

## ХАРАКТЕРИСТИКИ И СТРУКТУРА СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОДНОГО КЛАССА СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

С. И. ВОЛКОВ, И. Ф. КАЛИНИН

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры электрооборудования)

Для питания различных приемников переменного тока небольшой мощности стали применяться полупроводниковые преобразователи вместо вращающихся. Преобразователи этого типа, как обычно, регулируемые или стабилизированные. Для оценки основной характеристики источников переменного тока — точности регулирования выходного напряжения статических преобразователей — не существует общепринятых методов, так как последняя зависит от целого ряда факторов: напряжения задатчика —  $U_з$ , входного напряжения —  $U_{вх}$ , тока нагрузки —  $I_{н}$ , температуры окружающей среды и элементов самого регулятора и т. д. Влияние изменения задающего напряжения, входного напряжения и тока (напряжения) нагрузки характеризуется статической ошибкой разомкнутой системы регулирования

$$\Delta U = \left( \frac{\Delta U_з}{U_з} + \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} + \frac{\Delta U_{н}}{U_{н}} \right) 100\%,$$

где  $U_з$ ,  $U_{вх}$ ,  $U_{н}$  — номинальные значения задающего напряжения, входного напряжения и напряжения нагрузки соответственно;

$\Delta U_з$ ,  $\Delta U_{вх}$ ,  $\Delta U_{н}$  — соответствующие изменения задающего напряжения, напряжений входа и нагрузки.

Основным параметром стабилизированных источников питания переменного тока является коэффициент стабилизации

$$K_c = \frac{\frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} + \frac{\Delta U_{н}(I_{н})}{U_{н}}}{\frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}}},$$

где  $U_{вых}$  и  $\Delta U_{вых}$  — номинальное значение и диапазон изменения выходного напряжения.

Коэффициент стабилизации является безразмерной величиной, определяющей, во сколько раз относительное изменение выходного напряжения меньше относительного возмущения воздействия. Следует иметь в виду, что коэффициент стабилизации определяет стабильность выходного напряжения в тех случаях, когда схема стабилизатора не

обладает инерционностью. В большинстве схем стабилизаторов статических преобразователей имеются инерционные элементы (фильтры, дроссели, трансформаторы). Такие стабилизаторы пропускают быстрые изменения питающего напряжения и другие возмущающие воздействия. Характеризовать свойства подобных схем стабилизаторов коэффициентом стабилизации можно лишь в том случае, если по условиям изменения они должны поддерживать среднее значение напряжения, а толчки напряжения питания и другие возмущения не имеют существенного значения. Для стабилизаторов статических преобразователей понятие коэффициента стабилизации теряет свой смысл также и потому, что последний настолько велик, что нестабильность выходного напряжения не зависит от ряда других факторов.

Весьма важными характеристиками регуляторов статических преобразователей являются динамические параметры: постоянная времени ( $\tau_p$ ), время отработки скачка ( $t_p$ ), величина перерегулирования ( $\sigma$ ), динамическая точность ( $\delta$ ), степень устойчивости ( $\eta$ ) системы автоматического регулирования при скачкообразном изменении напряжения питания, точка нагрузки и других возмущающих воздействий. Таким образом при расчете и исследовании регуляторов напряжения статических преобразователей должны быть заданы:

- номинальная выходная мощность,  $S_{\text{ва}}$ ;
  - частота выходного напряжения,  $f_{\text{ном}}$ , Гц;
  - номинальное значение выходного напряжения  $U_{2N}$  при стабилизации напряжения или диапазон изменения  $U_{2\text{max}}$ ,  $U_{2\text{min}}$  при регулировании напряжения;
  - номинальное и предельное значения первичного напряжения,  $U_{1N}$ ,  $U_{1\text{max}}$ ,  $U_{1\text{min}}$ ;
  - точность поддержания выходного напряжения в % к номинальному значению напряжения;
  - предельные значения коэффициента мощности и сопротивления нагрузки;
  - допустимый коэффициент искажения формы кривой выходного напряжения;
  - параметры качества переходного процесса;
  - температура окружающей среды.
- Кроме того, необходимо учитывать продолжительность работы регулятора и условия его охлаждения.

