

СПОСОБ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО УРОВНЯ ПОМЕХ СО СТОРОНЫ МОЩНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ

© 2021 г. Е. В. Смолина

*Институт лазерной физики СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 15Б*

e-mail: e.smolina@inbox.ru

Поступила в редакцию 29.07.2020 г.

После доработки 10.08.2020 г.

Принята к публикации 11.08.2020 г.

Проблема передачи сигналов на экспериментальных установках имеет особое значение для физики плазмы вследствие характерных мощных импульсных помех, вызываемых работой энергетического оборудования. В статье описан фильтр на основе широкополосного синфазного трансформатора, предназначенный для передачи сигналов на установке по моделированию солнечной плазмы КИ-1 Института лазерной физики СО РАН. Параметры плазмы, получаемой воздействием импульса мощного CO_2 -лазера на твердотельную мишень, резко отличаются от параметров плазмы установок по удержанию, что обуславливает неприемлемость известных методов передачи сигналов на основе классических трансформаторов и оптронов. Наличие рентгеновского излучения также накладывает ограничения на применение оптоволоконных решений.

DOI: 10.31857/S0032816221010146

В состав энергетического оборудования установки КИ-1 входят следующие системы: генератор фоновой плазмы (θ -пинч), источник питания солеоида продольного магнитного поля, импульсный CO_2 -лазер, электронный инжектор, источники питания магнитных систем мишеней и др. [1, 2]. Стандартной средой передачи сигналов на установке является коаксиальный кабель.

В цикле измерений эти системы запускаются в определенной последовательности, при этом коммутируются мощности до единиц мегаватт. Даже небольшая часть этой мощности, вытекающей за пределы одних систем, вызывает существенные проблемы в работе других. В первую очередь страдает синхронизация измерительных систем, принципиально работающих с малыми сигналами.

Под действием утечек мощности со стороны энергетических систем, в кабеле наводятся токи, которые можно разделить на две группы: токи, наведенные на внешней стороне оплетки кабеля, и токи, наведенные на внутренней поверхности оплетки и поверхности жилы кабеля [3]. Действие токов проявляет себя по-разному: ток, текущий по наружной стороне, стекает на корпус измерительного прибора, изменяя его потенциал относительно измеряемой цепи, и вносит ошибку в измерения, тогда как ток, наведенный на внутренней поверхности, может вызывать ложные запуски, полностью срывая процесс измерения. В данном

контексте ток первого типа называется синфазной помехой, а второго – дифференциальной помехой [4].

В настоящее время система передачи импульсов синхронизации измерений (триггера) на установке КИ-1 Института лазерной физики (ИЛФ) СО РАН выполнена на основе коаксиального кабеля, сами импульсы триггера генерируются секвенсором на основе генераторов задержанных импульсов ГЗИ-6, размещенных в защищенном зале. Этот же секвенсор генерирует импульсы зажигания водородных тиратронов силовых цепей установки. Для ограничения уровня наведенного на оплетку кабеля тока используется дополнительное экранирование, а для ограничения области растекания наведенного тока используется развязывающее устройство на основе разделительного импульсного трансформатора. Однако достигнутый уровень надежности запуска измерительной аппаратуры оказался недостаточным, так как заметная часть измерений происходила не по триггеру, а по помехе от срабатывания тиратронов, в связи с чем было необходимо уменьшить проникновение помехи, не ухудшая точность привязки измерений к триггеру.

