

# МНОГОКАНАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК

*В. М. Баяв, С. С. Козюченко, М. В. Кулешов, А. В. Павленко, К. Ю. Павлов*

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург

В настоящее время в мире активно проводятся научные исследования по теме инерциального управляемого термоядерного синтеза. В США, Франции и России создаются крупномасштабные многоканальные лазерные установки, позволяющие с высокой временной точностью доставить энергию к исследуемому образцу [1, 2]. Возникает необходимость в создании распределенных систем управления, которые обеспечат синхронное срабатывание различной технологической и исследовательской аппаратуры на всей площади установки и в ходе работы позволят выдавать запускающие импульсы в программируемые моменты времени. Такие системы принято называть системами синхронизации (timing system).

Сложность задачи построения системы синхронизации для крупных лазерных установок состоит в том, что управляемое оборудование распределено на площади в несколько десятков тысяч квадратных метров. Количество каналов синхронизации может достигать нескольких тысяч штук. Вместе с тем, требуемая точность срабатывания подсистем может составлять единицы пикосекунд. При таких высоких требованиях к точности срабатывания оборудования даже времена распространения сигналов по кабелям становятся существенными. Например, скорость распространения сигналов в оптическом волокне составляет величины порядка 0,2 мм/пс. При современном уровне развития техники указанные требования являются крайне жесткими, и их невозможно выполнить, используя лишь готовое лабораторное оборудование. Ниже описаны несколько возможных вариантов архитектуры системы синхронизации (СС).

Первый вариант архитектуры системы синхронизации показан на рис. 1. Все оборудование системы сконцентрировано в одном электронном блоке. Сигналы запуска для всего оборудования установки генерируются одновременно в виде электрических импульсов и, при необходимости, задерживаются. Затем электрические сигналы преобразуются в оптические и доставляются к оборудованию установки по оптическим волокнам. Время прихода управляющего импульса в каждом канале синхронизации определяется временем распространения по тракту электрооптических преобразователей и оптических кабелей.

При таком варианте построения системы синхронизации важным обстоятельством является то, что время распространения световых импульсов по оптическому волокну зависит от внешних факторов, например, температуры окружающей среды, и может неконтролируемо меняться, нарушая исходные уставки. Возможность настройки времени срабатывания на работающей физической установке существенно затруднена, поскольку в системе нет возможности проконтролировать и измерить фактическое время прихода сигналов синхронизации на оборудование установки.



Рис. 1. Первый вариант архитектуры системы синхронизации

Второй вариант архитектуры системы синхронизации показан на рис. 2. Чтобы обеспечить возможность тонкой настройки времени запуска «по месту» часть устройств системы синхронизации переносится ближе к управляемому оборудованию. Система синхронизации в этом варианте построения является распределенной. Основной блок системы синхронизации генерирует все управляющие сигналы одновременно. Это сильно упрощает его внутреннюю структуру. Сигналы синхронизации доставляются к оборудованию установки по волоконно-оптическим кабелям, где могут быть дополнительно задержаны с помощью генераторов задержки.

Преимущество такой структуры системы синхронизации состоит в возможности оперативно изменять время срабатывания оборудования установки. Недостаток, как и в первом варианте, состоит в отсутствии обратной связи, то есть невозможности проконтролировать и измерить фактическое время прихода сигналов управления на оборудование установки, распределенное по ее площади.

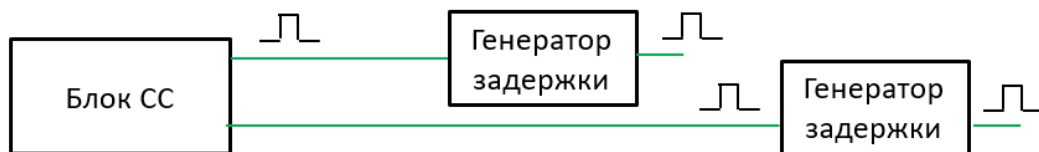


Рис. 2. Второй вариант архитектуры системы синхронизации

Генераторы задержки, используемые в системах синхронизации – это электронные или оптоэлектронные устройства, позволяющие регулировать время задержки выходного сигнала относительно входного в зависимости от величины управляющего сигнала, который может быть аналоговым или цифровым.

