

Способы синхронизации частоты преобразования современных ВИП

А. А. Миронов

Рассматриваются требования, особенности работы и схемы синхронизации частоты импульсных преобразователей с ШИМ-контроллерами. Описываются алгоритмы работы и технические решения, стабилизирующие работу преобразователей, расширяющие их функциональные возможности.

Режим синхронизации частоты импульсного преобразователя известен и используется, пожалуй, со времени появления самого преобразователя. Когда, например, появились первые телевизоры, питающиеся от импульсных вторичных источников питания (ВИП), последние синхронизировались сигналом генератора строчной развертки, работающего на частоте 15,625 кГц. Причём, переключение силового ключа ВИП происходило во время обратного хода луча, который в это время гасился. Таким способом, по замыслу разработчиков, можно было избежать помех на экране телевизора.

Синхронизация частоты преобразования ВИП и сейчас позволяет решить множество проблем. Возьмём, к примеру, параллельную работу ВИП на выходе. Такое включение применяют, разрабатывая системы вторичного электропитания (СВЭП) большой мощности. Дело в том, что отдельные ВИП даже одного и того же типа имеют немного отличающиеся друг от друга частоты преобразования. ВИП работают каждый на своей частоте, и в осциллограмме пульсации выходного напряжения будут иметь место низкочастотные составляющие разностной частоты и увеличенной амплитуды. На **рис. 1** показана осциллограмма пульсаций выходного напряжения двух ВИП ООО "АЭИЭП" типа МДМ240-1Е27ВП (выходная мощность 240 Вт, входное напряжение 9...36 В, выходное напряжение 27 В), соединённых на выходе параллельно. Несмотря на то, что ВИП работают на частоте около 200 кГц, в пульсации выходного напряжения превалирует низкочастотная составляющая с разностной частотой 2,7 кГц. При большом количестве параллельно соединённых ВИП будет иметь место пик-фактор – выброс в пульсации выходного напряжения в непрогнозируемый момент времени, когда выходные пульсации отдельных преобразователей оказываются в одной фазе [1].

На **рис. 2** показана осциллограмма выходного напряжения тех же преобразователей, силовые ключи которых включаются синхронно.

Низкочастотная составляющая пульсации выходного напряжения исчезла, амплитуда пульсаций уменьшилась в несколько раз.

Классифицируя способы синхронизации, их условно можно разделить на два типа:

- I тип - с внутренне генерируемым синхросигналом;
- II тип - с внешним сигналом синхронизации.

Применение того либо другого способа синхронизации определяется возможностями используемого ШИМ-контроллера и требо-

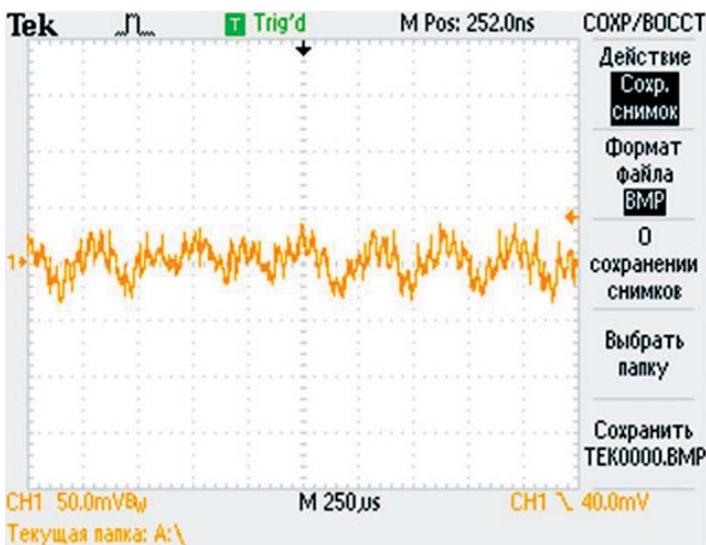


Рис. 1. Пульсации выходного напряжения двух параллельно включённых импульсных преобразователей, работающих без синхронизации частоты преобразования.

