

П. А. Бак, А. В. Оттмар, Д. А. Старостенко

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия*

aottmar@gmail.com

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ СПОСОБ СИНХРОНИЗАЦИИ ИНВЕРТОРНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

В устройствах, синхронизированных с электрической сетью, и чувствительных к помехам (в частности к наводкам инверторного источника питания) целесообразно синхронизировать с сетью также и источник питания. В работе описан метод синхронизации инверторного источника питания (ИИП) с сетью. Подробно рассмотрены общие аспекты данного метода, а также возможные варианты реализации на аппаратном уровне. Проведен анализ внешних факторов и внутренних параметров, влияющих на качество синхронизации. Приведены результаты практического использования данного метода для синхронизации системы питания накала клистрона.

Ключевые слова: источник питания, синхронизация с электрической сетью, накал клистрона, фазово-сдвиговая модуляция, подавление помех.

Введение

Многие физические экспериментальные установки состоят из устройств, потребляющих большую электрическую мощность и находящихся на значительном удалении друг от друга. В таких условиях на соединительные кабели наводятся помехи, что значительно усложняет выполнение точных измерений сигналов с малыми амплитудами. Для исключения помех и снижения дестабилизирующих факторов, вызванных асинхронностью процессов, выполняют синхронизацию всех процессов установки с фазой электрической сети.

Примером подобной установки являются СВЧ станции проекта European XFEL [1]. Модуляторы клистронов на XFEL запускаются всегда в одной фазе сети. Питание накала клистронов осуществляется переменным током частотой 1 600 Гц от ИИП [2; 3]. В целях исключения нестабильности СВЧ генерации клистрона от импульса к импульсу за счет модуляции магнитным полем накала необходимо обеспечить одинаковую

выходную фазу ИИП в каждом рабочем цикле установки. Поскольку все процессы в установке синхронизованы с электрической сетью, требуется синхронизовать с сетью и ИИП накала клистрона.

Для выбора конкретной схемы синхронизации был проведен анализ существующих решений данной проблемы, но ничего подходящего найти не удалось. В данной работе описывается метод синхронизации инвертора с электрической сетью, разработанный в ходе модернизации ИИП накала клистрона.

Описание метода

Традиционно для синхронизации устройств используют системы с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) (рис. 1). Форма сигнала электрической сети может быть сильно искажена помехами от потребителей и допускает предельное значение отклонения частоты до $\pm 0,4$ Гц (ГОСТ 13109-97). Флуктуации фазы при этом имеют случайный характер и могут достигать ± 160 мкс,

что сравнимо с периодом выходной частоты ИИП (625 мкс). Ошибки фазового детектора (ФД) будут определяться преимущественно флуктуациями фазы сети. Точность синхронизации в этом случае соответствует четверти периода выходной частоты, поэтому использование схемы ФАПЧ для синхронизации ИИП с электрической сетью нецелесообразно.

В описываемом методе частота инвертора постоянна, а для синхронизации с сетью выполняется корректировка фазы. Сигнал с тактового генератора подается на счетчик фазы рабочего цикла инвертора (рис. 2), частота при этом уменьшается пропорционально длине счетчика. Синхронизирующий сигнал формируется синхрогенератором при достижении требуемой фазы электрической сети. По фронту синхронизирующего сигнала сбрасывается счетчик фазы, что эквивалентно началу нового рабочего цикла. Флуктуации фазы синхронизирующего сигнала приводят к незавершенным циклам инвертора, поэтому могут потребоваться дополнительные корректировки следующих за сигналом синхронизации циклов, чтобы обеспечить необходимую точность и защитить силовую часть инвертора от повреждения. Регистр запоминает фазу цикла, прерванного импульсом синхронизации, и используется для дополнительных корректировок. Желательно, чтобы частота генератора была кратной частоте электрической сети (для обеспечения целого числа циклов инвертора в каждом периоде сети), в противном случае к ошибкам синхронизации, связанным с флуктуациями фазы, добавится постоянная составляющая, равная набегу фазы инвертора за период сети.

Практическое использование метода

Рассмотренный в данной работе метод был использован для модернизации ИИП накала клистрона, инвертор которого построен по мостовой схеме (рис. 3) со сдвигофазовым управлением (СФУ) [2]. Контроллер источника выполнен на микроконтроллере (МК) и программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), в которых реализован блок управления и блок СФУ соответственно. Рабочая частота 1 600 Гц (кратность с частотой сети $N = 32$). Добавление синхронизации не оказывает влияния

на управление источником и уровни сигналов обратной связи, поэтому потребовалась доработка только блока СФУ.

