

**Фирсенков А.И., Дубовой В.А., Безобразов О.А., Козин А.Э.**  
ОАО «Завод Магнетон»

## Перестраиваемые полосно-пропускающие ферритовые фильтры СВЧ с цифровым управлением

*Представлены результаты разработки цифровых модулей управления (драйверов) для перестраиваемых полосно-пропускающих ферритовых фильтров СВЧ. Рассмотрены примеры изготовленных образцов фильтров с цифровым управлением в различном конструктивном исполнении.*

**Ключевые слова:** перестраиваемые ферритовые фильтры СВЧ, драйвер, цифровое управление.

В современной радиотехнике получили широкое распространение перестраиваемые полосно-пропускающие ферритовые фильтры СВЧ (ППФ). В ОАО "Завод Магнетон" разработан и выпускается ряд перестраиваемых ППФ на сферических ферритовых резонаторах (ФР) и магнитостатических волнах (МСВ), распространяющихся в тонких ферритовых пленках [1]. Перестройка центральной частоты полосы пропускания,  $f_c$ , ППФ осуществляется с помощью тока, подаваемого в катушки управления (КУ) фильтра. Значение  $f_c$  пропорционально величине тока в КУ. Для выполнения современных требований к ППФ необходимо обеспечить высокую точность управления  $f_c$  и термостабильность. Поставленную задачу решают применением специального устройства - модуля управления (драйвера), который обеспечивает перестройку, поддержание и стабилизацию  $f_c$  ППФ.

В современных радиотехнических системах все большее распространение получает цифровое управление. Возникает необходимость цифрового управления ППФ. Для этого конструкция традиционных ППФ, управляемых от источника тока (ИТ), должна быть дополнена цифровым драйвером, включающим в себя цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) с необходимым внешним интерфейсом и управляемый ИТ. В большинстве случаев использование ППФ совместно с цифровым драйвером является более удобным, чем разработка модуля управления фильтром в составе системы.

Целью данной работы являлось разработка цифровых драйверов двух типов для перестраиваемых ППФ и создание на их основе фильтров с цифровым управлением.

### Непрограммируемый цифровой драйвер для ППФ (драйвер тип 1)

Разработана схема на основе ЦАП, преобразующего 8-разрядный прямой параллельный двоичный код в напряжение, пропорциональное значениям кода (см. рис.1).

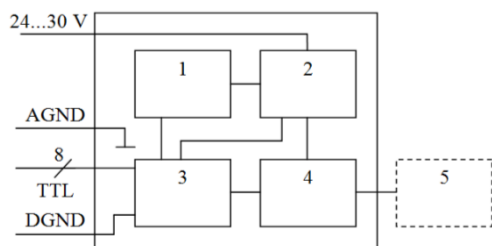


Рис. 1. Блок-схема драйвера типа 1:  
1 - прецизионный источник опорного напряжения (ИОН); 2 - стабилизированный источник питания (ИП); 3 - ЦАП; 4 - прецизионный ИТ; 5 - ППФ.

При подаче управляющего кода на цифровые входы 8, ЦАП 3 преобразует его в управляющее напряжение для ИТ 4. ИТ устанавливает в КУ фильтра 5 ток, соответствующий коду. ИОН 1 обеспечивает опорное напряжение для работы ЦАП. ИП обеспечивает стабилизированное напряжение для питания элементов схемы. При снятии кода с цифровых входов ток в КУ ППФ не подается (фиксации кода нет).

Диапазон значений управляющего кода позволяет иметь до 256 установок (дискретов)  $f_{ц}$  на диапазон перестройки ППФ. Зависимость  $f_{ц}$  от кода близка к линейной. Установка  $f_{ц}$  на нужный дискрет с точностью до 1 МГц.

Драйвер позволяет изготавливать ряд ППФ с идентичными параметрами перестройки.

Отметим следующие параметры драйвера:

- требования к источнику питания: напряжение +24...+30 В, пульсация не более 200 мВ;
- ток потребления не более 500 мА;
- требования к сигналам управления: TTL-совместимость (лог."0" - 0...1 В; лог."1" - 3,5...5 В).

Конструктивно схема драйвера выполнена на двусторонней печатной плате (60 x 30 мм) с отверстиями для монтажа в корпус или на стойки. Для подачи питания и сигналов цифрового управления установлен разъем DB-15M.

Устройство драйвера позволяет совместно с ним использовать большинство перестраиваемых ППФ "ОАО" Завод Магнетон" (на МСВ и на ФР).

В качестве примера приведем результаты изготовления и испытаний четырех образцов ППФ с драйверами с идентичной перестройкой центральной частоты.

