Усилитель для большого черенковского счетчика установки ВЕС

А.В. Ивашин (ivashin@ihep.ru), ИФВЭ

2007

1 Описание усилителя

Усилитель предназначен для усиления сигналов с ФЭУ-110 и ФЭУ-125, работающих в режиме малой засветки (единицы фотоэлектронов). Собственное достижимое усиление данных ФЭУ недостаточно для непосредственной работы на АЦП ЛЭ-14, используемые на установке ВЕС. С другой стороны, при соединении АЦП и ФЭУ длинным кабелем (≈ 70 м), радикально повышать чувствительность АЦП не имеет смысла, поскольку сигнал от ФЭУ потеряется в помехах. Поэтому необходимо оснащение ФЭУ усилителями с усилением по току порядка 100.
Используемые в настоящий момент усилители обладают по крайней мере тремя недостатками:

- Плохая помехоустойчивость к паразитным токам, протекающим по оплетке коаксиального кабеля, соединяющего АЦП и усилитель. Данная проблема вызвана неудачной (для данной ситуации) конструкцией выходного каскада усилителя и приводит к неконтролируемому дрожанию пьедестала АЦП.

- Склонность к самовозбуждению некоторых экземпляров усилителей.

- Связь по переменному току ФЭУ и усилителя, а также выходного кабеля и усилителя. Это приводит, при большой частоте следования входных импульсов, к дрейфу пьедестала АЦП.

Новый усилитель свободен от перечисленных недостатков. Схема усилителя приведена на рис.13. Питание усилителя однополярное, в диапазоне от -13 В до -16 В. Это напряжение подается на стабилизатор, выполненный на LM337, и далее весь усилитель питается стабилизированным напряжением -10 В. Основное усиление происходит в первом каскаде, выполненном по трансимпедансной схеме на ОУ AD8055. Коэффициент усиления (точнее, преобразования тока в напряжение) задается резистором обратной связи. Далее происходит инвертирование и усиление сигнала в 2 раза, и преобразование напряжения в ток в последнем каскаде. Второй и третий каскады выполнены также на ОУ AD8055. Коэффициент усиления тока на нулевой частоте получается около 200, ширина выходного импульса на полувысоте, в ответ на импульс тока длительностью 10 нс, около 25 нс. Функцию, которую выполняют два последних каскада, можно было реализовать на одном ОУ. Это не было сделано по глупости.
Существенной особенностью усилителя является выходной каскад, являющийся источником тока. Он обеспечивает нечувствительность выходного тока к колебаниям потенциала земли на стороне АЦП (по крайней мере в диапазоне < 1 МГц), вызванным протеканием паразитных токов по оплетке коаксиального кабеля, на который работает усилитель.
Для нормальной работы выход усилителя должен быть нагружен на 50 Ом по постоянному току.
Анод ФЭУ подсоединяется ко входу усилителя без какого-либо резистора утечки (его роль выполняет сам усилитель). При этом анод находится под постоянным потенциалом -5 В относительно земли.
Ниже изложена методика исследования свойств усилителя при помощи засветки ФЭУ светодиодом и результаты этого исследования.

В конце также приведена последовательность действий при монтаже усилителя в делитель ФЭУ (для большого черенковского счетчика установки ВЕС).

2 Характеристики усилителя

Вот таблица основных характеристик усилителя:

Напряжение питания	от -13 В до -16 В
Потребляемый ток	30 мА
Пьедестал	-20 мВ ($\approx$ 320 отсч. АЦП)
Температурный дрейф пьедестала	24 мкВ/°C (0.3 отсч. АЦП/°C)
Ширина импульсной переходной характеристики на полувысоте	25 нс
Коэффициент усиления по току на нулевой частоте	200
Шум, RMS	2.3 отсч. АЦП

Отсчеты АЦП приведены для ворот 120 нс. Смоделированный в Spice отклик усилителя на ступеньку тока (рис.1) приведен на рис.2. Реальный сигнал, наблюдаемый осциллографом при подаче ступеньки напряжения на тестовый вход, не сильно отличается от смоделированного. В модели на вход усилителя была присоединена емкость 10 пФ для учета емкости анода ФЭУ.

Пьедестал АЦП при отсоединенном усилителе приведен на рис.3, при присоединенном усилителе — на рис.4. Пьедестал на рис.4 отфитирован сплайном.

Была также сделана попытка вычислить шум усилителя. Для этого при помощи Spice была получена спектральная плотность шума на выходе усилителя в зависимости от частоты при различных паразитных емкостях анода ФЭУ. Шум в отсчетах АЦП можно получить интегрируя квадрат спектральной плотности шума с функцией частоты, которая представляет из себя дисперсию отклика АЦП на сигнал частоты f со случайной фазой. Эта функция равна:

$$a(f) = \left(\frac{\sin \pi T f}{\pi T f}\right)^2$$

где T — длительность ворот.

Дисперсия шума в отсчетах АЦП:

$$\sigma^2 = \int \frac{\overline{u_f^2}}{K^2} a(f) df$$

где K — коэффициет пересчета из вольт в отсчеты АЦП, в данном случае 20 мВ/320.