Практика создания крупных лазерных физических установок показывает, что оборудование установки можно условно разделить на «кластеры», в которых сгруппировано оборудование, сходное по времени срабатывания и расположению на площади установки. Появляется возможность эффективно управлять сходным оборудованием, построив древовидную структуру из генераторов задержки и, соответственно, задержанных сигналов. Усовершенствованная схема системы синхронизации с древовидной структурой показана на рис. 3.

Главным недостатком системы синхронизации с древовидной структурой является невысокая точность срабатывания. Качество сигналов синхронизации существенно падает при множественном преобразовании в электрооптических преобразователях, на разъемах и каскадах генераторов задержки. Отсутствует возможность проконтролировать и измерить фактическое время прихода сигналов управления на оборудование установки.

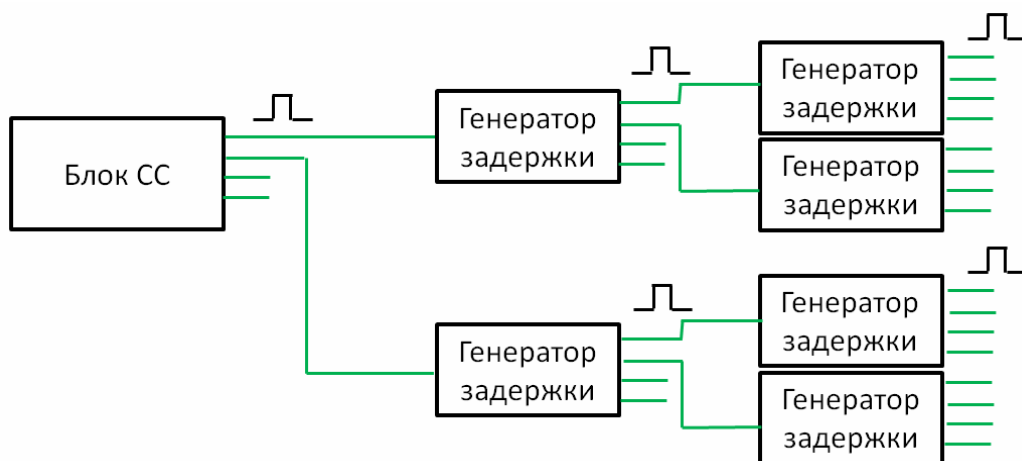


Рис. 3. Схема системы синхронизации с древовидной структурой

Третий вариант архитектуры системы синхронизации показан на рис. 4. Система синхронизации состоит из одного центрального блока и множества локальных. Центральное устройство непосредственно не управляет оборудованием установки и служит для связи устройств системы синхронизации. Локальные блоки территориально распределены по площади установки в местах сосредоточения синхронизируемого оборудования, то есть обслуживают «кластеры» сходного оборудования. Каждый локальный блок имеет в своем составе набор генераторов задержки для регулировки времени выдачи сигналов запуска, и выходные оптические каскады с электрооптически преобразователями.



Рис. 4. Третий вариант архитектуры системы синхронизации

Принципиальным отличием данного варианта построения системы синхронизации является наличие высокоскоростного цифрового интерфейса между центральным и каждым из локальных устройств системы синхронизации. Символьная скорость такого интерфейса может достигать 10 Гбит/с. Благодаря постоянному двунаправленному обмену информацией между устройствами системы появляется возможность организовать контур обратной связи, обеспечив измерение фактического времени распространения сигналов на всем пути распространения сигналов синхронизации, за исключением коротких выходных кабелей от локальных блоков до оборудования установки. Время прихода всех сигналов синхронизации на оборудование установки настраивается централизованно по высокоскоростному интерфейсу.

Особенность высокоскоростных последовательных интерфейсов состоит в том, что из потока данных приемник в локальном блоке системы синхронизации может восстановить не только информационную нагрузку, но и тактовый сигнал, которым он был затактирован передатчиком на центральном блоке системы синхронизации. Восстановленный тактовый сигнал имеет искажения, возникшие при передаче в трактах приемника, передатчика, и в канале связи. Однако, использование контура фазовой автоподстройки частоты (PLL) позволяет получить тактовый сигнал высокого качества, который затем используется для тактирования локального блока системы синхронизации.

