PID, фильтры и Rates

Методичка

19. Betaflight: PID, фильтры и Rates

Тема 3 нового списка. Основа — учебные материалы **Betaflight 4.5**. Результат: понятный выбор профиля, изменение нужной группы параметров и оценка по сохранённым логам. Проверка настройки на USB не подтверждает качество полёта.

Что изменяется

```
Стик → Rates / RC Smoothing → Setpoint → PID + Feedforward → моторы
                                    ↑
                              Gyro + фильтры
```

Группа	На какой вопрос отвечает
Rates	Какое вращение запрашивает положение стика
RC Smoothing	Насколько сглажены входные команды
P	Насколько сильно регулятор отвечает на текущую ошибку
I	Как устраняется накопленная ошибка и постоянное возмущение
D	Как сдерживается быстрое изменение вращения; чувствителен к шуму
Feedforward, FF	Как изменение команды заранее влияет на управление
Фильтры	Как подавляется шум измерений ценой задержки

Rates не устраняют плохой PID, а PID не заменяют подходящие Rates. Одинаковое дрожание изображения может иметь механическую, фильтровую или управляющую причину.

Общий вход: версия и профиль

1. **CLI →** `version`**,** `diff all` **→ Save to File**. Зафиксированы исходная версия, target и настройки.
2. **PID Tuning → PID Profile / Rate Profile** → имя и номер исходного профиля. Выбор профиля может одновременно активировать его; «посмотрел другой» не означает «остался на прежнем».
3. **Copy profile / Copy rateprofile** → отдельный рабочий профиль, если доступен. Сохранён путь возврата к исходному.
4. Исходная конфигурация и лог относятся к одной версии и одному аппарату. Для **2025.12.5** числовой набор из 4.5 не используется как готовый preset; сначала выбирается база этой ветки.

Маршрут A. Настройка Rates

1. **PID Tuning → Rateprofile Settings → Rates Type: Actual**. Названия полей ниже относятся к Actual; числа из Betaflight Rates или другой модели кривой сюда не переносятся напрямую.
2. **Center Sensitivity** → чувствительность около центра. Меньшее значение даёт более спокойную реакцию на малые движения стика.

3. **Max Rate** → предельная угловая скорость на полном отклонении, в °/s. Это скорость вращения, не угол наклона.
4. **Expo** → форма перехода от центра к краю. Большее Expo расширяет спокойную центральную область; смысл сверяется по графику.
5. **Save** → повторное чтение выбранного Rate Profile и кривых по трём осям. График не должен неожиданно меняться из-за другого Rates Type или профиля.

Учебный пример чтения полей: `Actual → Center Sensitivity 100; Max Rate 500; Expo 0.20`. Это пример, **не школьный обязательный preset и не заводской default**. Для конкретного задания заменяются значения, а порядок и смысл полей сохраняются.

Throttle MID / Throttle EXPO формируют кривую газа. **Throttle Limit SCALE** сжимает весь диапазон; **CLIP** ограничивает верхушку. **Motor Output Limit** ограничивает выход на моторы и не является тем же параметром. Двойное Expo одновременно в пульте и FC меняет ожидаемую кривую.

Маршрут Б. Фильтры по записанному Blackbox

1. Blackbox Explorer → лог → один и тот же участок и ось → исходный/фильтрованный gyro. Для нового учебного лога источник рекомендует **2 kHz** и **GYRO_SCALED**; отсутствие нужного поля в старом логе не исправляется сменой настройки после записи.
2. Спектр шума → связь с газом/RPM и частотой. Движущиеся вместе с оборотами пики — кандидат на моторный шум; почти постоянный пик — кандидат на механический резонанс. Один FFT не доказывает причину.
3. **Motors → Bidirectional DShot** и пригодные данные eRPM → основание для RPM Filter. Наличие DShot без обратных данных не подтверждает работу RPM-фильтра.
4. **PID Tuning → Filter Settings → RPM Filter** → подавление основных моторных гармоник. **Dynamic Notch** → оставшиеся выраженные резонансы. **Gyro / D Term Lowpass** → оставшийся широкополосный шум.
5. Изменение **одной** группы → Save → сравнение с исходным профилем и сопоставимым логом. Меньше фильтрации обычно означает меньше задержки и больше пропущенного шума; рост множителя не означает «сильнее фильтрует».
6. Шум D-term вырос, появились новые узкие пики или ухудшилось следование Setpoint → возврат последнего изменения. Параметры соседней удачной рамы не являются подтверждением.