Результаты приведены в таблице:

С, пФ	Шум, RMS, отсч. АЦП
0	1.47
10	1.66
20	1.96
30	2.31

Если принять емкость анода ФЭУ 10 пФ, то вычисленный результат меньше реального в 1.5 раза. Также видно, что каждые 10 пФ емкости добавляют 0.3 отсчета к шуму. По этой причине необходимо ликвидировать длинную (15 см) линию передачи из витой пары идущую от ФЭУ к усилителю.
При экспериментах со светодиодом, интенсивность засветки регулировалась при помощи пассивных фильтров (куски бумаги, иногда с отверстиями). Использовался ФЭУ-110 при напряжении питания 1800В со штатным делителем, снятым с одного из каналов большого черенковского счетчика. Схема поджига светодиода — разряд конденсатора через лавинный транзистор. Отклик ФЭУ на получаемую вспышку света был изучен на осциллографе при большой фотостатистике. Из-за большого времени релаксации светодиода, 6% интеграла сигнала не помещалось в 120 нс ворота.
Для оцифровки сигнала с усилителя использовалась система сбора данных установки BEC. С целью получить одноэлектронный спектр ФЭУ засвечивался с интенсивностью около 0.1 фотоэлектрона (интенсивность малой засветки легко получить разделив число срабатываний ФЭУ на общее число событий). Результат представлен на рис.5. Там же нарисованы шумы (видно, что они пренебрежимо малы) и спектр отфитирован сплайном.
На рис.6 представлено несколько первых сверток одноэлектронного спектра. Все свертки еще дополнительно свернуты с пьедесталом,так что сумма этих сверток, взятая с коэффициентами распределения Пуассона плюс вероятность нуля умноженная на пьедестал (который на рис.4) дает наблюдаемый спектр с ФЭУ.
После этого было снято 6 спектров с различными засветками и они были отфитированы суммой сверток полученного одноэлектронного спектра. Результаты представлены на рис.7-12. Все четыре изображения на каждом рисунке — это один и тот же спектр, нарисованный в различных масштабах и пределах. В качестве параметров фита использовались нормировка, среднее число фотоэлектронов и пьедестал.
Можно сделать перекрестную проверку правильности параметризации спектров, если разделить среднее по гистограмме со спектром на полученное в результате фита число фотоэлектронов. Для всех спектров должно получится одно и то же число — среднее по одноэлектронному спектру.
Результат проверки приведен в таблице:

n_{fit}	$mean_{hist}/n_{fit}$	$pedestal_{fit}$
8.22	125.6	459.5
4.33	125.8	442.9
1.73	127.5	441.8
1.22	128.1	441.8
0.59	125.5	441.6
0.27	124.4	441.8

Видно, $mean_{hist}/n_{fit}$ постоянно с точностью 3%.

Необходимо отметить, что в спектре, который использовался для получения одноэлектронного спектра есть примесь 5% двухэлектронного спектра (в соответствии с распределением Пуассона). Поэтому глупо ожидать лучшего согласия. Далее, ошибка в 5% в среднем значении одноэлектронного спектра автоматически приводит при достаточно больших n (скажем >4) к такой же ошибке в определении числа фотоэлектронов при фитировании, так как результирующий спектр уже почти гауссов, а пьедестала уже почти нет. Ошибка же 5% в n приводит к ошибке в 20% в вероятности нуля при n=4, а при n=8 соответствующие вероятности нуля отличаются уже в 2 раза. Что и видно в первых двух измерениях.

3 Монтаж усилителя в делитель ФЭУ

Для монтажа усилителя в делитель ФЭУ необходимо произвести следующие действия:

- Найти и откусить резистор утечки анода ФЭУ.
- Укоротить витую пару, подсоединенную к аноду ФЭУ, длиной ≈ 15 см до ≈ 3 см (сделать настолько короткой, насколько позволяет конструктив).
- Отвинтить крышку делителя и демонтировать старый усилитель.
- Впаять новый усилитель в крышку делителя.
- Привинтить крышку делителя обратно.
- Припаять вход, выход, питание, тест. При этом помнить, что вход, выход и тест — это быстрые сигналы и соответствующие провода должны быть как можно короче.
- Подать питание на усилитель, прямоугольный сигнал отрицательной полярности на тестовый вход длительностью 100 нс и амплитудой 500 мВ. На выходе должен быть 100 нс сигнал отрицательной полярности и амплитудой 1 В. Выход должен быть нагружен на 50 Ом по постоянному току!

