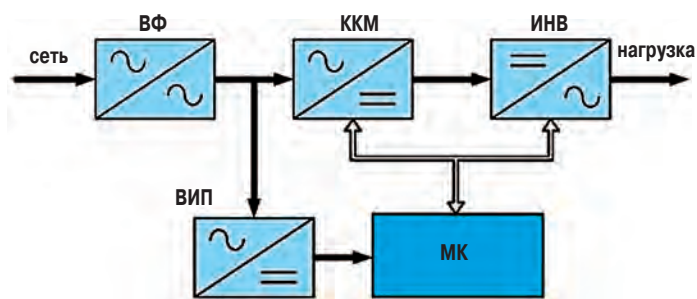
Теперь реакция стабилизатора уже не отстает от входного скачка напряжения, так что на входе может быть «шторм», а на выходе — всегда 220 В.

Есть много разновидностей реализации подобных решений, как с накоплением энергии в электролитических емкостях (с них начинали, так как этот алгоритм проще), так и без него (что позволяет обеспечить срок службы и надежность подобную тиристорно-симисторным стабилизаторам, что важнее при сходных параметрах стабилизации).

Началось это довольно давно, но долгое время доступны были лишь малые мощности, и до сих пор большинство производителей подобных типов стабилизаторов освоили лишь изделия на 5–6 кВт. Однако есть и передовики, преодолевшие этот барьер, сохранив надежность на уровне тиристорно-симисторных устройств.

Например, бесступенчатые стабилизаторы компании «Электромир-Киев» (серия Etalon) имеют максимальную мощность до 14 кВт и даже до 28 кВт в одном корпусе, а при объединении в кластер на трех фазах можно получить суммарно и 170 кВт и даже 340 кВт мощности, в режиме 24\*7, если необходимо. И это несмотря на то что позиционируются эти изделия как бытовые, не для постоянной работы с максимальной нагрузкой, хотя и в таком тяжелом режиме показали себя хорошо. За пять лет выпуска набрана хорошая статистика отказов, которая позволила дать на эти изделия гарантию 5 лет. Длительная гарантия — также и следствие того, что не используются мощные электролитические конденсаторы, склонные к «высыханию» со временем, а входное напряжение преобразовывается непосредственно «на лету» сразу в выходное (рис. 1). То есть мгновенные значения напряжения корректируются последовательно по точкам с интервалом 40 мкс, подерживая точное значение 220 В на выходе.

Еще одно отличие систем с ШИМ — наличие специальной защиты от коммутационных перенапряжений в сети. Именно она обеспечивает надежность самих стабилизаторов и их нагрузки при искрении воздушной линии электропередачи, при отключении мощных потребителей по соседству, при работе сварки на той же линии и других, смертельно опасных эксцессов, как минимум, для мобильных зарядок, плат управления котлами и другой бытовой техники. Эта новинка работает только благодаря данному типу преобразования, так что отдельно или в тиристорных стабилизаторах ожидать ее не следует, все тесно связано и одно помогает другому.



**ВФ** — входной фильтр, ограничивающий импульсные помехи сетевого напряжения;

**ККМ** — корректор коэффициента мощности и устройство выпрямителя с функцией контроля заряда конденсаторов;

**ИНВ** — инвертор, служащий для преобразования постоянного напряжения с блока конденсаторов в стабильное переменное напряжение;

**ВИП** — вторичный источник питания или блок конденсаторов для накопления энергии;

**МК** — микроконтроллер, служащий для контроля и управления схемой двойного преобразования

**Рис. 1.** Двойное преобразование без накопления энергии

Именно максимальное приближение к «идеальному стабилизатору», пусть бы даже функции безопасности и не были им ранее свойственны, позволит освежить рынок, удивив пользователя внезапно резко улучшенной надежностью его оборудования.