При анализе ситуации было выявлено, что основной проблемой является неидеальность применяемого развязывающего трансформатора, а именно, паразитная емкость между витками и об-

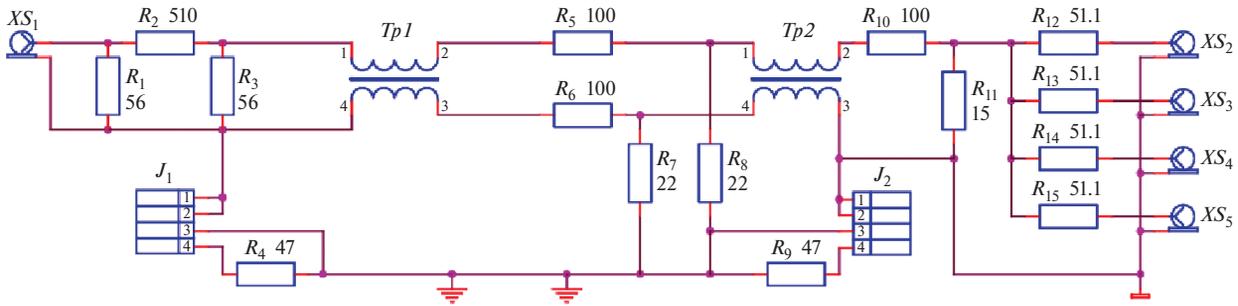


Рис. 1. Принципиальная схема согласующего устройства.

мотками [5]. Паразитная емкость позволяет напряжению помехи, наводимому на наружной стороне оплетки кабеля, проникать в виде тока на его внутреннюю сторону, т.е. преобразует синфазную помеху в дифференциальную.

При типичной для применяемых на КИ-1 ИЛФ СО РАН тиратронов скорости нарастания напряжения 10^{10} В/с и паразитной проходной емкости трансформатора 1 пФ ток дифференциальной помехи составит 10 мА на каждый вольт синфазной помехи, а соответствующее эквивалентное сопротивление проникновения будет составлять около 100 Ом. Для среды с характеристическим волновым сопротивлением 50 Ом это означает, что коэффициент проникновения помехи имеет значение приблизительно -10 дБ, что и объясняет неудовлетворительную работу цепей синхронизации измерительной аппаратуры.

Применение для синхронизации измерительных систем серийно выпускаемых оптронах интегральной компоновки бесперспективно, поскольку их паразитная емкость имеет величину, сравнимую с паразитной емкостью трансформатора — порядка 1 пФ, а следовательно, и проникновение помехи приблизительно -10 дБ. К тому же, если трансформатор передает сигнал триггера с ослаблением 0 дБ, то оптрон передает только 1% сигнала, т.е. -40 дБ. Очевидно, что оптрон существенно проигрывает трансформатору.

Для решения задачи надежной передачи сигнала триггера было использовано развязывающее устройство (фильтр) на основе широкополосного синфазного трансформатора на длинной линии [6, 7]. Устройство переносит сигнал триггера от потенциала кабельной линии, идущей из защищенного зала, к потенциалу экранированного объема на установке, в котором размещена измерительная аппаратура, а затем к потенциалам корпусов самой измерительной аппаратуры.

Соответственно устройство выполнено по двухкаскадной схеме, где первый каскад используется для получения нормализованного относительно местного потенциала экранированного объема квазидифференциального сигнала уме-

ренной амплитуды, а второй каскад — для получения разветвленного сигнала с “мягкой” связью местного потенциала и корпусов регистрирующей аппаратуры. Его принципиальная схема приведена на рис. 1.

Разъем входного кабеля РК-50, проходящего из защищенного зала от секвенсора цикла измерений, на рис. 1 обозначен XS_1 . Основную энергию импульса зажигания поглощает объемный угольный резистор R_1 (ТВО-2-56 Ом). Далее сигнал ослабляется делителем R_2, R_3 до ~ 60 В относительно оплетки входного кабеля, а перемычка (джампер) J_1 , позволяет замыкать оплетку входного кабеля либо напрямую на корпус экранированного объема (Vox Ground), либо через резистор R_4 . Дзампер J_1 необходим для быстрого определения природы наводки: проводя эксперимент по проникновению наводки в режимах короткого замыкания (к.з.) и холостого хода (х.х.), можно определить оптимальное сопротивление терминирующего резистора для синфазной моды. Обычно эта величина составляет десятки ом, и резистор $R_4 = 47$ Ом может оказаться если не оптимальным, то приемлемым. Если довлеющий источник энергии наводки — разность потенциалов концов кабеля, то предпочтительным окажется режим х.х. (снятый дзампер), а в случае наводки по емкости на оплетку кабеля предпочтительной будет работа в режиме к.з. При комбинированной наводке оптимальным будет подключение резистора R_4 .