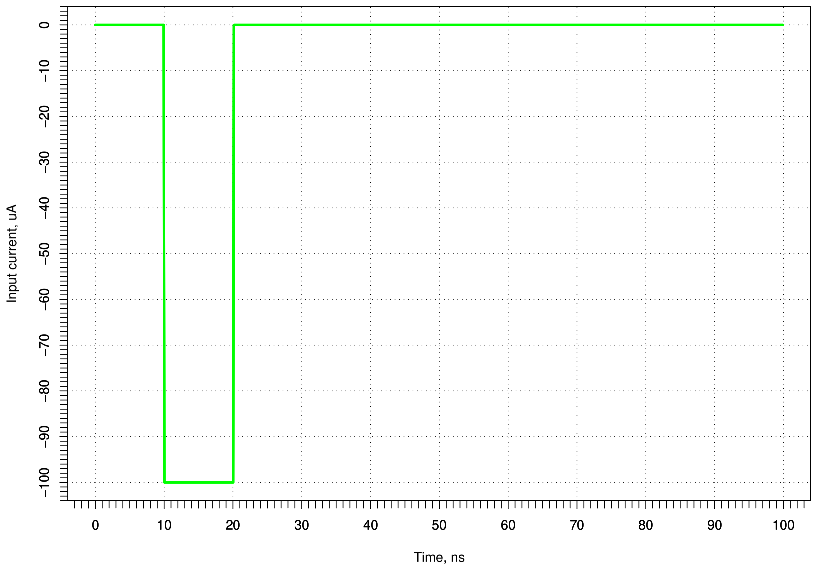

Рис. 1: Входной сигнал

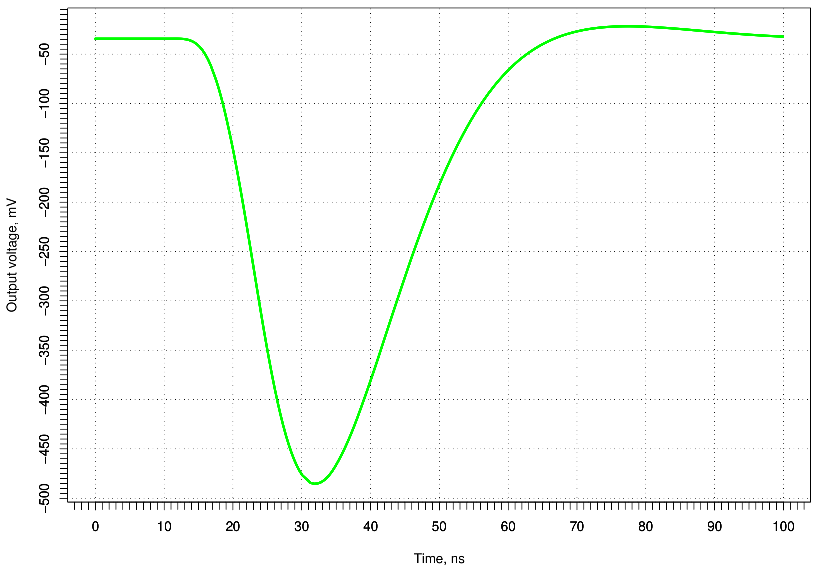

Рис. 2: Выходной сигнал

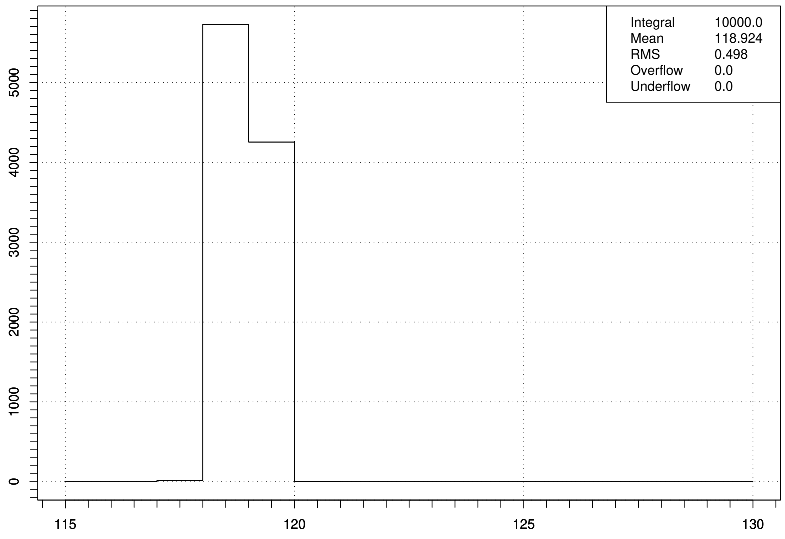

Рис. 3: Пьедестал АЦП ЛЭ-14 без усилителя

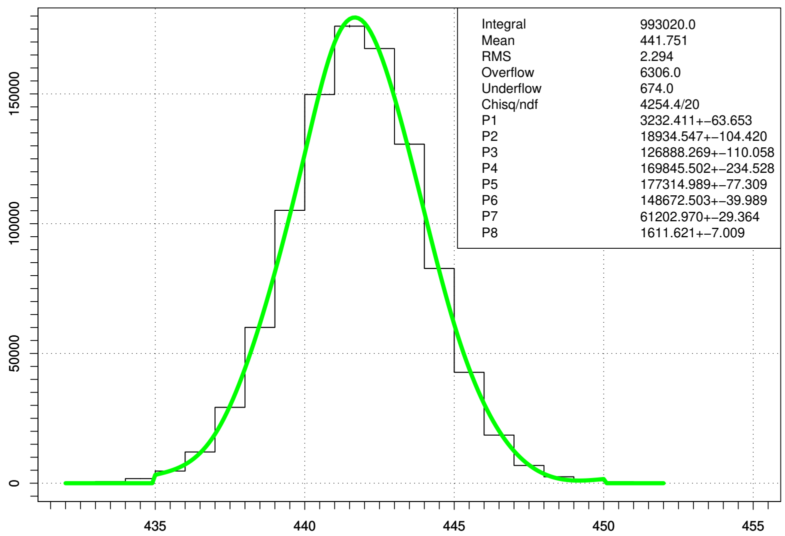

Рис. 4: Пьедестал АЦП ЛЭ-14 с усилителем

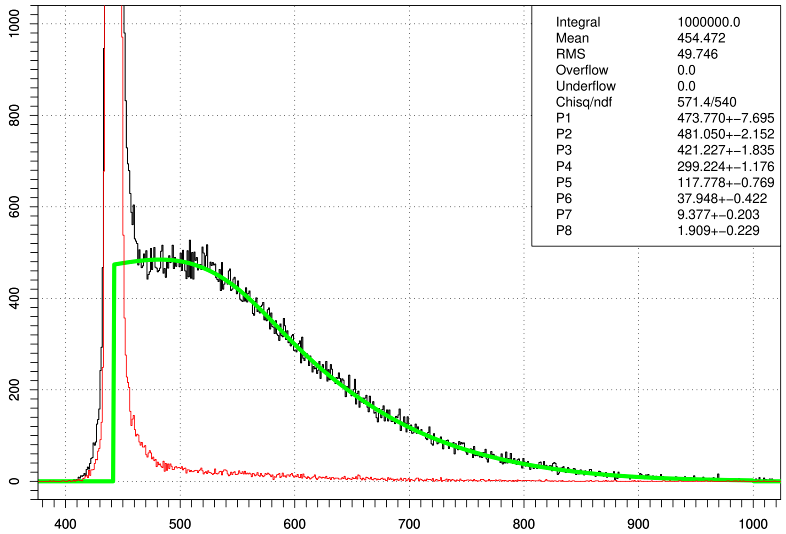

Рис. 5: Одноэлектронный спектр, красная линия — пъедестальная гистограмма без засветки ФЭУ, черная линия — гистограмма с засветкой ФЭУ светодиодом с интенсивностью около 0.1 фотоэлектрона.