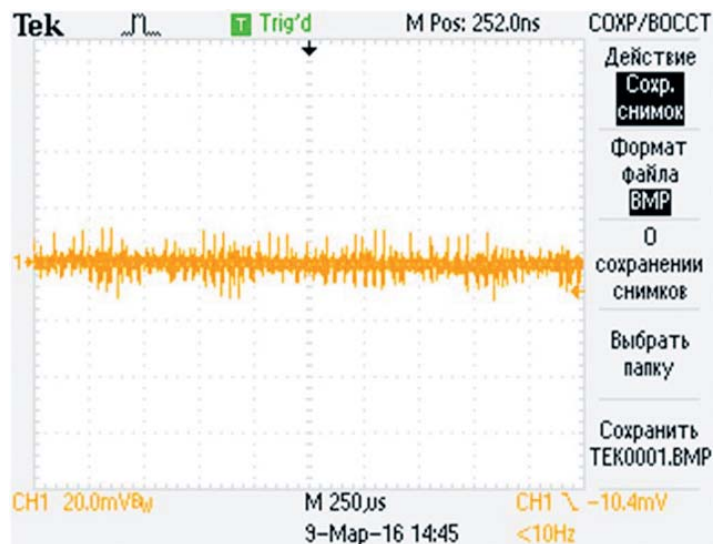


Рис. 2. Пульсации выходного напряжения двух параллельно включённых импульсных преобразователей, работающих с синхронизацией частоты преобразования.

ваниями технического задания. Рассмотрим наиболее популярные способы реализации режима с внутренне генерируемым сигналом синхронизации, их особенности и схемотехнику. Следует заметить, что синхронизация I типа всегда предполагает наличие "главного", ведущего ВИП и "второстепенных" - ведомых.

ШИМ-контроллеры первых поколений типа UC1842-5 (1114EУ7-10) вообще не имеют специального входа для подачи сигнала синхронизации [2]. Точку подключения этого сигнала необходимо получать искусственно - добавлением в схему дополнительных элементов. Простое схемотехническое решение для подачи синхросигнала показано на **рис. 3**.

Наилучшим образом для этого подходит сигнал прямоугольной формы. Окончание интервала открытого состояния силового ключа ШИМ-контроллера совпадает с передним фронтом очередного импульса. Сигнал дифференцируется элементами C и R, а диод VD отсекает отрицательную его полуволну. Синхросигнал в точке соединения элементов СТ и R представляет собой короткий импульс положительной полярности, заканчивающий интервал открытого состояния силового ключа. Прямоугольного вида сигналы для синхронизации I типа наиболее удобны – они всегда использу-

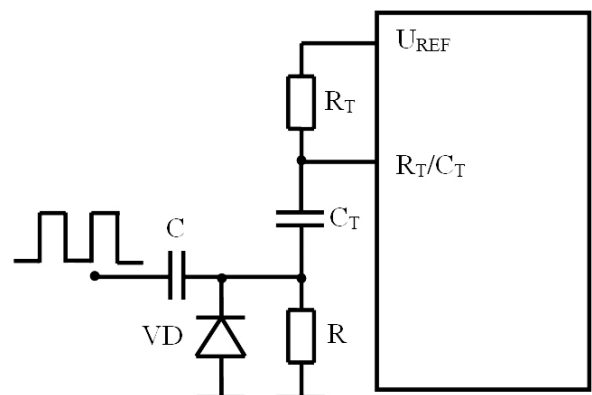


Рис. 3. Способ подачи синхросигнала для ШИМ-контроллеров, не имеющих специального входа синхронизации.

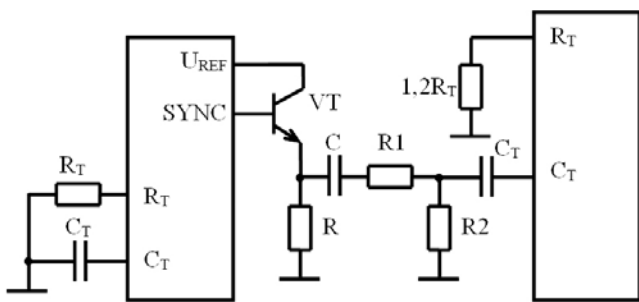


Рис. 4. Схема подачи синхроимпульса ВИП, у каждого из которых установлена собственная частота преобразования.