Регуляторы выходного напряжения статических преобразователей можно классифицировать по различным признакам: по назначению, по принципу действия, по роду регулируемой величины, по точности и мощности регулирования, по методу регулирования и способу воздействия на преобразователь.

По назначению можно различать регуляторы для стабилизированных и регулируемых статических преобразователей. Первые предназначены для питания различных приемников стабилизированным напряжением, вторые — для питания напряжением, регулируемым по произвольному закону. Кроме того, необходимо различать регуляторы, предназначенные для преобразователей с синусоидальной, прямоугольной и ступенчатой формой выходного напряжения; для однотактных, двухтактных и мостовых схем преобразователей однофазного и  $m$ -фазного исполнения.

По принципу действия регуляторы выходного напряжения можно разделить на схемы регулирования по отклонению, схемы регулирования по возмущению и комбинированные схемы. Регуляторы, поддерживающие номинальный уровень выходного напряжения (стабилизаторы), делятся по принципу действия на параметрические, компенсационные и комбинированные (компенсационно-параметрические). Па-

раметрические стабилизаторы строятся на основе нелинейных или управляемых элементов, причем схема включения этих элементов с линейными выбирается так, что при значительном изменении напряжения питания и тока нагрузки преобразователя, выходное напряжение сохраняется в допустимых пределах.

Параметрические стабилизаторы относятся к разомкнутым системам автоматического регулирования и способны обеспечить небольшую точность стабилизации напряжения.

В компенсационных стабилизаторах напряжение на выходе сравнивается с заданным, в результате вырабатывается разностный сигнал, который усиливается и воздействует на исполнительный элемент стабилизатора. Компенсационные стабилизаторы представляют собой замкнутую систему регулирования и обеспечивают высокую точность стабилизации.

По роду регулируемой (стабилизируемой) величины различают регуляторы, поддерживающие по заданному закону среднее, амплитудное либо эффективное значение напряжения на выходе преобразователя.

По точности регулирования можно условно выделить регуляторы: низкой точности (более 5%), средней точности (от 3 до 5%), высокой точности (от 1 до 3%) и прецизионные (менее 1%).

По мощности регулирования различают регуляторы малой, средней и большой мощности.

По методу регулирования различают регуляторы с амплитудным регулированием выходного напряжения преобразователя, с широтно-импульсным регулированием на основной частоте и широтно-импульсным регулированием на повышенной частоте модуляции.

В случае амплитудного метода регулирования, на входе (выходе) преобразователя используется вольтодобавочный преобразователь (активный исполнительный орган) либо дополнительный регулирующий (исполнительный) орган, выполненный на полную мощность нагрузки.

Широтно-импульсный метод регулирования выходного напряжения преобразователя осуществляется путем особого построения схемы управления выходным каскадом. Сущность этого метода состоит в изменении длительности паузы между импульсами напряжения на нагрузке.

По способу включения исполнительного органа различают регуляторы, воздействующие на выход, вход и цепи запуска усилителя мощности преобразователей. К первой группе относятся схемы амплитудных регуляторов, исполнительным органом которых являются различного рода подмагничиваемые дроссели, трансформаторы и автотрансформаторы.

На рис. 1 показаны примеры включения исполнительных органов регуляторов, воздействующих на выходные цепи преобразователей. Простейшим из них является включение в линию между входом и выходом регулятора активного управляемого сопротивления (рис. 1, а). Падение напряжения на этом сопротивлении автоматически регулируется с помощью управляющего сигнала. Иногда регулируемое сопротивление включается в линию через согласующий трансформатор  $T_r$  (рис. 1, б), который одновременно является и разделительным. В качестве регулируемого сопротивления используются мощные транзисторы, тиристоры и дроссели, управляемые постоянным током.

На рис. 1, д показана схема включения на выходе преобразователя вольтодобавочного трансформатора ВДТР, напряжение на вторичной обмотке которого добавляется (или вычитается) к выходному напряжению преобразователя.