На рис. 4. изображены управляющие сигналы (УС1–УС4) транзисторов Т1–Т4 (см. рис. 3) инвертора и обозначены их основные параметры. Интервал T_d защищает транзисторы от протекания сквозных токов. При нулевой фазе Ψ выходная мощность равна нулю, а при фазе, равной половине длительности цикла T , мощность максимальна. Блок управления периодически измеряет выходную мощность и в случае отклонения от требуемого значения корректирует значение фазы. Корректировка равна произведению ошибки на коэффициент ПИ-регулятора и не превышает 1% от максимального значения фазы. Ток через нагрузку

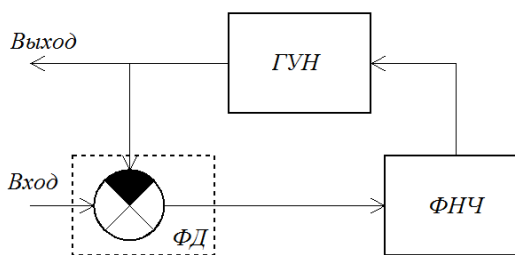


Рис. 1. Блок-схема ФАПЧ

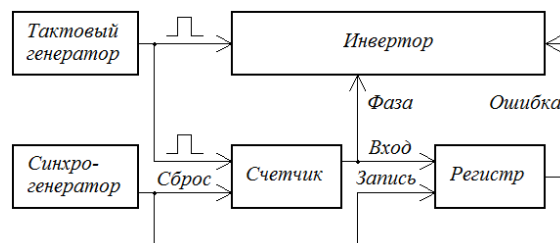


Рис. 2. Блок-схема синхронизации

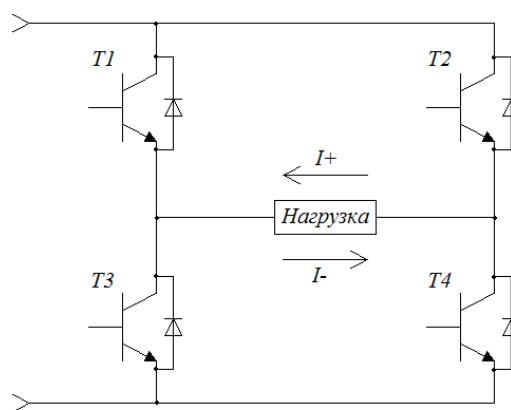


Рис. 3. Схема инвертора ИИП накала клистрона

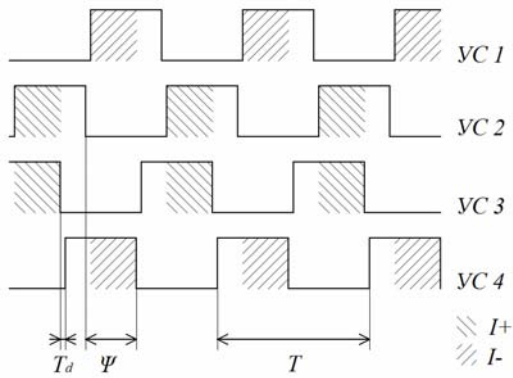


Рис. 4. Управляющие импульсы и их параметры

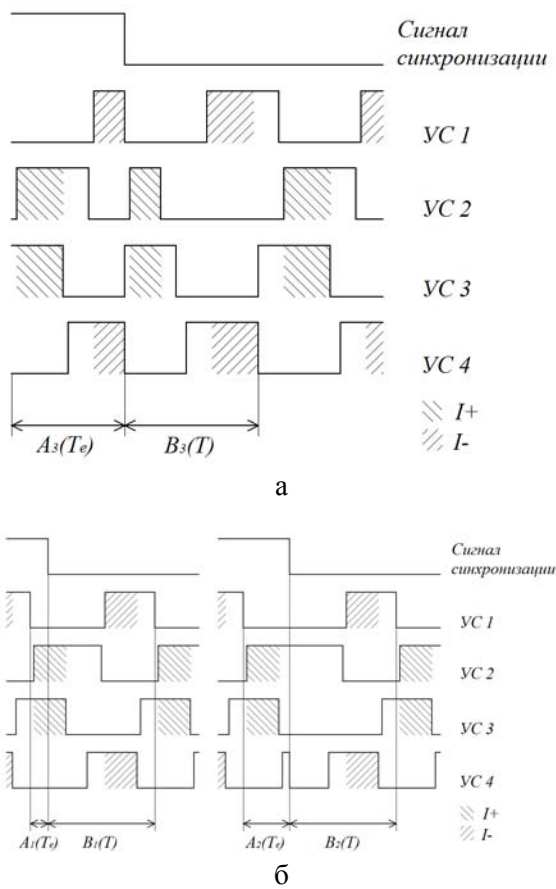


Рис. 5. Форма управляющих сигналов:
а – при $T_e > T/2$; б – при $T_e < T/2$

протекает в прямом направлении I^+ в момент, когда одновременно УС2 и УС3 имеют высокий уровень, и в обратном I^- , когда высокий уровень на УС1 и УС4.

ИИП накала клистрона нагружен на схему последовательного колебательного контура через согласующий трансформатор. Для предотвращения замагничивания магнитопровода согласующего трансформатора

необходимо исключить постоянную составляющую выходного напряжения и ограничить время протекания токов значением $T/2$. Для исключения постоянной составляющей в мостовой схеме инвертора необходимо равенство времени протекания I^+ и I^- . Для выполнения этих условий требуется соответствующая корректировка следующего за сигналом синхронизации цикла.