## Как и что улучшать

Старые системы, куда мы относим релейные, сервоприводные, феррорезонансные и даже тиристорные стабилизаторы, обладают недостатками, от которых их должны избавить новые, улучшенные стабилизаторы, призванные обеспечить:

- надежную защиту нагрузки, а не только самого стабилизатора;
- «полное безразличие» к тому, что творится у стабилизатора на входе — даже самые быстрые скачки, выбросы, провалы, дрожание уровня (фликер) — должны быть устранены;
- приемлемый вес и габариты — на данный момент в ШИМ-стабилизаторах достигнут показатель примерно в 2 кВт на 1 кг веса, хотя, возможно, это не предел;
- диапазон входного напряжения должен ограничиваться здравым смыслом, а не техническими возможностями производителя.

## ШИМ-стабилизаторы как высшая и последняя стадия электропитания

В эпоху развитого социализма ходили слухи, что та полная разруха, которая царила вокруг, символизировала полную и окончательную победу указанного общественного строя в отдельно взятой стране. Так оно, вероятно, и было, поскольку дальше совершенствовать это безобразие ни у кого не было ни сил, ни желания.

Что же мы получим от ШИМ-стабилизаторов, как высшей стадии развития подобных устройств? Да-да, в отдельно взятой нашей стране. Получим следующее:

- быструю реакцию на входное напряжение — что бы там на входе ни творилось — на выходе стабильные 220 В;
- защиту от опасных выбросов напряжения. Стабилизатор работает, пока исправен, но если же не выдержит опасных импульсов в сети — сгорит сам (нагрузке послужит предохранителем). Но гореть ему не требуется, потому по умолчанию он содержит на входе специальную защиту, обрезающую опасные выбросы. Это либо станет стандартом для всех подобных изделий, либо те, кто так не делают, уйдут с рынка из-за роста отказов;
- любую мощность путем объединения в кластеры почти любого количества стабилизаторов. Точное поддержание одинакового напряжения на выходе позволяет им работать параллельно, и этому же служит плавное ограничение тока на выходе при перегрузках. Если это есть — практически любой подобный стабилизатор можно включать в параллельном режиме. А вот тиристорные такого не позволяют;
- малые габариты и вес, а также бесшумность.

## Физика вольтодобавки

Для конечного потребителя входное напряжение в 220 В — это данность. Если он желает преобразовать его в любое другое, известен только способ — оперировать порциями энергии, поступающими из сети каждые полпериода, а не непрерывным потоком.

Энергия в единицу времени — это мощность. Если нужно преобразовывать 10 кВт, то это означает 10 000 Дж/с. Если преобразование идет на частоте 50 Гц — то за каждый период передается 200 Дж. К примеру, дроссель-реактор на такую энергию имел бы вес 50–100 кг для постоянной работы без перегрева. Кстати, просто трансформатор (не автотрансформатор, тот передает не всю мощность, он по сути лишь вольтодобавка) примерно так и будет весить (на аналогичную мощность) — материалов столько же. Значит, выход — «нарезать» энергию на более мелкие кусочки, регулируя их «размер», а после снова сложить в исходное состояние (та же частота 50 Гц, та же форма — синус, или даже более чистая, ближе к идеалу, но иное напряжение — по потребности). Если проводить преобразование на частоте 40 кГц — то вес того же дросселя-реактора уже будет всего 700 г на те же 10 кВт. И на этом принципе основана почти вся силовая электроника. Размер «кусочка» энергии в этом случае — примерно 0,25 Дж.

Чем же нарезать энергию на кусочки? Тиристоры, способные работать на таких частотах, не прижились из-за сложностей в управлении. Сейчас для высоких мощностей массово используются ключи на IGBT-транзисторах. Существуют и мощные полевые транзисторы с изолированным затвором. Возможно, когда-то они станут предпочтительнее по сумме параметров, но последние

## ТИРИСТОРНЫЕ И СИМИСТОРНЫЕ

О достоинствах тиристорных и симисторных стабилизаторов следует рассказать отдельно, потому что они являются на сегодняшний день наиболее востребованными на рынке решениями. Строятся они по той же схеме, что и релейные — тот же трансформатор с отводами, но вместо контактов реле — тиристоры. Тиристоров используется по два на отвод, чтобы пропустить положительный и отрицательный периоды напряжения сети (обратный ток через тиристор идти не может). Симистор отличается тем, что нужен всего один на отвод, он может пропускать ток обеих полупериодов напряжения.