ются для управления силовыми ключами соседних ВИП. Но таким же способом подаётся и внешний синхросигнал.

Более "продвинутые" микросхемы ШИМ-контроллеров типа UC1825 (1156EY2) уже имеют специальный вход синхронизации, но также требуют дополнительных элементов для реализации этого режима [3]. Синхросигнал, вырабатываемый ШИМ-контроллером, представляет собой короткий импульс положительной полярности. На рис. 4 и рис. 5 представлены различные схемы реализации сигналов синхронизации I типа. Отличие состоит в том, что все ВИП на рис. 4 могут в отсутствие синхронизации работать на собственной рабочей частоте преобразования, чуть более низкой по сравнению с частотой ведущего ВИП. Синхронизируемые ВИП на рис. 5 не имеют частотозадающих элементов, устанавли-

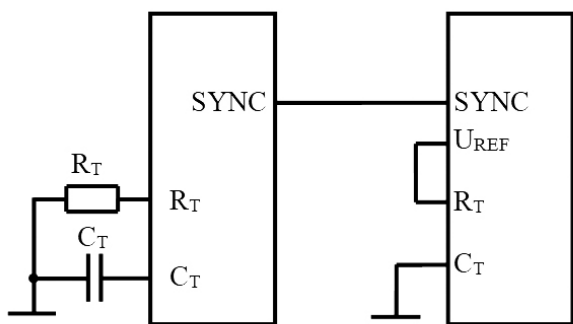


Рис. 5. Схема подачи синхроимпульса от ведущего ВИП ведомым, у которых не установлена собственная частота преобразования.

вающих собственную рабочую частоту и работать без синхронизации вообще не могут.

При подаче питания ВИП включаются в разное время. Каждый из ведомых ВИП, включённый по схеме рис. 4, сначала начинает работать на собственной частоте преобразования. После включения ведущего ВИП ведомые устанавливают частоту ведущего. Каждый из ведомых ВИП, включённый по схеме рис. 5, включается в работу после включения ведущего.

Современные ШИМ-контроллеры продвинулись в этом вопросе дальше [4]. Вывод синхронизации зачастую используется и как вход синхросигнала, и как выход сигнала, который можно использовать для синхронизации I типа ВИП с аналогичными ШИМ-контроллерами без дополнительных элементов.

Для этого выводы синхронизации просто объединяют, как показано на рис. 6.

При подаче напряжения питания по очереди включаются все синхронизируемые ВИП. Через несколько периодов работы ведущим автоматически становится ВИП, работающий на более высокой частоте преобразования.

Общими требованиями для рассмотренных способов синхронизации I типа являются:

- наличие "обвязки" из дополнительных элементов;

- наличие "ведущего" ВИП, частота преобразования которого априори больше частоты "ведомых" ВИП;

- температурный и временной дрейф параметров синхронизации;

- повышенная чувствительность связки ВИП к помехам по каналу синхронизации;

- гальваническая связь "земли" синхросигнала с "землёй" ШИМ-контроллера и практически всегда – с "силовой землёй" ВИП, что является дополнительным источником помех каналу синхронизации.

Последнее условие предъявляет жёсткие требования к конструкции и трассировке плат ВИП и практически ограничивает количество синхронизируемых ВИП на уровне трёх и менее.

Существенно снизить жёсткость перечисленных выше требований помогает синхронизация II типа - внешним синхросигналом. В этом случае все синхронизируемые ВИП становятся ведомыми. Стабильность параметров синхросигнала определяется исключительно внешним генератором. А схему подачи синхросигнала можно выполнить таким образом, чтобы подключить "землю" синхросигнала к сигнальной "земле" ШИМ-контроллера, что снимает проблему наведения помех по каналу синхронизации. Ослабляются требования к трассировке платы ВИП. И уж коль добавляются дополнительные элементы, они должны снять, по возможности, все потенциальные проблемы, такие как, например, некорректные синхросигналы как по частоте, так и по амплитуде. Открываются возможности синхронизации связки ВИП многофазным синхросигналом, позволяющей значительно уменьшить амплитуду пульсаций выходного напряжения и входного тока.