Ослабленный до умеренной амплитуды сигнал подается на вход синфазного трансформатора $Tr1$, который выполнен двадцатью двумя витками бифилярно свитого провода МГТФ-0.05 с волновым сопротивлением искусственной линии ~ 100 Ом на четырех кольцах $K10 \times 7 \times 6$ из феррита М2000НМ-5. Симметричная структура выхода позволяет замкнуть остаточные токи синфазной моды на местную землю, независимо от токов сигнала триггера. Трансформатор пропускает сигнал дифференциальной моды без изменений, а для

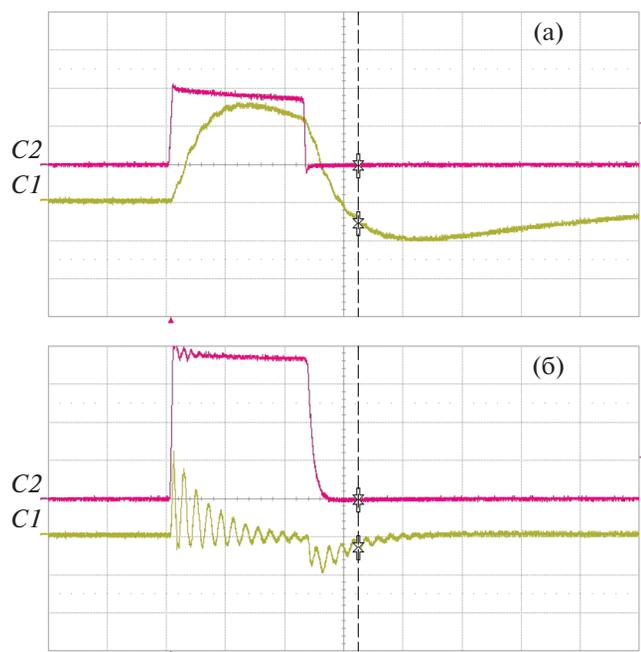


Рис. 2. Выходной сигнал развязывающего устройства на основе широкополосного импульсного трансформатора: **а** – дифференциальная мода, **б** – синфазная мода. Масштаб по вертикали: $C1$ – 5 В/деление, $C2$ – 150 В/деление, по горизонтали – 500 нс/деление.

сигнала синфазной моды представляет собой индуктивность.

Резисторами R_5 – R_8 образован делитель с большим коэффициентом ослабления. Ослабление синфазной моды существенно выше, чем для дифференциального сигнала. Структура выбрана так, что на выходе каскада присутствует парафазный относительно местного потенциала корпуса экранированного объема сигнал размахом ± 12 В. На рис. 2 приведены осциллограммы для выхода развязывающего устройства на основе широкополосного импульсного трансформатора. Луч $C1$ – выходной сигнал первого каскада развязывающего устройства, луч $C2$ – контрольный сигнал с выхода генератора, эквивалент 300 В, скорость развертки 500 нс/деление.

Второй каскад так же построен на основе синфазного трансформатора $Tr2$, идентичного по исполнению. Он принимает парафазный сигнал триггера и переносит его без изменения на потенциал корпусов измерительной аппаратуры, где с помощью резистивного делителя R_{10} , R_{11} амплитуда ослабляется до желательного уровня около 1–5 В, а затем через резисторы последовательного согласования R_{12} – R_{15} разветвляется на измерители. Так же, как и на входе, имеется переключатель J_2 , позволяющая оптимизировать поведение уравнивающих токов, приходящих на корпуса измерителей по сигнальным кабелям со стороны датчиков.