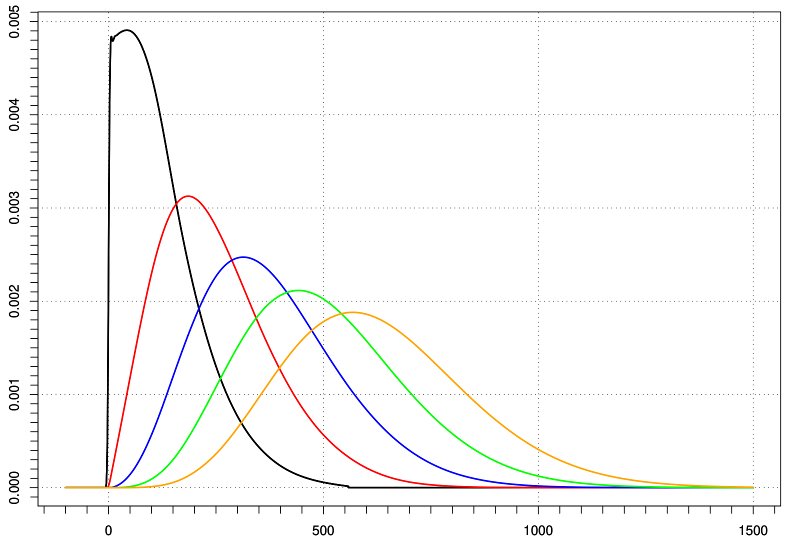

Рис. 6: Несколько сверток одноэлектронного спектра

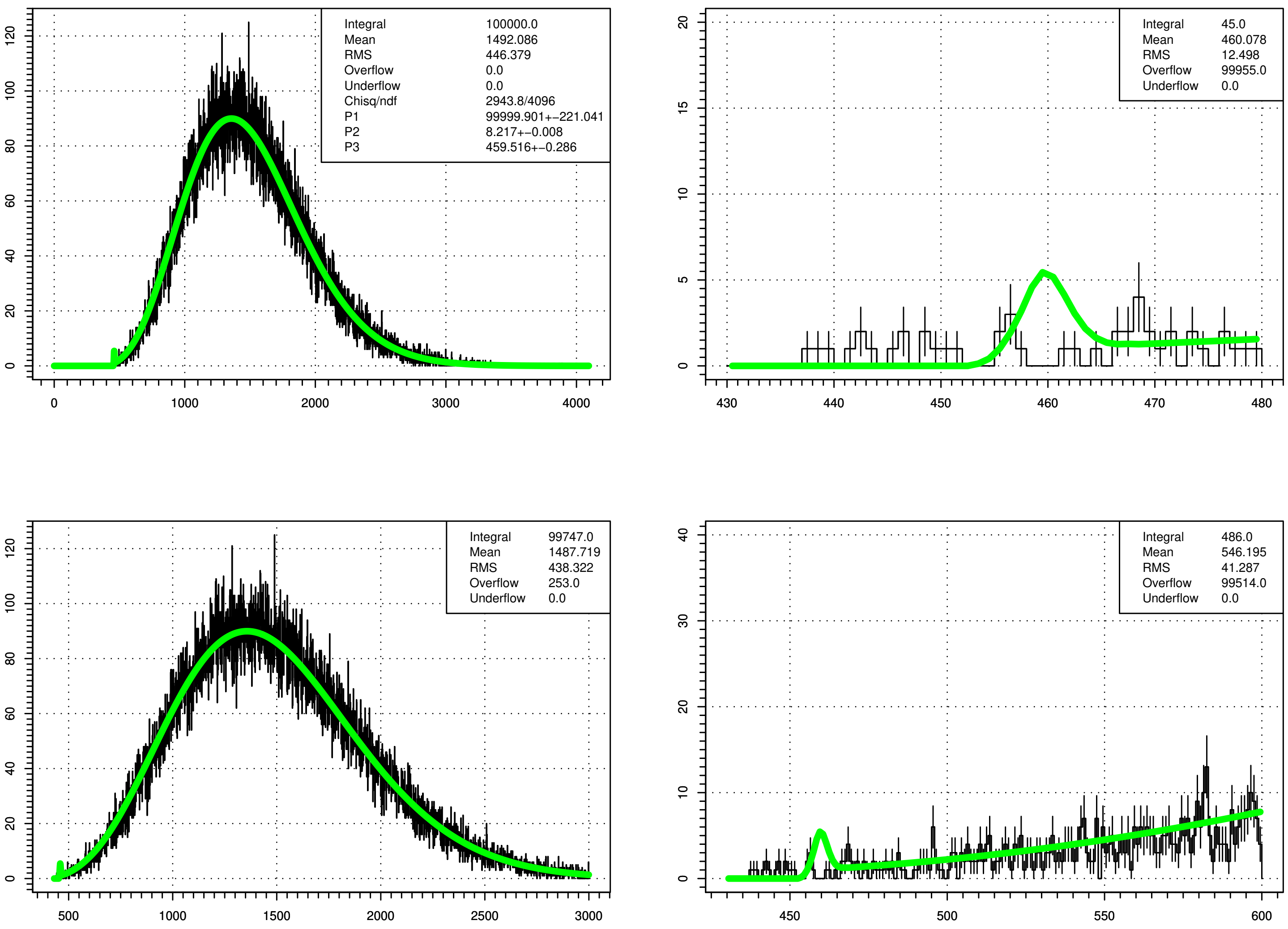

Рис. 7: Спектр с ФЭУ, засветка светодиодом, измерение 1. Параметры фита: P1 — нормировка, P2 — число фотоэлектронов, P3 — пьедестал.