Широко распространенные схемы регуляторов, воздействующих на выходные цепи преобразователя, строятся по элементной схеме рис. 2, а.

Регуляторы напряжения, воздействующие на цепи питания преобразователя, строятся по схеме рис. 2, б. В цепь питания статического преобразователя включается мощный транзистор, работающий в ре-

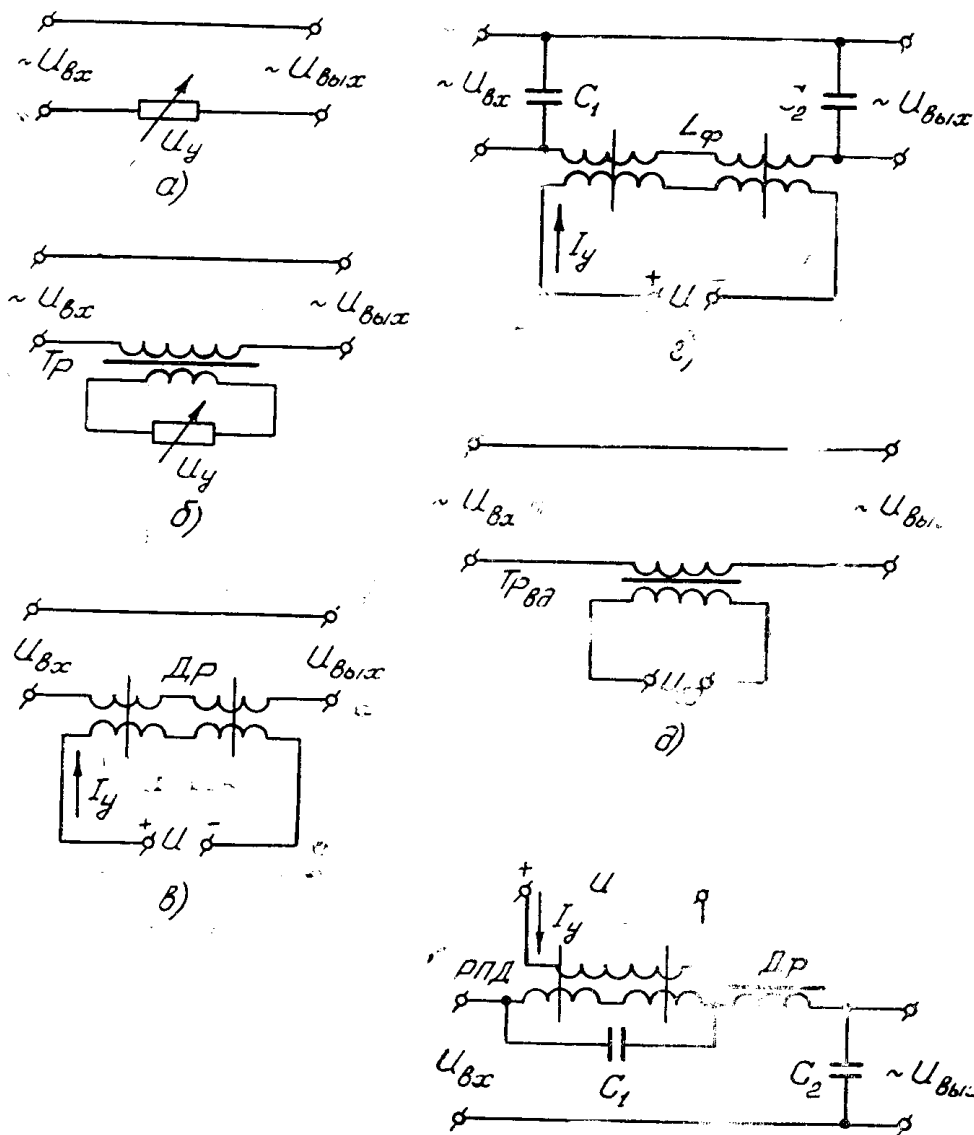


Рис. 1. Схемы включения исполнительных органов регуляторов с воздействием на выходные цепи преобразователя

жиме «ключа» и управляемый широтно-импульсным модулятором. Величина пульсаций регулируемого напряжения питания зависит от тока нагрузки и скважности. Среднее напряжение питания преобразователя в этом случае определяется выражением [1]

$$U_{нсп} = U_n \frac{t_{в}}{t_{в} + t_{п}},$$

здесь  $t_{в}$  — время включенного состояния ключа,  
 $t_{п}$  — время паузы.