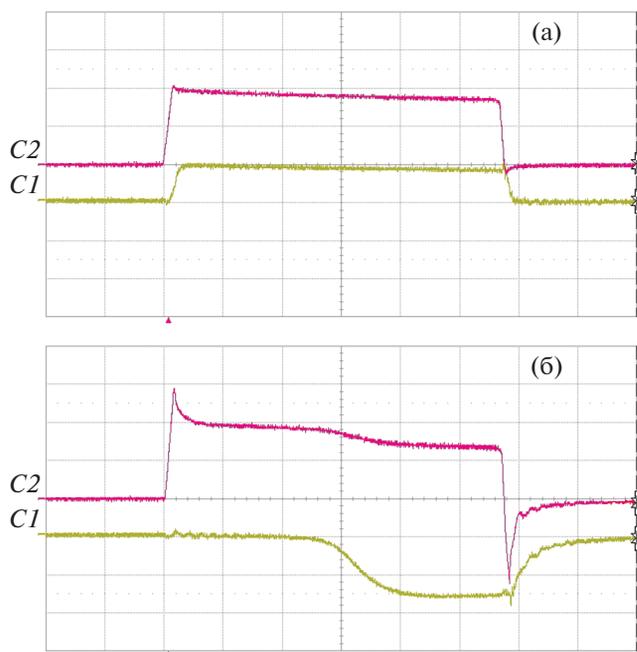


Рис. 3. Выходной сигнал второго каскада: **а** – дифференциальная мода, **б** – синфазная мода. Масштаб по вертикали: $C1$ – 5 В/деление, $C2$ – 150 В/деление, по горизонтали – 200 нс/деление.

На рис. 3 представлены осциллограммы сигналов с выхода одного из четырех идентичных друг другу кабелей. Луч $C1$ – выходной сигнал второго каскада устройства, луч $C2$ – контрольный сигнал с выхода генератора, эквивалент 300 В, скорость развертки 200 нс/деление, длительность фронта 20 нс.

Выводы. Спроектировано и изготовлено развязывающее устройство цепи передачи сигнала триггера для синхронизации системы регистрации установки КИ-1 ИЛФ СО РАН. Фронт дифференциального сигнала триггера по сравнению с исходным устройством улучшен на порядок – с 300 до 30 нс. Измеренное проникновение синфазной помехи с фронтом 20 нс в цепь сигнала не превышает –80 дБ, что существенно лучше –26 дБ для исходного устройства. Устройство испытано с синфазными импульсами амплитудой до 600 В. Продемонстрирована работоспособность устройств на основе синфазного трансформатора в условиях высоковольтных высокочастотных помех и существенно улучшены оба основных параметра. Достигнута надежная синхронизация системы регистрации установки КИ-1 в реальных условиях экспериментов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 18-12-00080.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальный стенд КИ-1. https://www.rfbg.ru/rffi/ru/project_search/o_397828
2. Смолина Е.В. // ПТЭ. 2019. № 6. С. 46. <https://doi.org/10.1134/S0032816219050264>
3. Денисенко В. // Современные технологии автоматизации. 2006. № 2. С. 94.
4. Гончаренко И.В. Антенны КВ и УКВ. Часть 2. Основы и практика. М.: РадиоСофт, Журнал “Радио”, 2005. <https://www.livelib.ru/book/1000093878-antennu-kv-i-ukv-chast-2-osnovy-i-praktika-i-v-goncharenko>
5. Кондаков Е.В. Учебно-методическое пособие к выполнению лабораторного практикума по курсу лекций “Теория электрических цепей” для студентов физического факультета ЮФУ, направлений подготовки “Радиофизика” и “Инфокоммуникационные технологии и системы связи”. Ростов-на-Дону, 2014. С. 6.
6. Ред Э.Т. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. М.: Мир, 1990. С. 12–20.
7. Лондон С.Е., Томашевич С.В. Справочник по высокочастотным трансформаторным устройствам. М.: Радио и связь, 1984.