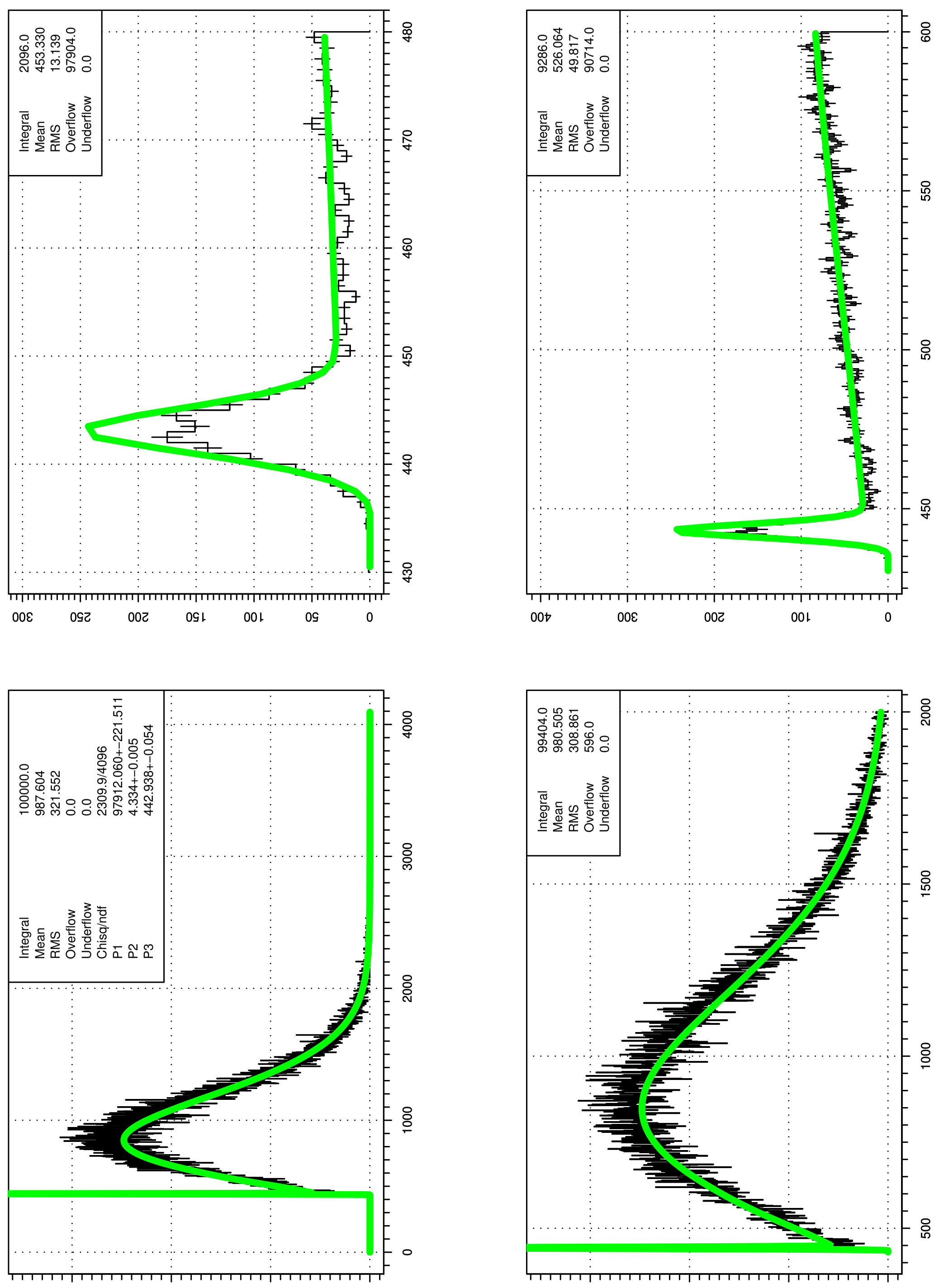

Рис. 8: Спектр с ФЭУ, засветка светодиодом, измерение 2. Параметры фита: P1 — нормировка, P2 — число фотоэлектронов, P3 — пьедестал.