Использованы опытные образцы ППФ на МСВ с коаксиальными выводами. Каждый ППФ укомплектован настроенным совместно с ним драйвером в виде отдельного модуля в металлическом корпусе (см. рис. 2). Типичные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) образцов ППФ с драйверами приведены на рис.3.

Основные электрические параметры образцов: диапазон электрической перестройки от 3,9 до 4,2 ГГц; минимальные вносимые потери в полосе пропускания,  $\alpha_{min}$ , не более 4 дБ; полоса пропускания по уровню минус 3 дБ,  $\Delta f_{3дБ}$ , (48...53) МГц; неравномерность вносимых потерь в полосе пропускания,  $\Delta\alpha$ , не более 0,5 дБ; заграждение вне полосы пропускания,  $\beta$ , не менее 60 дБ, коэффициент прямоугольности,  $K_P$ , около 2.

Соответствие управляющего кода  $f_{ц}$  ППФ, идентично для всех образцов.

Интервал рабочих температур - от минус 50 до +65 °С. Температурная стабильность обеспечена термокомпенсацией с помощью пассивных магнитных элементов в составе ППФ.



Рис. 2. ППФ с драйвером типа 1 (слева - ППФ, справа - драйвер)

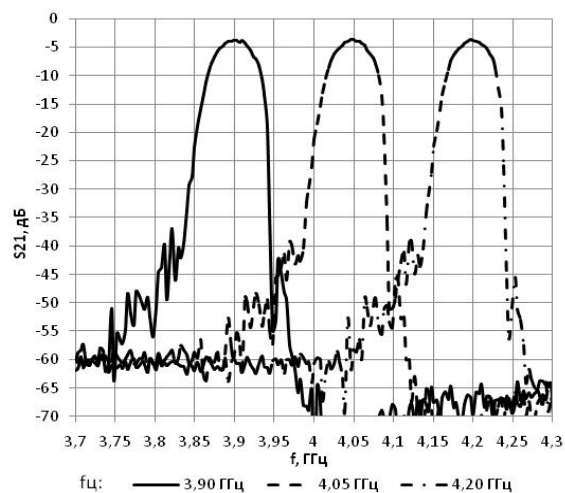


Рис. 3. Типичные АЧХ ППФ

### Программируемый цифровой драйвер для ППФ (драйвер тип 2)

В современных радиотехнических системах предъявляются высокие требования к термостабильности элементной базы, в том числе ППФ.

Для решения задачи повышения термостабильности  $f_{ц}$  образцов перестраиваемых ППФ разработана схема управления на основе микроконтроллера ATmega168PA-AU (см. рис.1).

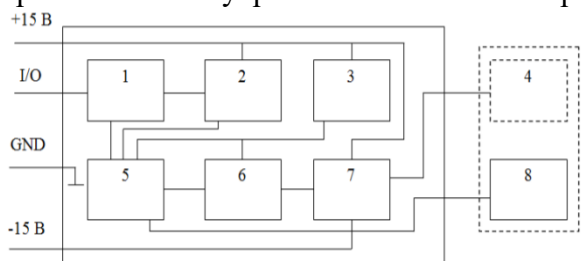


Рис. 4. Блок - схема драйвера типа 2:  
1 - приемо-передатчик RS-485; 2 - ИП;  
3 - прецизионный ИОН; 4 - ППФ;  
5 - микроконтроллер (МК); 6 - ЦАП;  
7 - ИТ; 8 - датчик температуры (ДТ).

Для перестройки фильтра 4 на приемо-передатчик 1 подается числовое значение из диапазона от 0 до 4095 в последовательном двоичном коде, соответствующее требуемому значению центральной частоты полосы пропускания фильтра  $f_{ц}$ . МК 5, согласно разработанной микропрограмме, получает код частоты с приемо-передатчика, оценивает значение температуры с ДТ 8, рассчитывает температурную коррекцию и выдает на ЦАП 6 код, с учетом температуры. ЦАП преобразует полученный код в значение управляющего напряжения. В соответствии с этим напряжением ИТ 7 устанавливает в КУ фильтра ток необходимый для установки  $f_{ц}$  ППФ на требуемое значение. ИП 2 формирует питание МК и схемы приемо-передатчика. Прецизионный ИОН 3 необходим для высокой точности работы ЦАП и цепи с датчиком температуры. ДТ вынесен к фильтру и крепится на его корпус.

Конструктивно схема драйвера выполнена аналогично первому типу. Разработаны микропрограмма для МК и программный интерфейс для работы с устройством.