Конструктивное отличие мощных тиристорных стабилизаторов от релейных — в радиаторе. При пропускании тока на тиристоре падает напряжение примерно 1В, и при токе 50 А, он рассеет 50 Вт; для этого и нужен радиатор.

Отводы от автотрансформатора все чаще разбивают на две группы — входные и выходные, тогда входные отводы обеспечивают грубое регулирование, крупными ступенями, а промежуточные значения получаются уже коммутацией выходных отводов, размещенных как бы внутри одного грубого по диапазону. Простой пример: если входные отводы расположены через 30 В, и их сделано 6 — диапазон напряжения по входу будет 150 В, например — от 120 В до 270 В может быть обеспечена стабилизация. Теперь, если выходной отвод, с которого снимается выходное напряжение, заменяют группой из шести отводов, то вместо ступеней по 30 В, получаем ступени по 6 В — точность  $\pm 3$  В или примерно  $\pm 1,5\%$ . Такие стабилизаторы называются «матричными», и некоторые фирмы производят только такие модели (алгоритм там немного сложнее и позволяет обеспечить точное регулирование в сложных условиях).

Но бесплатный сыр бывает лишь в мышеловках — вместо 50 Вт при 50 А (примерно), матричный стабилизатор на тиристорах уже рассеивает при том же токе удвоенную мощность — 100 Вт.

Тиристорные стабилизаторы обладают целым рядом достоинств. Прежде всего, это высокая надежность и устойчивость к большим перегрузкам. К недостаткам, свойственным также их ближайшим сородичам, релейным стабилизаторам, следует отнести не слишком высокую скорость регулирования.

несколько десятков лет первенство в мощной силовой электронике держат именно IGBT, причем рубеж мощности в мегаватты давно уже взят, так что стабилизатор на 5–10–20 кВт вовсе для них не проблема.

Остаются промежуточные накопители энергии — конденсаторы, дроссели-реакторы и дроссели-фильтры — без фильтров нельзя, так как со стороны сети и со стороны потребителя не должно быть «следов нарезки», то есть ВЧ-составляющих, что появлялись в процессе преобразования. Нарезали, склеили и отполировали место склейки, как-то так можно образно представить. «Снаружи», по приборам мы словно видим обычный трансформатор, со всеми его свойствами — вот только коэффициент трансформации меняется все время так, как нужно для стабилизации, быстрой и точной. Естественно, если продолжать аналогию, то после нарезки часть кусочков выкинули или добавили, чтобы уменьшить или увеличить напряжение (неверное, но удобное представление).