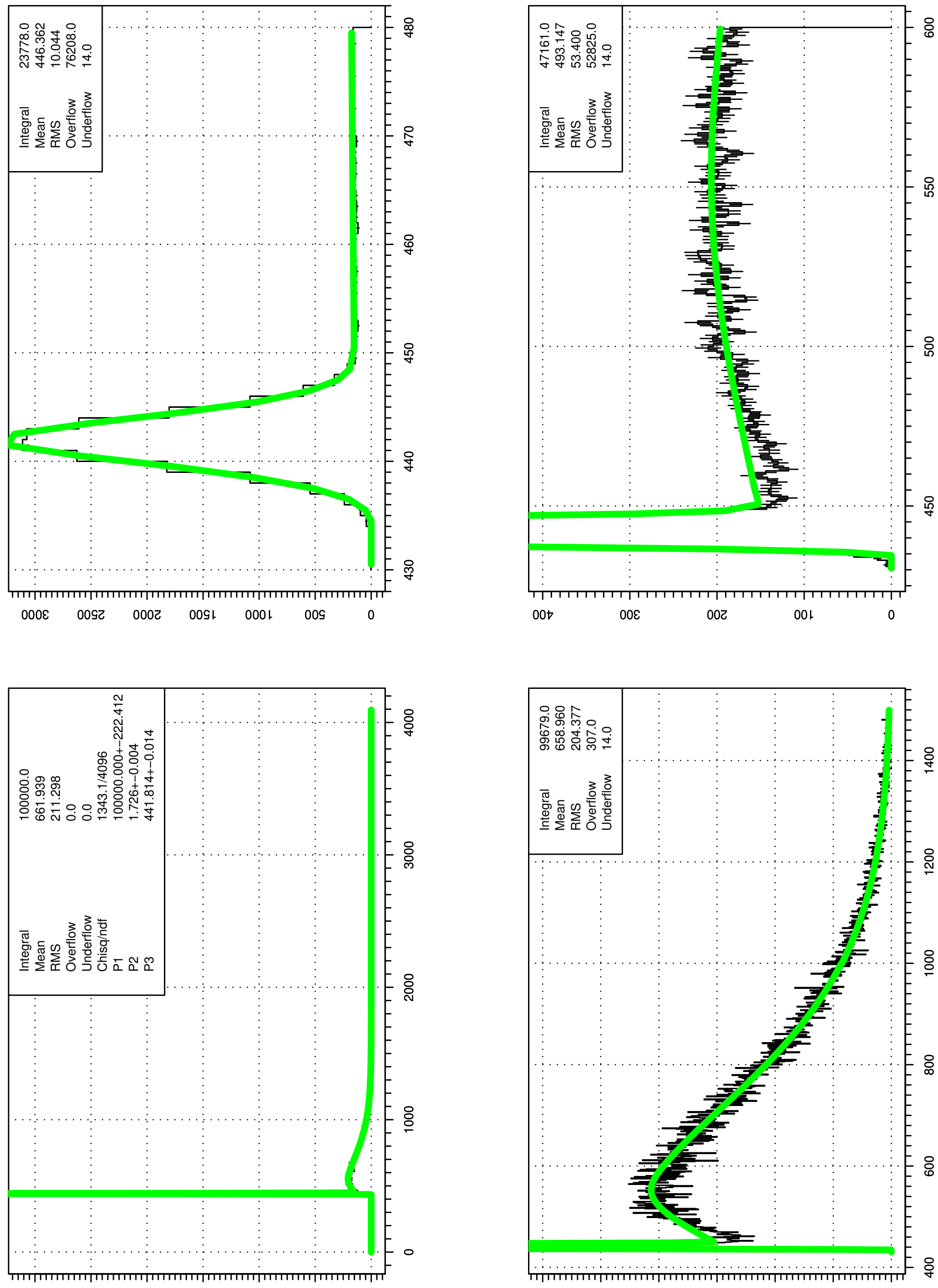

Рис. 9: Спектр с ФЭУ, засветка светодиодом, измерение 3. Параметры фита: P1 — нормировка, P2 — число фотоэлектронов, P3 — пьедестал.

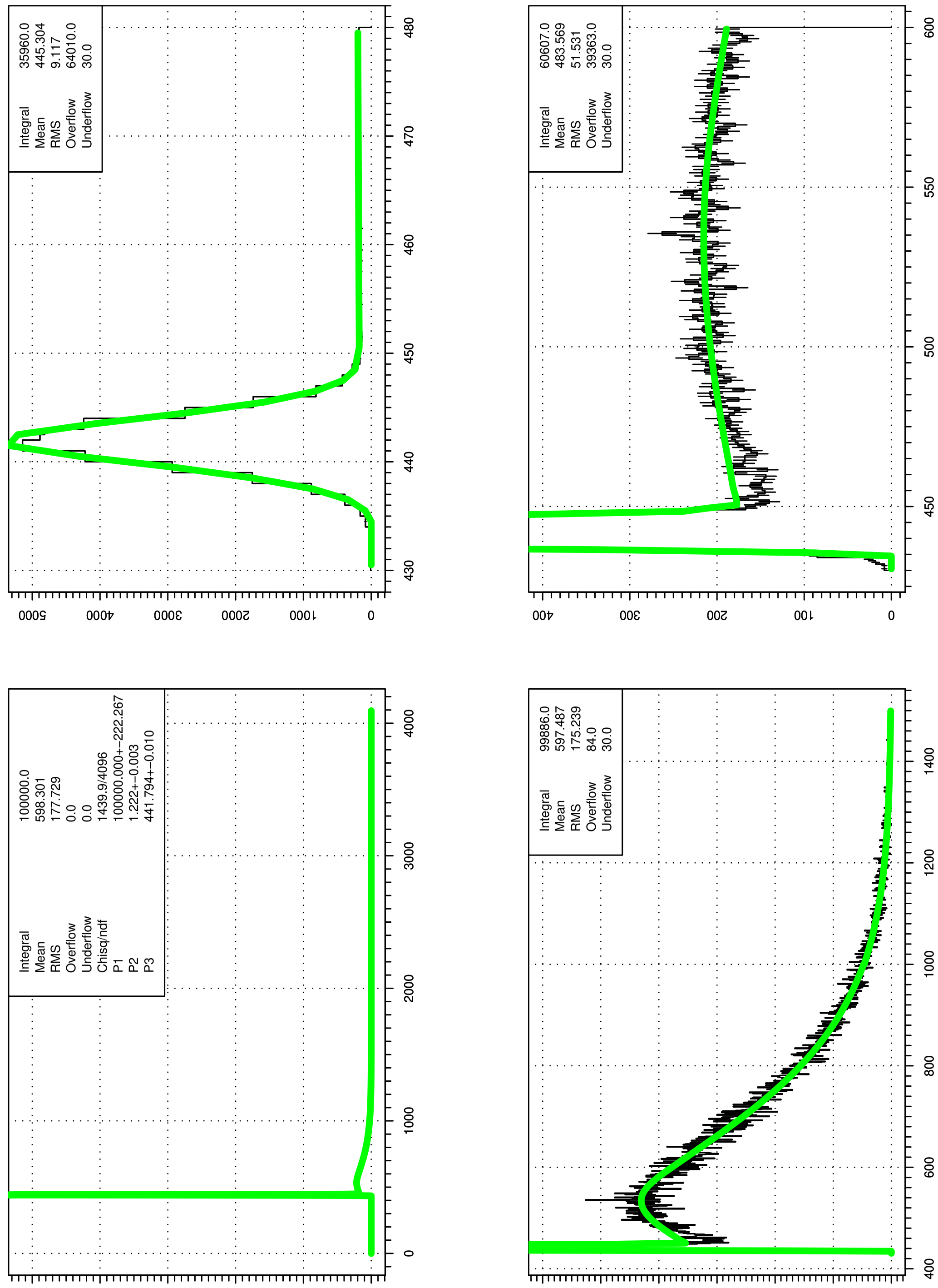

Рис. 10: Спектр с ФЭУ, засветка светодиодом, измерение 4. Параметры фита: P1 — нормировка, P2 — число фотоэлектронов, P3 — пьедестал.