Отметим следующие параметры драйвера второго типа:

- напряжение питания  $\pm 15$  В;
- ток потребления не более 500 мА;
- требования к сигналам управления: физический уровень RS-485 или TTL-совместимость (без приемо-передатчика). Протокол обмена согласуется с потребителем.

Диапазон значений управляющего кода позволяет иметь до 4096 дискретов  $f_{ц}$  на диапазон перестройки ППФ. Зависимость  $f_{ц}$  от кода близка к линейной.

Драйвер стыкуется с большинством ППФ "ОАО "Завод Магнетон"(на МСВ и на ФР). Драйвер имеет программную регулировку крутизны перестройки  $f_{ц}$ , что позволяет изготавливать ряд ППФ с идентичными параметрами перестройки.

Результаты реализованы при изготовлении и испытаниях четырех ППФ с драйверами с идентичной перестройкой и коррекцией температурных дрейфов  $f_{ц}$ .

Использованы ППФ на МСВ в волноводном исполнении ФВИС2-БП [2], для каждого из которых изготовлен и запрограммирован драйвер в виде отдельного модуля в металлическом корпусе (см. рис 5). Типичные АЧХ образцов ППФ с драйверами приведены на рис.б.



Рис. 5. ППФ ФВИС2-БП с драйвером типа 2 (слева - ППФ, справа - драйвер)

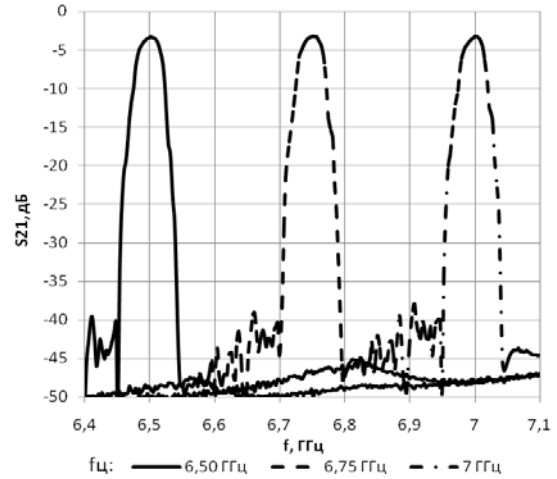


Рис. 6. Типичные АЧХ ППФ

Основные электрические параметры образцов: диапазон электрической перестройки от 6,5 до 7,0 ГГц;  $\alpha_{min}$  не более 4 дБ;  $\Delta f_{3дБ}$  (25...40) МГц;  $\Delta\alpha$  не более 0,5 дБ;  $\beta$  не менее 45 дБ,  $K_P$  около 2, интервал рабочих температур - от минус 50 до +65 °С.

Соответствие кодов управления и  $f_c$  идентично для всех образцов.

Проведена температурная калибровка образцов в интервале температур от минус 50 до +65 °С. В каждый драйвер запрограммирована компенсация температурного дрейфа подключенного образца ППФ. В результате температурный дрейф частоты значительно уменьшен (см. рис.7). Отметим, что разработанный метод программной коррекции позволяет компенсировать зависимость температурного дрейфа от частоты. При дополнительной отладке программы возможно уменьшение температурного дрейфа.

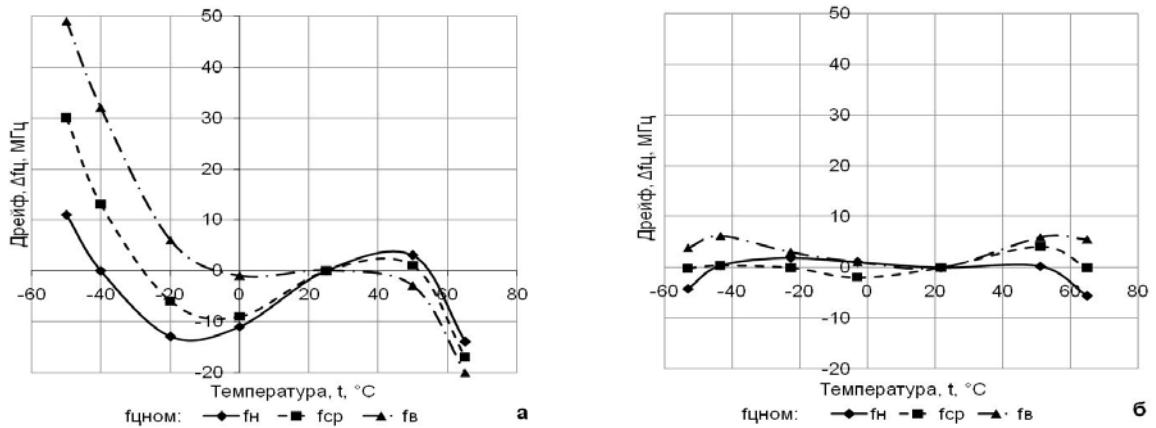


Рис. 7. Температурный дрейф  $f_c$  образца ППФ ФВИС2-БП на нижней ( $f_n$ ), средней ( $f_{cp}$ ) и верхней ( $f_v$ ) частотах диапазона перестройки: а - до программной коррекции; б - после.