В [5] предложена схема построения узла синхронизации (УС) II типа, отвечающая самым жёстким требованиям и способная работать с неограниченным количеством синхронизируемых ВИП, обеспечивающая не только надёжную работу ВИП, но и защищающая их от некорректных входных синхросигналов. Структурная схема УС показана на рис. 7.

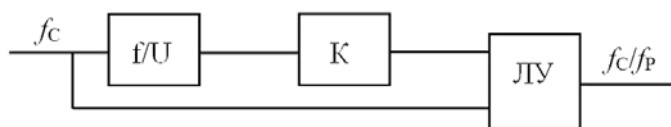


Рис. 7. Структурная схема устройства синхронизации II типа.

Преобразователь с предлагаемым УС работает в двух режимах:

1. работа на собственной частоте преобразования при отсутствии корректного управляющего сигнала на входе синхронизации;
2. работа на частоте управляющего сигнала при наличии корректного управляющего напряжения на входе синхронизации.

Под корректным сигналом понимается сигнал заданной амплитуды, формы и допустимого диапазона частот. При выполнении этих условий узел синхронизации работает следующим образом. Управляющий сигнал поступает на вход преобразователя "частота-напряжение" f/U . Статическая передаточная характеристика преобразователя f/U графически выглядит так, как показано на рис. 8.

Она может быть линейная либо нелинейная (выпуклая, вогнутая). Требование одно – она должна быть однозначная и стабильная, не изменяющая свои характеристики от температуры, напряжения питания и пр. С увеличением частоты управляющего сигнала пропорционально увеличивается выходное постоянное напряжение преобразователя f/U . Выходное напряжение преобразователя поступает в узел компараторов К для определения частоты управляющего сигнала. Компараторы настроены на 2 значения напряжения:

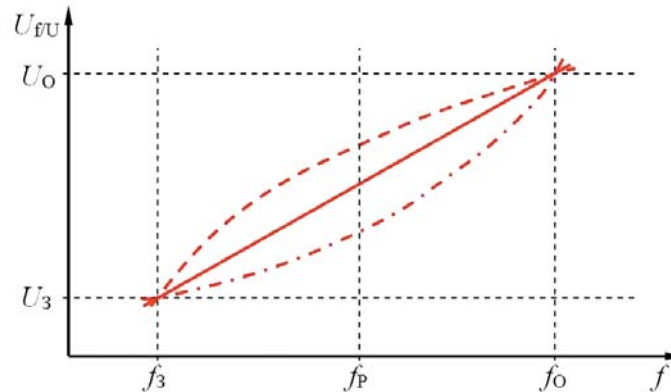


Рис. 8. Статическая передаточная характеристика преобразователя f/U .

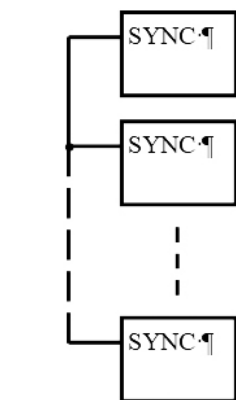


Рис. 6. Синхронизация I типа ВИП с ШИМ-контроллером типа LM5026.

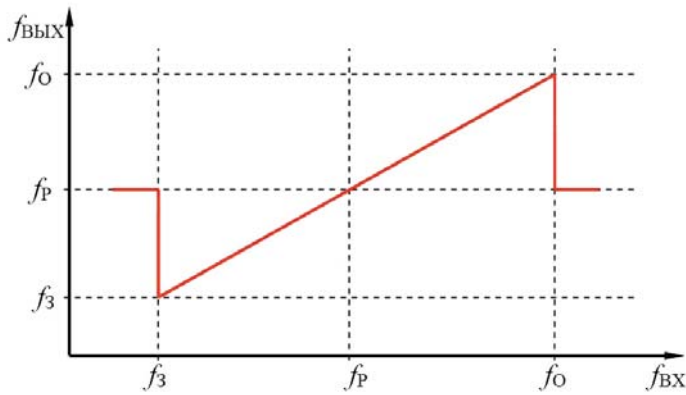


Рис. 9. Статическая передаточная характеристика УС.