В схеме рис. 2, в регулятор осуществляет вольтодобавку к напряжению питания основного источника. Напряжение питания статического преобразователя складывается из входного напряжения и напряжения вольтодобавки

$$U_n = U'_n \pm U_{вд.}$$

На рис. 2, *г* вольтодобавочный преобразователь является нагрузкой усилителя, скважность импульсов которого, а следовательно, и величина фильтрованного напряжения, питающего вольтодобавочный преобразователь, зависят от сигнала задающего органа регулятора. Транзисторы

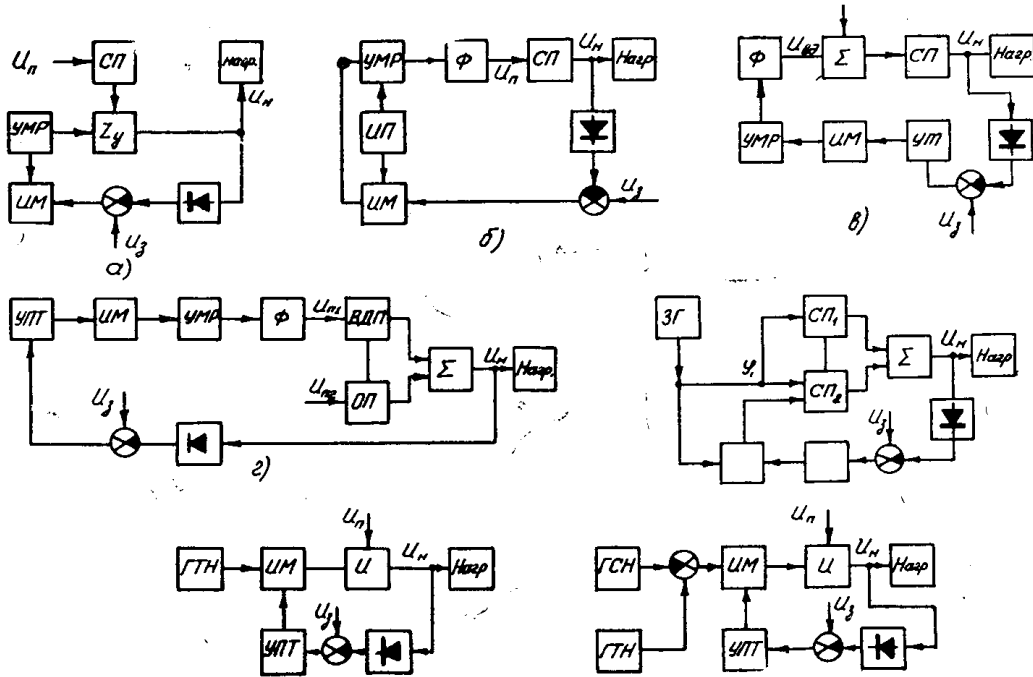


Рис. 2. Элементные схемы САР выходного напряжения преобразователей: ЗГ — задающий генератор; ГТН — генератор треугольного напряжения; ГСН — генератор синусоидального напряжения; СП — статический преобразователь; ИМ — импульсный модулятор; УПТ — усилитель постоянного тока; УМР — усилитель мощности регулятора; ИП — источник питания; ОП — основной преобразователь; ВДП — вольтодобавочный преобразователь; Ф — фильтр; И — инвертор; ФСУ — фазосмещающее устройство;  $Z_y$  — управляемое реактивное сопротивление

вольтодобавочного преобразователя управляются прямоугольным напряжением  $U_y$ , снимаемым с дополнительных обмоток трансформатора основного преобразователя.