Ошибка синхронизации T_e вызывает изменение длительности сигналов УС1–УС4. Сначала рассмотрим работу инвертора для значений T_e больше $T/2$ (рис. 5, а). Цикл A_3 укорачивается до величины T_e , что в зависимости от фазы Ψ приводит либо к скачку, либо к просадке выходного напряжения в следующем цикле B_3 . Длительность УС1 в цикле A_3 станет равной $T_e - T/2$, и для обеспечения равенства времени протекания I^+ и I^- длительность УС2 в цикле B_3 устанавливается равной $T_e - T/2$.

Для значений T_e меньше $T/2$ пары циклов A_1 и B_1 (A_2 и B_2) можно рассматривать как один цикл длительностью $T_e + T$ (рис. 5, б). Длительность протекания токов такая же, как и в случае отсутствия искажений (равна Ψ), что приводит к просадке выходного напряжения. Для ошибок $T_e < \Psi$ длительность УС2 в цикле A_1 равняется T_e , поэтому длительность УС3 в начале цикла B_1 устанавливается равной $\Psi - T_e$, суммарное время протекания I^+ составит Ψ . Для ошибок $T_e > \Psi$ время протекания I^+ в цикле A_2 равняется Ψ , поэтому УС3 в начале цикла B_2 не устанавливается.

В алгоритм синхронизации введен параметр Δ – порог синхронизации, который задает разрешенный временной интервал для выполнения синхронизации. При значениях $T_e > \Delta$ и $T_e < T - \Delta$ синхронизация не выполняется. Это условие лимитирует скачки выходного напряжения, но может привести к срывам синхронизации. Время на восстановление синхронизации ограничено сверху T_r :

$$T_r = \frac{T_c}{(T_c - N \times T)} \cdot T_c,$$

где T_c – период электрической сети; N – коэффициент кратности с частотой сети. Величина и количество флуктуаций фазы в сети имеют нормальное распределение. Параметр Δ выбирается равным предельно допустимой флуктуации фазы электрической сети (± 160 мкс по ГОСТ 13109-97).