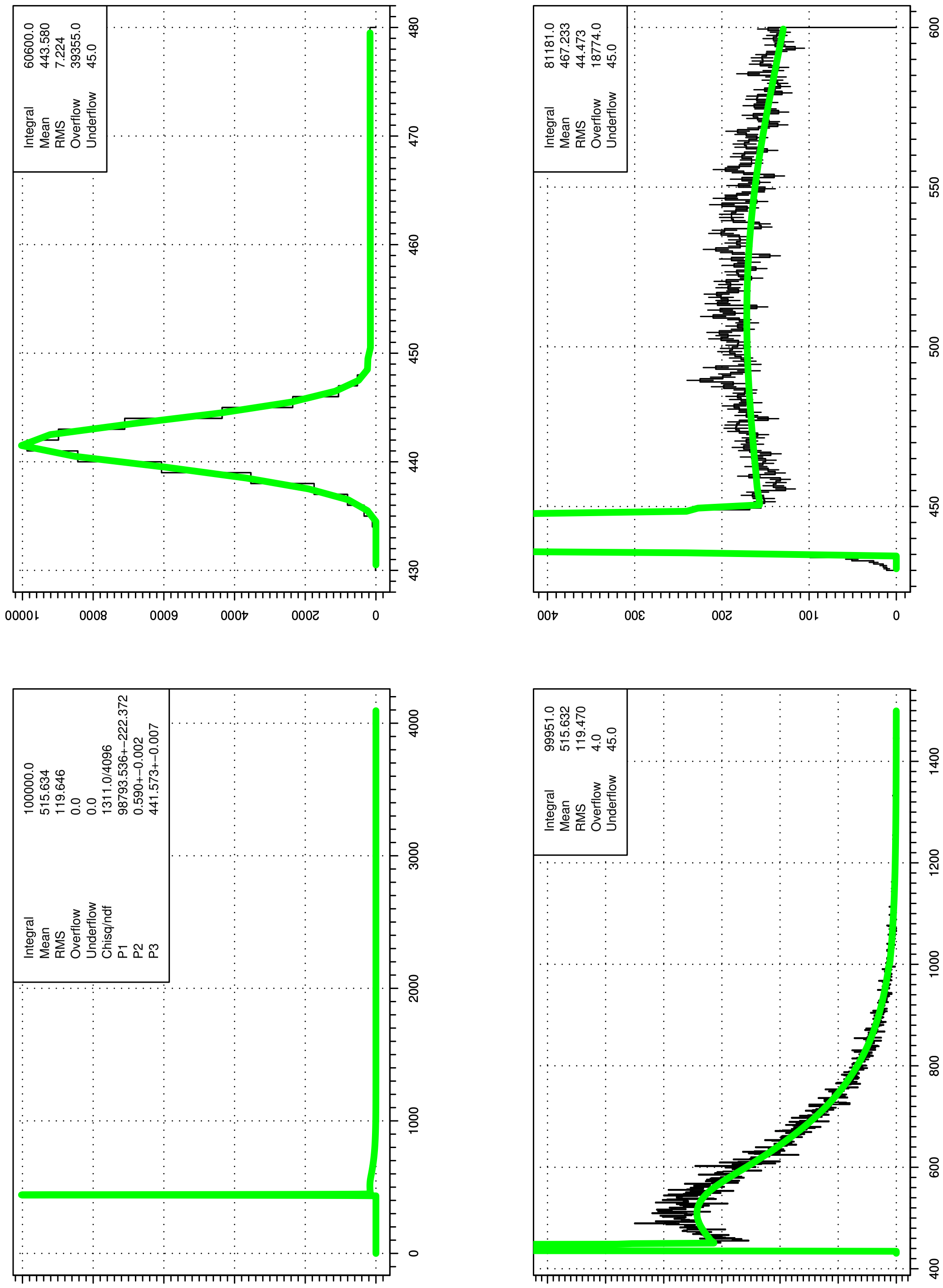

Рис. 11: Спектр с ФЭУ, засветка светодиодом, измерение 5. Параметры фита: P1 — нормировка, P2 — число фотоэлектронов, P3 — пьедестал.