Gyro Lowpass 2 нельзя отключать автоматически по чужому примеру. В учебном PDF условие отключения связано с одинаковой частотой gyro и PID loop. При переходе, например, 8 kHz → 4 kHz фильтр участвует в защите от наложения спектров. Новые значения без лога не объявляются «оптимальными».

Маршрут В. PID и Feedforward

1. Пригодный лог и исправная исходная механика → выбранная ось → **Setpoint, Gyro, P/I/D/F и Motor** на одном временном участке. Если моторный выход упирается в предел, ошибка слежения не доказывает нехватку P.
2. **PID Tuning → PID Profile Settings** → рабочий профиль. Сначала определяется характер ошибки; затем изменяется соответствующая группа.
3. **Master Multiplier** → общий масштаб. **PD Balance / Tracking** → соотношение быстрого исправления и демпфирования. **I / Drift-Wobble** → более медленная составляющая. Названия слайдеров зависят от выпуска конфигуратора; ориентир — какие P/I/D меняются в таблице.
4. Оценка: быстрый уход Gyro за Setpoint и повторные колебания → разбор P:D; медленное возвращение/раскачивание → I и ограничения; запаздывание именно начала команды → FF после настройки основного контура.

5. **Feedforward / Stick Response** → ответ на изменение команды. Недостаток даёт отставание; избыток может давать выброс. **Feedforward Boost** влияет прежде всего на начало изменения, а не на всю статическую ошибку.
6. **Save → повторное чтение → сравнение логов** с одинаковыми осями, масштабом и близким режимом. Улучшение означает уменьшение ошибки без нового шума, колебаний и насыщения; оценка только «на глаз по 3D-модели» недостаточна.

В PDF используется логика **D → P → I → FF**: достаточное демпфирование, баланс P:D, затем I и FF. Это порядок анализа, а не команда выставить остальные члены в ноль на любом аппарате.

Дополнительные параметры: когда искать

Признак / задача	Параметр и смысл
Накопление I при резкой команде	I Term Relax ограничивает накопление во время быстрого изменения
Возмущение при изменении газа	Anti Gravity усиливает компенсацию переходного процесса
Колебания только в верхней области газа	TPA и его breakpoint; сначала причина и режим D/PD, затем величина
Разное D в спокойном участке и при команде	Dynamic Damping / D_min; для анализа предусмотрен debug D_MIN
Низкие обороты и потеря запаса управления	Dynamic Idle; требует правильных RPM-данных и параметров мотора

Частые неверные выводы

- «Чем выше P/D и Master, тем лучше» — рост ограничивается устойчивостью и шумом.
- «Один провал/пик доказывает неисправный мотор» — нужны сопоставление осей, команд и выхода.
- «Плавная картинка равна хорошему следованию» — сглаживание может скрыть задержку.
- «Профиль сохраняет все фильтры аппарата» — область действия параметра сверяется по версии; не все настройки глобального gyro относятся к выбранному PID Profile.

Короткие команды Betaflight 4.5

Команды чтения; настройки этим блоком не меняются:

```
version
diff all
get rates_type
get rpm_filter
get gyro_lpf
get dterm_lpf
get simplified
```

Источники: `school/Лекції та PDF/01 Betaflight/BF 4.5 Filter Tuning.pdf` (с. 3–21), `BF 4.5 PID Tuning.pdf` (с. 2–10, 13–58), `BF 4.5 Rates Tuning.pdf` (с. 2–17). Конкретные авторские настройки отделены от универсальных принципов. Дополнительная сверка: PID Tuning Tab, Profiles.