Этот механизм показан на рис. 5. Он используется для переноса тактовой частоты с центрального на локальные блоки системы синхронизации. В результате использования этого принципа становится возможным задерживать события во всех каналах системы синхронизации одинаковыми инкрементами (тактами), поскольку все события порождаются единственным тактовым генератором.

Измерение фактического времени распространения сигналов от центрального до каждого из локальных блоков производится по двухпроходной схеме, в которой измерительный сигнал передается на локальный блок по высокоскоростному интерфейсу, а затем возвращается обратно. Результат измерения времени распространения используется для компенсации времени распространения с помощью генераторов задержки. В результате этого становится возможным скомпенсировать время распространения сигналов до каждого локального блока системы синхронизации вне зависимости от места расположения на площади установки.

Использование системы синхронизации с высокоскоростным интерфейсом позволяет избежать недостатков, присущих схемам, рассмотренным ранее. При такой схеме построения системы синхронизации каждое локальное устройство работает в собственном «масштабе времени». Однако, оно оказывается жестко связанным с «центральными часами» благодаря высокоскоростному ин-

терфейсу. Фазовые задержки, приобретаемые сигналами при распространении по волоконно-оптическим кабелям, измеряются в ходе работы системы синхронизации и компенсируются с помощью генераторов задержки.

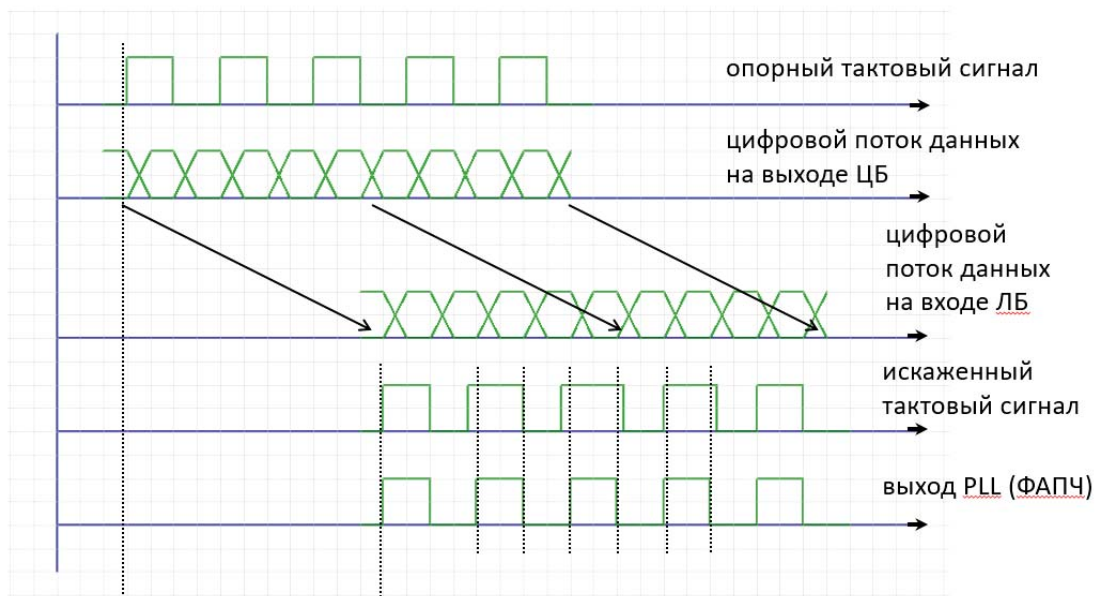


Рис. 5. Механизм тактирования локальных блоков системы синхронизации

Таким образом, в работе представлены основные принципы проектирования систем для синхронизации оборудования многоканальных лазерных установок, используемые в АО «НИИЭФА». Продемонстрированы основные подходы, обеспечивающие выдачу управляющих сигналов в программируемые моменты времени с пикосекундной точностью.

### Список литературы

1. Lerche R., Coutts G., Lugin L., Nyholm R., Sewall N., Stever R., Wiedwald J. The NIF integrated timing system – design and performance / 8th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems, 2001.
2. Luttmann M., Pastor J.-F., Drouet V., Prat M., Raimbourg J., Adolf A. Laser Megajoule synchronization system. High Power Lasers for Fusion Research, Proceedings of the SPIE, 2011. Volume 7916, pp. 79160Z-79160Z-9.