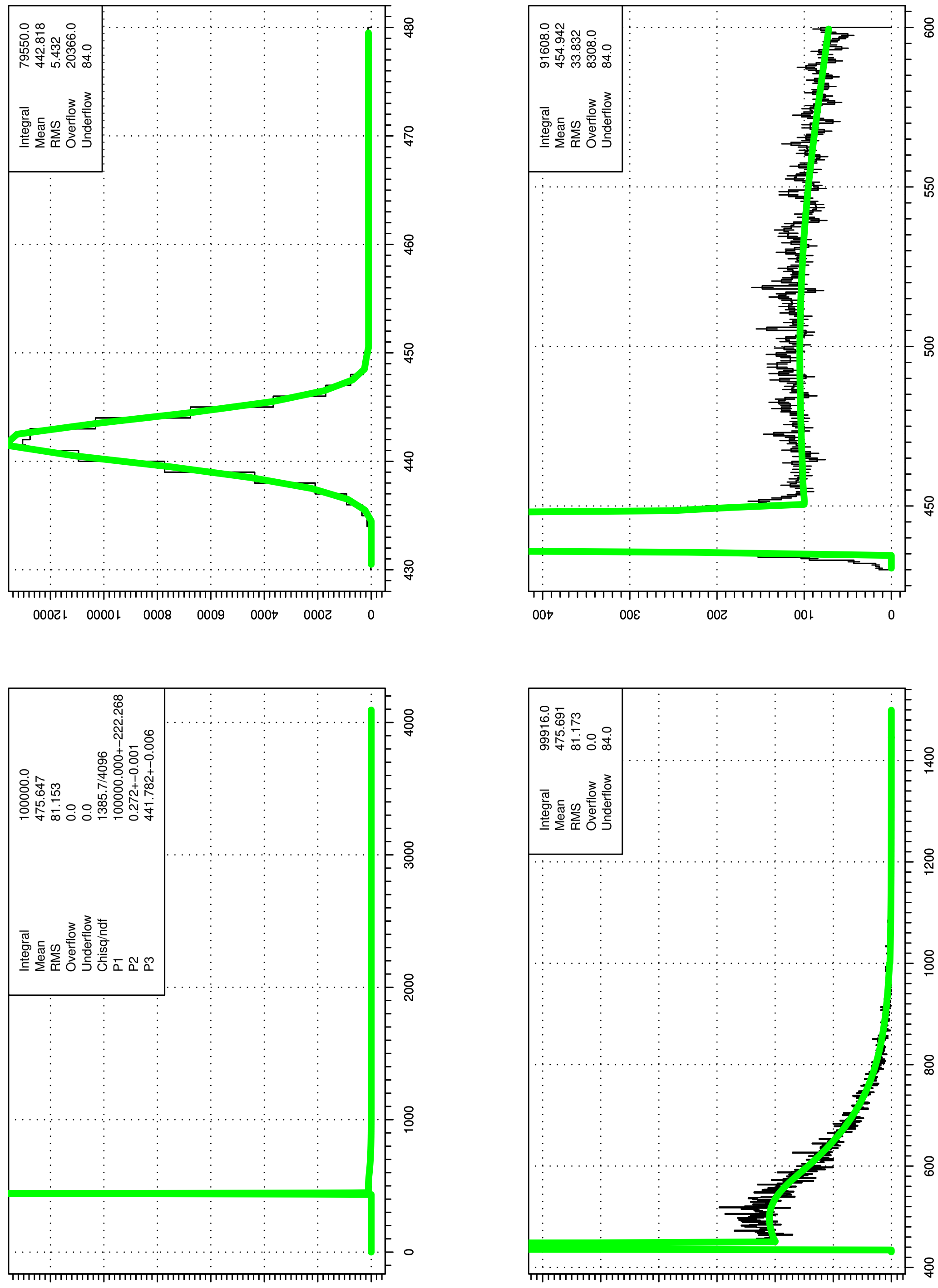

Рис. 12: Спектр с ФЭУ, засветка светодиодом, измерение 6. Параметры фита: P1 — нормировка, P2 — число фотоэлектронов, P3 — пьедестал.

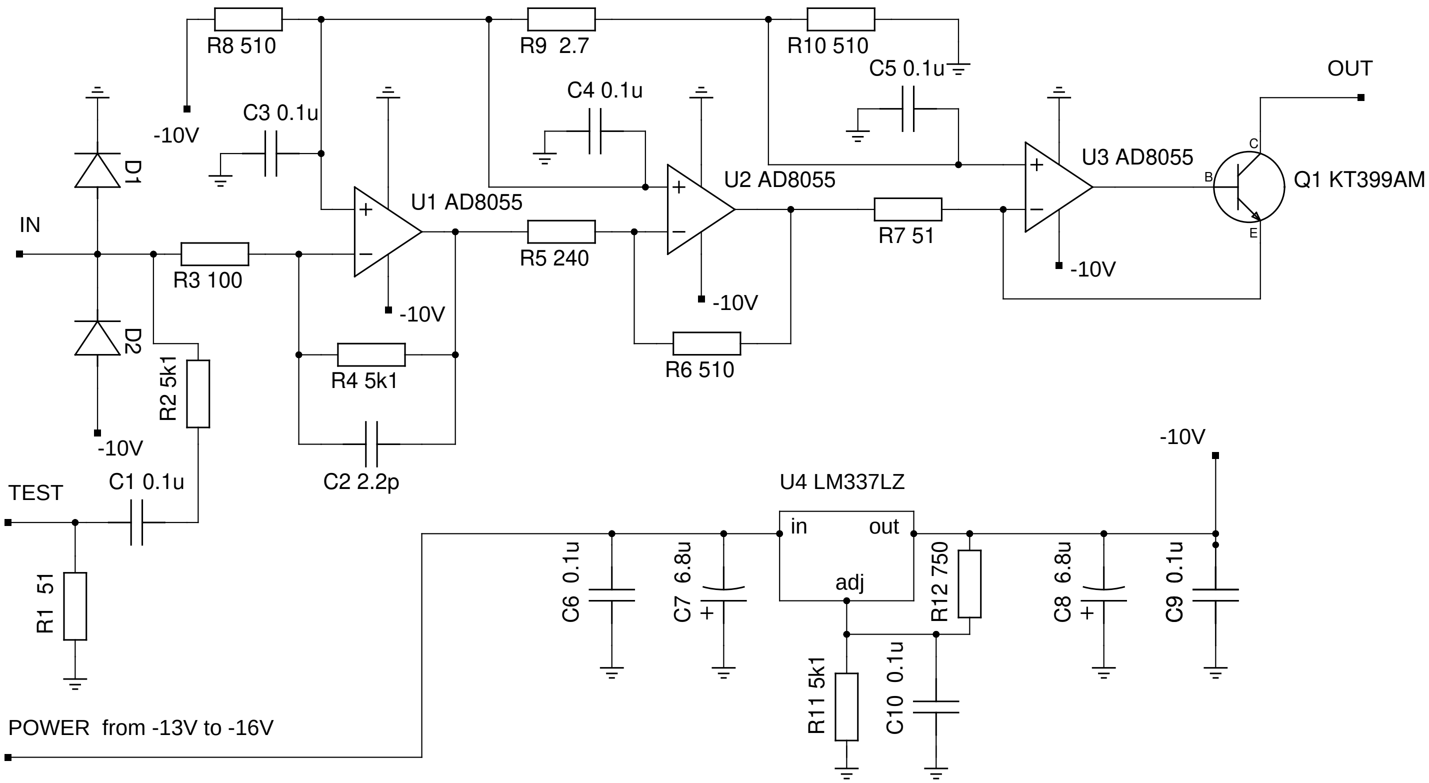

Рис. 13: Схема усилителя.