При регулировании напряжения с помощью вольтодобавочного преобразователя выходные обмотки трансформатора дополнительного преобразователя соединены последовательно с выходными обмотками трансформатора основного преобразователя, в результате выходные напряжения основного и дополнительного преобразователей складываются

$$U_2 = U'_n + U''_n.$$

По элементной схеме рис. 2, *е* строятся регуляторы напряжения с фазоимпульсной модуляцией. Выходное напряжение преобразователя  $U_2$  в этом случае зависит от сдвига фаз напряжений СП1 и СП2

$$U_{2cp} = \frac{\pi - (\varphi_1 - \varphi_2)}{\pi} U_m,$$

где  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  — угол сдвига фазы регулируемого сигнала.

Исполнительным органом в подобных системах регулирования является выходной трансформатор преобразователя либо управляемый инвертор. Простые и надежные схемы регуляторов, осуществляющих воздействие на выходные цепи преобразователя обладают существенными недостатками: 1) большой вес и, как следствие, значительные потери в стали и меди исполнительного органа; 2) трудность регулирования напряжения при малых и несимметричных нагрузках; 3) искаженные формы кривой выходного напряжения при насыщении магнитного элемента.

Схемы регуляторов, воздействующих на вход преобразователя, создают значительные пульсации на стороне источника питания. При постановке фильтров по питанию увеличиваются габариты и вес регулятора. Регуляторы на основе вольтодобавочного преобразователя отличаются большими габаритами и весом по сравнению с одним регулируемым преобразователем, выполненным на полную мощность нагрузки.

Следует заметить также, что глубина регулирования напряжения в схемах с различного рода подмагничиваемыми дросселями и трансформаторами находится в прямой зависимости от веса и габаритов этих исполнительных органов. Несколько лучшими характеристиками обладает схема фазоимпульсного регулятора. Подобная схема значительно упрощается при применении инвертора с обратной связью.

В настоящее время успешно развиваются широтный и широтно-импульсный методы регулирования выходного напряжения преобразователей. При этих методах регулирующее воздействие осуществляется по цепям запуска усилителя мощности преобразователя. Сущностью широтного метода является регулирование длительности импульса за полупериод.

Однако глубокое регулирование напряжения фазовым и широтным методами неэкономично, так как выходное напряжение содержит значительный процент гармоник. Применение же при глубоком регулировании фильтров для подавления гармонических составляющих усложняет преобразователь, увеличивает его вес и значительно снижает к. п. д. системы.

При небольшом диапазоне регулирования напряжения, а также при стабилизации выходного напряжения фазоимпульсный и широтный методы регулирования достаточно эффективны: они позволяют резко уменьшить габариты и вес преобразователя. Кроме того, фазоимпульсный и широтный методы при наличии фильтров на выходе позволяют эффективно стабилизировать выходное напряжение в широком диапазоне изменения напряжения питания и тока нагрузки преобразователя.

При широтно-импульсном методе регулирования изменяется длительность паузы между импульсами напряжения на нагрузке. Этот метод основан на сравнении симметричного треугольного напряжения несущей частоты с эталонным синусоидальным напряжением выходной частоты. В результате образуется серия импульсов равной высоты, длительность которых пропорциональна интегралу синусоиды.

Таким образом можно осуществить широтно-импульсную модуляцию выходного напряжения по синусоидальному закону при полном исключении высших гармоник. Данный способ воздействия позволяет упростить силовую часть преобразователя за счет совмещения функций преобразования и регулирования напряжения в одном устройстве.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О. И. Хасеев. Транзисторные преобразователи напряжения и частоты. «Наука», М., 1966.
2. Вл. Бунаков и Р. Г. Гаспаров. Полупроводниковые регуляторы напряжения и частоты электрических машин. «Энергия», М., 1966.
3. А. М. Бамдас и С. В. Шапиро. Стабилизаторы с подмагничиваемыми трансформаторами. «Энергия», М., 1965.