меньшее по значению напряжение – напряжение захвата U_3 – соответствует минимальному значению частоты f_3 допустимого диапазона внешнего синхронизирующего сигнала; большее по значению напряжение – напряжение отпущения U_0 – максимальному значению частоты f_0 допустимого диапазона сигнала.

Сигналы с выходов компараторов К обрабатываются логическим устройством ЛУ, на вход которого приходит, в том числе, и управляющий синхросигнал. Если его частота находится в допустимом диапазоне, на выход ЛУ проходит напряжение с частотой синхронизации f_c внешнего сигнала, которое подаётся на вход синхронизации ШИМ-контроллера. Если частота синхронизирующего сигнала находится вне допустимого диапазона, выход ЛУ блокируется, и ШИМ-контроллер работает на собственной рабочей частоте преобразователя f_p , находящейся примерно в середине диапазона $f_3 \dots f_0$. Описанный алгоритм гарантирует работу преобразователя в ограниченном, разрешённом разработчиком, "корректном" диапазоне частот. Результирующая статическая передаточная характеристика УС с учётом описанного алгоритма работы ЛУ представлена на рис. 9.

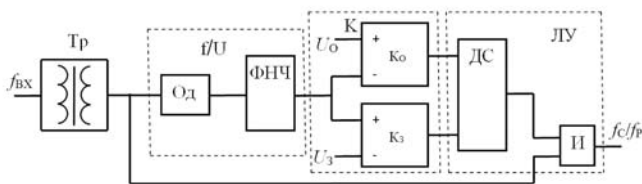


Рис. 10. Функциональная схема УС.

На основе описанного "идеального" алгоритма работы реализовано устройство синхронизации. При практической реализации узлов УС параллельно решались вопросы помехоустойчивости. На рис. 10 показана функциональная схема УС, где это обстоятельство нашло отражение.

Входной управляющий сигнал полезно подавать через развязывающий трансформатор Тр. Это позволит, если потребуется, заземлить нужный вход синхронизации в нужной точке и исключить помехи от силовых цепей. Кроме того, трансформатор позволяет при необходимости просто форматировать и инвертировать сигнал. Входной сигналом служит переменное напряжение прямоугольной формы.

Преобразователь "частота-напряжение" реализован на основе одновибратора Од с триггером Шмитта на входе. Наличие гистерезиса повышает "прямоугольность" и устраняет шумовую составляющую входного сигнала. Сигналы на выходе триггера либо нормализованы по амплитуде и форме, либо отсутствуют.

На выход Од подключен фильтр низкой частоты ФНЧ. Каждый передний фронт сигнала на входе Од запускает его. Длительность импульса на выходе Од всегда постоянна. Импульсы с выхода Од поступают в ФНЧ, где сигнал интегрируется и сглаживается. На выходе ФНЧ действует постоянное напряжение U_{fv} , определяемое из выражения:

$$U_{fv} = U_{од} \times K_3,$$

$$K_3 = t_n \times f_c, \text{ где}$$

- $U_{од}$ – выходное напряжение Од во время импульса tI ;

- K_3 – коэффициент заполнения;

- t_n – длительность импульса на выходе одновибратора Од;

- f_c – частота сигнала синхронизации.