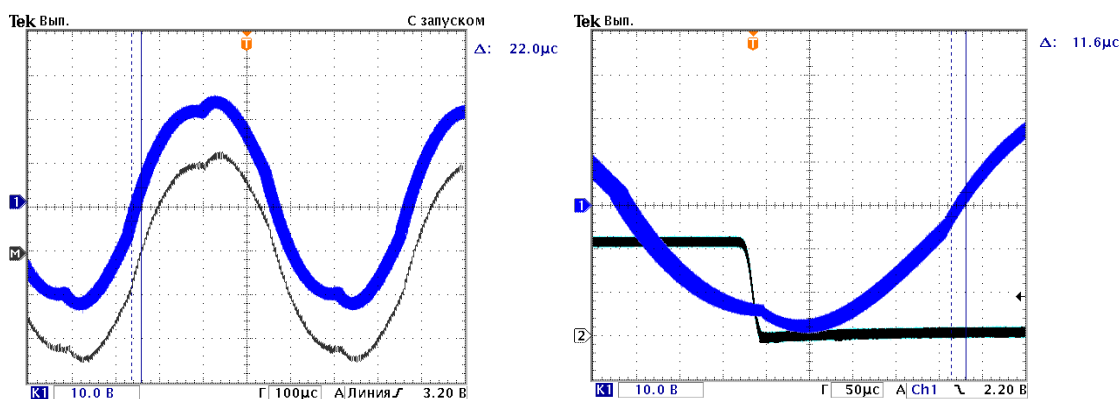


Рис. 6. Работа ИИП на эквивалентную нагрузку:

а – канал 1 – выходное напряжение, накопление измерений в течение 1 часа, канал М – мгновенное значение выходного напряжения, Δ – ошибка фазы; *б* – канал 1 – выходное напряжение, накопление измерений в течение 1 часа, канал 2 – сигнал синхрогенератора, Δ – ошибка фазы

Результаты испытаний

Были измерены флуктуации фазы выходного сигнала ИИП относительно фазы электрической сети. Для этого запуск осциллографа осуществлялся от сети (рис. 6, *а*) и устанавливался режим накопления в течение одного часа. Большой интерес представляют флуктуации фазы в следующих за импульсом синхронизации циклах (мгновенная ошибка), поскольку именно в этот промежуток времени выполняются рабочие процессы всей установки. Флуктуации вызваны искажением формы сигнала в процессе синхронизации, для их наблюдения осциллограф запускали от синхрогенератора (рис. 6, *б*). Все измерения проводились в условиях электрической сети с флуктуациями фазы на уровне 20 мкс (тестовый стенд в ИЯФ СО РАН).

Заключение

В результате модернизации ИИП накала клистрона удалось синхронизовать фазу его выходного напряжения с фазой электрической сети. Интегральная ошибка синхронизации, так же как и в случае использования ФАПЧ, определяется флуктуациями фазы электрической сети (160 мкс). Для практического применения более важна мгновенная ошибка синхронизации, которая и будет регистрироваться измерительным оборудованием. Мгновенная ошибка составляет 12

или 22 мкс для различных вариантов синхронизации ИИП и измерительного оборудования.

Способ синхронизации ИИП с электрической сетью, рассмотренный в данной работе, универсален и подходит для широкого спектра источников. Для ИИП с менее строгими (по сравнению с рассмотренным в работе источником) ограничениями для управляющих сигналов реализация способа значительно упрощается. В одном случае не потребуется выполнять дополнительную корректировку рабочих циклов инвертора, в другом – изменять частоту инвертора для выполнения условия кратности с частотой сети.

В последнее время многие ИИП строятся на основе цифровых управляющих элементов: цифрового сигнального процессора, микроконтроллера, программируемой логической интегральной схемы. Для модернизации таких источников потребуется лишь добавить вход синхронизации и обновить программное обеспечение.

Список литературы

1. The European X-Ray Free-Electron Laser, Technical Design Report / Eds. M. Altarelli et al. DESY 2006-097. 630 p.
2. Bak P., Zabrodin V., Korepanov A., Vogel V. Klystron Cathode Heater Power Supply System Based on the High Voltage Gap Trans-

former // Proc. PAC09. Vancouver, Canada, TU6RFP016.

3. Vogel V., Cherepenko A., Choroba S., Hartung J., Bak P., Korepanov A., Evmenova N. Connection Module for the European X-Ray

FEL 10MW Horizontal Multibeam Klystron // Proc. IPAC'10. Kyoto, Japan, THPEB043.

Материал поступил в редколлегию 10.04.2014

P. A. Bak, A. V. Ottmar, D. A. Starostenko

ALTERNATIVE TECHNIQUE OF INVERTER POWER SOURCE SYNCHRONIZATION

In devices synchronized with electric mains and sensitive to interference (particularly to an inverter power source) it is expedient to also synchronize the power source. The paper describes a method of synchronizing the inverter power supply with the mains. The general aspects of the method are discussed in detail, and possible hardware implementations are considered. External factors and internal parameters affecting the quality of synchronization are analyzed. The results of practical implementation of this method for synchronization of klystron filament power supply are presented.

Keywords: power supply, synchronization with electric mains, klystron filament, phase shift modulation, interference suppression.