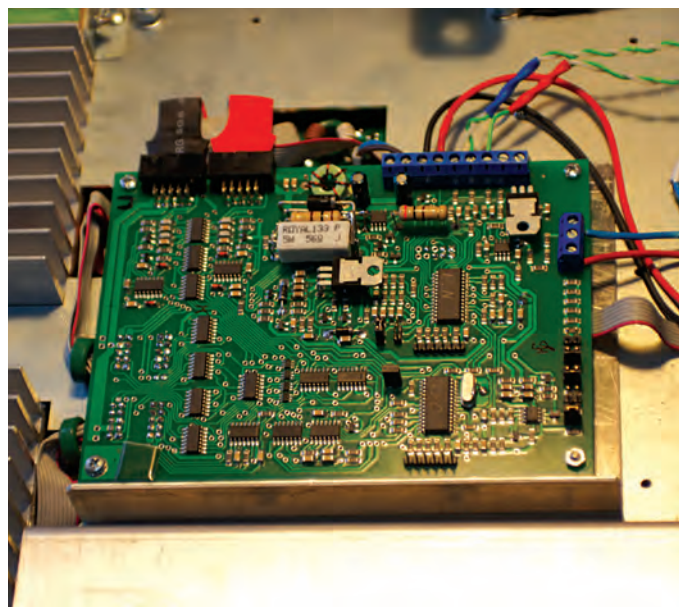


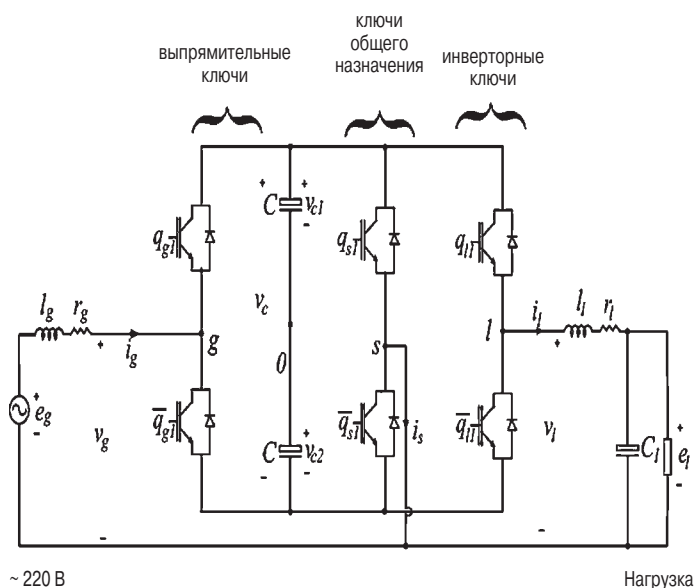
Рис. 2. Плата управления стабилизатора

## О вольтодобавках и «полном пропуске»

Если в сети есть 200 В, а нам нужно получить 220 В на выходе, кажется логичным просто сформировать источник напряжения в 20 В из той же сети и «сложить» его с входным напряжением, чтобы получить нужное. Такой источник должен отдавать тот же ток, что и потребляет нагрузка, но напряжение на его выходе меньше в 10 раз, и потому, используя мощность всего 1 кВт, можно выполнять стабилизацию напряжения в пределах  $\pm 10\%$  для потребителя 10 кВт. Собственно, все старые системы стабилизации, кроме феррорезонансного стабилизатора, так и работают — вольтодобавку (переключаемую) обеспечивает в них автотрансформатор с отводами (в сервоприводном, строго говоря, тоже — только там отводы от каждого витка). Но все это хорошо для узкого диапазона стабилизации. Если же нужно стабилизировать от 90 В, то «добавка» уже составит 130 В, а экономия станет призрачной. Есть еще и другие способы, но мы на этом ограничимся.

Попытки реализации «вольтодобавки» — следствие желания теми же средствами получить большую выходную мощность. Но проблемы съедают выигрыш, поэтому неоднократные и даже успешные попытки создать такие приборы (даже сейчас в Украине можно найти как минимум решения от двух разных производителей) на рынке массового успеха не имели.

Большинство из тех решений, которые все же на рынок попали, всю входную мощность пропускают через себя, преобразовывают, иногда заново «нарезают» синус 220 В 50 Гц из предварительно выпрямленного напряжения, иногда правят «прямо на лету», сглаживают и подают на выход — блюдо готово. Но и они это по-разному делают, потому опишем самую успешную реализацию, которая победила на данный момент и, возможно, так и останется преобладающей.