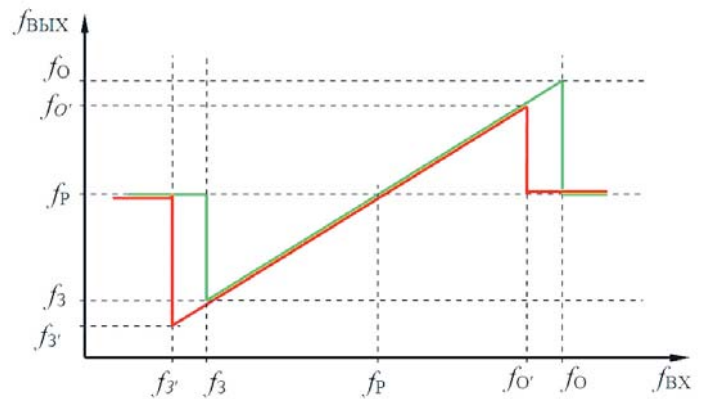


Рис. 11. Реальная статическая передаточная характеристика УС.

Поскольку длительность выходного импульса Од всегда постоянна, с ростом частоты f_c увеличивается коэффициент заполнения K_3 и, следовательно, постоянное напряжение на выходе ФНЧ. Сигнал с выхода ФНЧ поступает в узел компараторов К. Для устойчивой работы в зоне пороговых напряжений U_3 и U_0 каждый из них охвачен положительной обратной связью, глубина которой определяет гистерезис в зоне частот входа в режим синхронизации f_3 и выхода из него f_0 . С учётом этого статическая передаточная характеристика УС деформируется и в реальном УС выглядит, как показано на рис. 11.

Работа в УС происходит следующим образом. При увеличении частоты синхросигнала захват в режим синхронизации происходит при частоте f_3 – на графике рис. 11 движение идёт слева направо по траектории зелёного цвета. Если в сигнале присутствует небольшая девиация частоты, это на работе УС не отражается, так как гистерезис компаратора К3 удерживает УС в режиме синхронизации до тех пор, пока изменение (уменьшение) частоты не достигнет значения f_3 . Сигналы на выходах компараторов К3 и К0 декодируются дешифратором ДС логического узла ЛУ так, что разрешается прохождение синхросигнала через элемент И – ШИМ-контроллер преобразователя работает на частоте синхросигнала.

При увеличении частоты синхросигнала выход из режима синхронизации происходит при частоте $f > f_0$. Устройство переходит в режим работы на рабочей частоте f_p независимо от того, что на входе синхронизации присутствует сигнал, корректный по форме и амплитуде, но уже некорректный по частоте. При этом сигналы на выходах компараторов К3 и К0 декодируются ДС так, что блокируется прохождение синхросигнала через элемент И – на выходе УС сигнал устанавливается в состояние, при котором управляемый ШИМ-контроллер преобразователя переходит в режим работы на собственной рабочей частоте.

При уменьшении частоты синхросигнала возврат в режим синхронизации происходит на частоте $f_0' < f_0$, так что небольшая девиация частоты на работу УС также не влияет. Теперь при уменьшении частоты синхросигнала движение на графике рис. 11 будет происходить справа налево по траектории красного цвета. Выход из режима синхронизации произойдёт на частоте $f_3' < f_3$ – на выходе УС сигнал устанавливается в состояние, при котором управляемый ШИМ-контроллер преобразователя переходит в режим работы на собственной рабочей частоте.

На основе описанного алгоритма разработана схема устройства синхронизации и опробована в работе на модулях питания серии МДМ240(480)-ЕП [4]. УС допускает подачу синхросигнала с частотой $f_c = (0,9 \dots 1,1) \times f_p$. За пределами этого диапазона модули питания автоматически переходят в режим работы на собственной рабочей частоте.

Литература

1. А. А. Миронов. "Эволюция технических требований к унифицированным модулям питания". Журнал "Современная электроника" № 6, 2019 г., с. 2 – 5.
2. "Интегральные микросхемы: Микросхемы для импульсных источников питания и их применение". – М., ДОДЭКА, 1997 г., с. 94, 95.
3. Там же, с. 175.
4. Описание микросхемы LM5026 на сайте фирмы TI по адресу: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5026.pdf>, с. 17, 18.
5. А. А. Миронов. "Синхронизация частоты преобразования унифицированных модулей питания внешним синхросигналом". Журнал "Практическая силовая электроника", вып. 3(71), 2018 г., с. 21 – 23.