### ППФ с цифровым управлением (модуль)

Разработаны образцы ППФ с цифровым управлением в виде единого модуля (см.рис 8) на основе ППФ с микрополосковыми выводами ОАО "Завод Магнетон" [2,3].

Изготовлены и испытаны образцы модулей с различными рабочими диапазонами частот и с использованием схем управления (драйверов) двух типов, описанных выше.

Электрические параметры образцов приведены в таблице 3, примеры АЧХ - на рис 9.

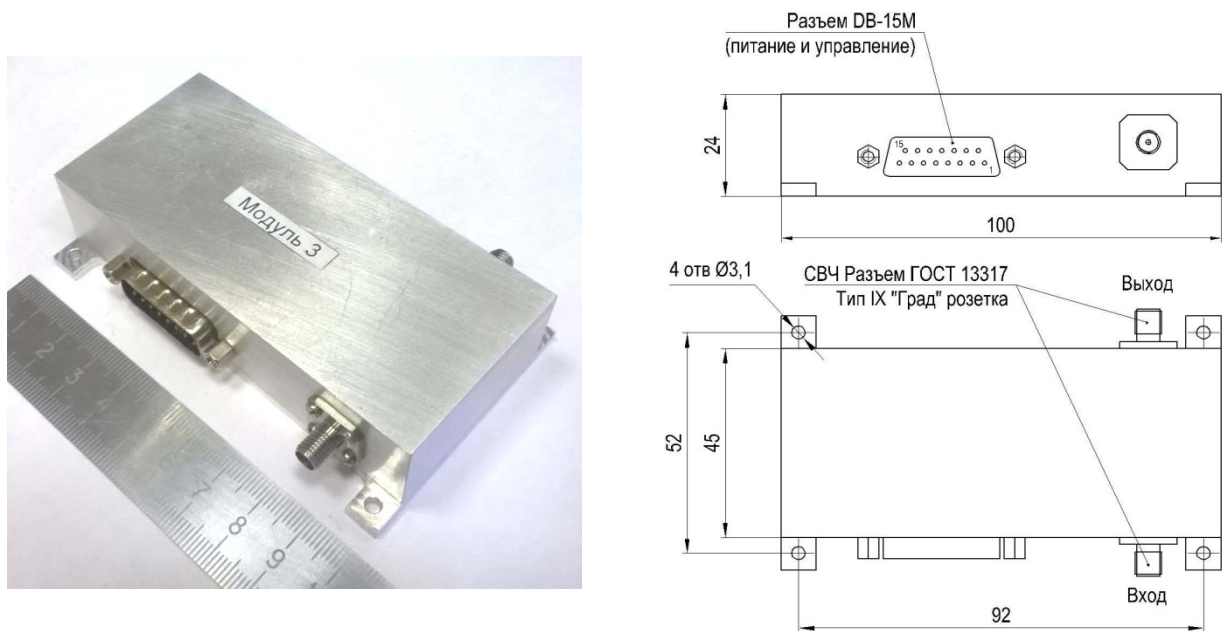


Рис. 8. ППФ с цифровым управлением (модуль)

Таблица 3. Основные электрические параметры ППФ с цифровым управлением (модулей)

Модуль	Диапазон электрической перестройки, ГГц	Тип ППФ	Тип драйвера	$\alpha_{\min}$ , дБ, не более	$\Delta f_{-3\text{дБ}}$ , МГц	$\Delta\alpha$ , дБ, не более	$K_P$	$\beta$ , дБ не менее
1	3,7-4,3	Аналог ФПИН2-5	2	3,6	36-42	0,1	2	50
2	6,5-7,0	Аналог ФПИН2-5	2	2,8	30-32	0,1	2	50
3	9,2-9,8	Аналог ФПИН2-5	2	3,1	37-44	0,1	2	50
4	9,2-9,6	Аналог ФПИН2-5	1	3,3	44-47	0,1	2	53
5	2,7-3,2	ФПИН3-4-ПМ	1	3,3	34-37	0,1	3	53
6	0,87-1,25	ФПИН3-4	2	4,1	14-15	-	5	75