**Рис. 3.** Схема преобразования Single-Phase Three-Leg Converter на основе шести ключей

### Три ноги, шесть ключей, две катушки — что это?

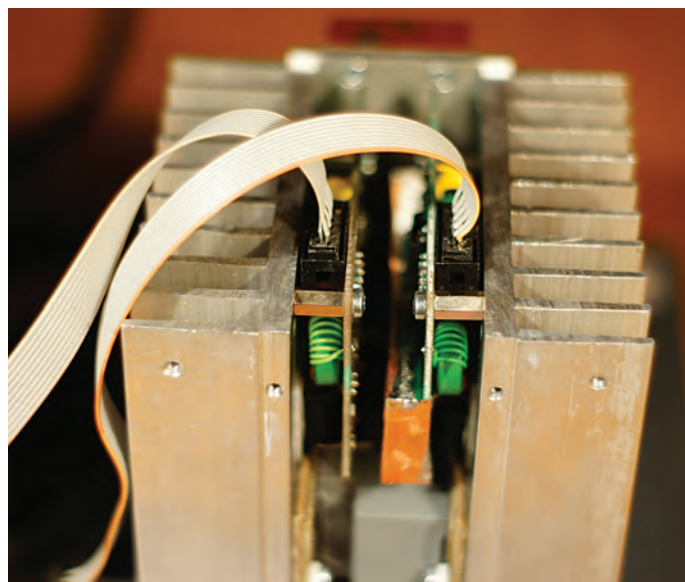
По-английски эта давно известная схема имеет дивное название Single-Phase Three-Leg Converter (**рис. 3**).

На приведенной схеме левая пара ключей «а» повышает напряжение. В зависимости от алгоритма может либо работать как корректор мощности (Power Factor Corrector, PFC) и накапливать выпрямленное напряжение в конденсаторе  $C_1$ , либо просто на лету исправлять напряжение сети по точкам, повышая его по потребности как в «матричном преобразователе».

Правая пара ключей — понижающая. Если левая использована как PFC и  $C_1$  — накопитель из расчета 1 мкФ на 1Вт выходной мощности, то правая пара «b» просто «нарезает» из напряжения на  $C_1$  синхронное с сетью напряжение (обязательно синхронное, это особенность структуры), но уже свое, исправляя искажения в сети. Можно и просто на лету, при малой  $C_1$  по точкам понижать напряжение правыми ключами «b», если оно повышенное, на это время переводя левые ключи «а» в режим пропуска «насквозь».

Средняя группа имеет особую функцию — в зависимости от полярности входного напряжения с каждым полупериодом включает остальные две группы ключей в режим преобразования либо положительного, либо отрицательного напряжения.

И это переключение все время меняет ключи ролями — когда один из них подает на нагрузку напряжение, второй отводит лишний ток на землю. Потому если хотя бы один ключ выйдет из строя, то уже в следующем полупериоде сгорят оба, спасая нагрузку от перенапряжений — примерно как мертвая клетка организма сама себя разлагает, чтобы не мешать живым.



**Рис. 4.** Силовой модуль стабилизатора с двойным преобразованием и ШИМ, выполненный на IGBT-транзисторах, установленных на мощных радиаторах

Эта структура позволяет получить КПД стабилизатора по крайней мере 97% на обычных быстрых IGBT-ключях (именно на них выполнена схема стабилизатора Etalon), так как не использует ключей переменного тока, потери в которых вдвое больше, а количество ключей в цепи до нагрузки — то же самое. Etalon выполнен по схеме с отсутствием преобразования в постоянное напряжение, корректирует  $U_{вх}$  по точкам прямо на лету, в том числе и исправляя форму, снижая искажения и постоянную составляющую, если она есть.

Название Etalon, раскрывает, впрочем, некую загадку — в каждой точке напряжение входа сравнивается с тем, каким оно должно быть, т.н. «эталонным», и корректируется тут же, с опережением, так как измеряется именно вход, а выход только дает поправку на нагрузочный ток.

С выпрямлением и накоплением энергии в емкости выпускаются относительно маломощные стабилизаторы до 6 кВт. В качестве примера можно привести решение компании «Леотон» (Киев) на 300 Вт.

Интересно, что для реализации данной структуры годятся шестиключевые модули IGBT для частотных преобразователей, широко представленные на рынке — от устройств Semikron и Toshiba до продукции (на любую мощность) менее известных производителей. Причем это полностью готовое решение.

*Если проблемы новые — то и решения не могут быть старыми. А в число обязанностей производителя перед потребителем в том числе входит и модернизация, и, если нужно, — новые разработки, чтобы решать эти проблемы.*

**Сергей ИГОЛКИН,**  
разработчик силовой электроники