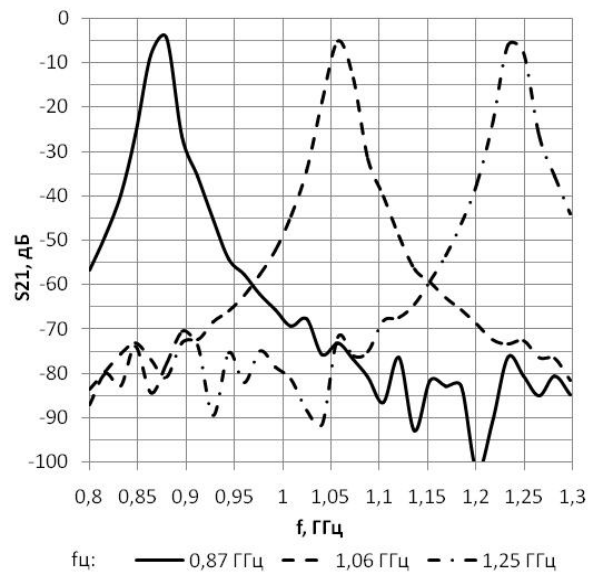
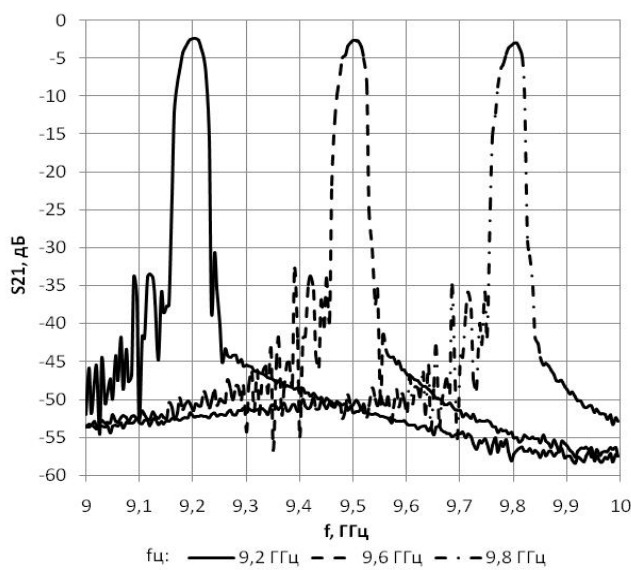


Рис. 9. АЧХ ППФ с цифровым управлением: слева - модуль 3; справа - модуль 6

Таким образом, разработанный ряд ППФ СВЧ в комплекте с драйвером и модули СВЧ могут быть использованы в современных радиотехнических системах, обеспечивая высокую точность настройки на частоту, работу в широком интервале температур от минус 50 до +70 °С.

Отметим, что в драйверах использована доступная радиоэлектронная компонентная база.

Разработанные технические решения являются основой для расширения ряда перестраиваемых ППФ с драйвером, охватывающий диапазон частот от 400 МГц до 26 ГГц.

#### Библиографический список

1. Перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры // ОАО "Завод Магнетон": официальный сайт. СПб. - URL: <http://www.magneton.ru/cat.php?id=104> (24.03.2016).
2. Козин А.Э., Дубовой В.А., Фирсенков А.И. Волноводный перестраиваемый полосно-пропускающий СВЧ фильтр на магнитостатических спиновых волнах // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. тр. Всерос. науч.-тех. конф. - СПб, 2014. - С. 490-493. = URL: [http://mwelectronics.ru/2014/Poster/5/P05\\_03\\_KozinAE\\_Volnovodnyi\\_perestraivaemyi.pdf](http://mwelectronics.ru/2014/Poster/5/P05_03_KozinAE_Volnovodnyi_perestraivaemyi.pdf) (24.03.2016).
3. Дубовой В.А., Чуркин В.И., Федин Д.Н. // Исследование и изготовление опытных образцов перестраиваемых фильтров на ферритовых резонаторах с микрополосковыми выводами диапазона частот 400-4000 МГц // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. ст. Всерос. науч.-тех. конф. - СПб, 2015. - Т. 2. С. 96-100. = URL: [http://mwelectronics.ru/2015/Papers/P03\\_10\\_DubovoiVA\\_Issledovanie%20i%20izgotovlenie.pdf](http://mwelectronics.ru/2015/Papers/P03_10_DubovoiVA_Issledovanie%20i%20izgotovlenie.pdf) (24.03.2016).