

# Магнитные усилители в источниках питания

Андрей Мельников (г. Новосибирск)

Статья рассказывает об оригинальном источнике питания, работающем при трапецевидной форме напряжения. В источнике отсутствуют потери на переключение силовых транзисторов, при этом он гораздо проще резонансных стабилизаторов.

В своё время классические магнитные усилители (МУ) были подробно описаны в различной литературе – как в популярной, так и в научной. Затем по понятным причинам интерес к МУ исчез, и теперь мало кто ими интересуется, а ещё меньше тех, кто понимает принцип действия МУ и умеет их применять.

За последние несколько лет в продаже появились довольно дорогие источники питания для ПК, в которых осуществляется дополнительная стабилизация в каналах с помощью так называемых «быстрых» МУ. Правда, техника их применения – совсем иная, нежели классических усилителей.

«Быстрые» МУ известны давно, а принцип их работы очень простой. Точно так же, как и их классические собратья, они используют нелинейный характер кривой намагничивания магнитного материала, из которого изготовлен сердечник усилителя.

В простейшей схеме с неуправляемым магнитным усилителем (см. рис. 1), для упрощения рассуждений, L1 будем считать индуктивностью, а ёмкость конденсатора вы-

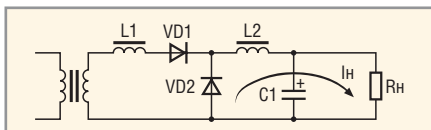


Рис. 1. Упрощённая схема неуправляемого МУ

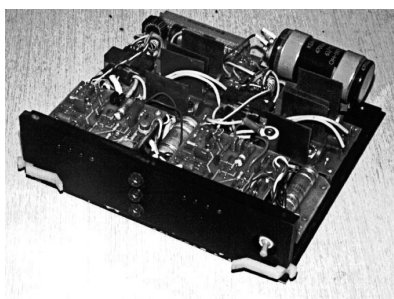


Рис. 2. Внешний вид источника питания

ходного фильтра C1 – бесконечно большой. Положим также, что в начальный момент через диод VD2, индуктивность L2 и сопротивление нагрузки  $R_H$  протекает некоторый номинальный ток  $I_H$ , а остаточная индукция в сердечнике L1 равна  $B_r$ .

Пусть с обмотки трансформатора поступают импульсы с амплитудой  $U$ , имеющие длительность  $t$  и период следования  $T_{in}$ . Под воздействием импульса индукция в сердечнике магнитного усилителя линейно нарастает, а вместе с ней нарастает и ток через его обмотку. Спустя время  $t_{off} = (B_s - B_r)wS/U$  индукция в сердечнике достигает своего максимального значения  $B_s$ , и индуктивность L1 резко падает. Степень уменьшения индуктивности зависит от применённого материала и геометрии сердечника. Например, усилитель на кольцеобразном сердечнике из феррита 2000НМ1 изменит свою индуктивность примерно в 50 раз. Во столько же раз быстрее начнёт нарастать ток через L1, который очень быстро сравняется с током дросселя фильтра  $I_H$ . В этот момент ток через диод VD1 становится равным нулю (диод закрывается), и схема превращается в простой индуктивный делитель напряжения.

Напряжение в точке соединения L1 и L2 является входным для силового фильтра, поэтому элементы схемы рассчитываются так, чтобы индуктивность МУ в состоянии «включено» была много меньше индуктивности дросселя фильтра. В этом случае амплитуда импульса на входе фильтра будет близка к  $U$ , а его длительность будет равна  $t_n = t - t_{off}$ .

В первом приближении выходное напряжение определяется выражением  $U_{out} = Ut_n/T_{in}$ , из которого вытекают возможные способы управле-

ния: изменением частоты следования импульсов и/или изменением продолжительности «выключенного» состояния МУ, т.е.  $t_{off}$ . Первый способ более или менее очевиден, второй реализуется путём изменения стартовых условий для очередного цикла – изменением величины индукции в сердечнике путём принудительного перемагничивания вперёд или назад во время «холостого хода» МУ.

Моё знакомство с магнитными усилителями состоялось около пятнадцати лет назад. В тот момент наша компания остро нуждалась в источнике для питания своей аппаратуры. Получив несколько откровенно неудачных опытных образцов от разных людей и компаний, мы почти отчаялись к тому моменту, когда из Новосибирского Академгородка привезли прибор, показанный на рисунке 2. Однако принципиальную схему нам удалось получить не с первого раза, и даже описание работы источника впоследствии пришлось сделать самостоятельно. К нашему удивлению, очень скоро выяснилось, что при всей своей неказистости данный источник питания оказался наделённым достоинствами, недостижимыми для его классических собратьев. Впоследствии решения, применённые в этом источнике, дали идеологический толчок развитию целой «ветви» в наших разработках.

На первый взгляд, источник чрезвычайно простой (упрощённая схема одного из каналов приведена на рисунке 3). Входное напряжение поступает на двухтактный автогенераторный преобразователь, построенный на элементах VT1, VT2 и T1. Причём построен этот преобразователь по схеме, не самой оптимальной для преобразователя мощностью 100 Вт – с насыщением силового трансформатора. Импульсное напряжение с вторичной обмотки этого трансформатора поступает на магнитный усилитель L1, L2. Схема управления СУ вроде бы сравнивает выходное напряжение с эталоном и управляет МУ.

Включаю осциллограф. Выбираю для наблюдения напряжение на коллекторе силового транзистора. Трапеция?! Мгновенно выключаю источник. Ощупываю теплоотвод, – холодный! Включаю снова, контролирую нагрев. Внимательно рассматриваю трапецию: правильная, симметричная форма, время спада и нарастания

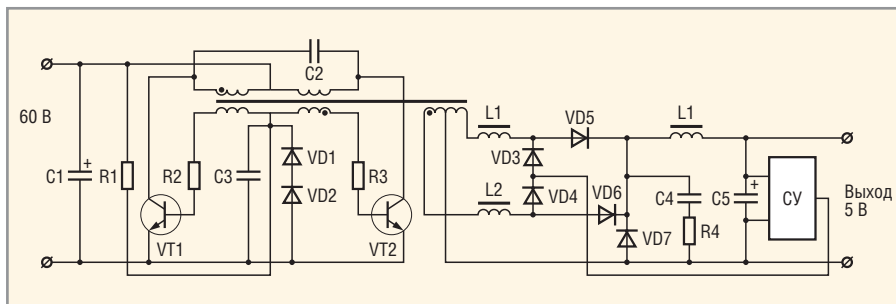


Рис. 3. Упрощённая принципиальная электрическая схема источника питания

импульса составляет 15..20% от его общей длительности. Зная, как должен работать двухтактный автогенератор, я понимал, что, находясь так долго в линейной области, транзистор просто обязан разогреться. Переключая щуп на базовую обмотку трансформатора, включаю второй канал осциллографа и наблюдаю коллекторное напряжение и напряжение базовой обмотки одновременно. Теперь становится понятно, почему транзистор не греется (см. рис. 4), но действительно ли это – двухтактный автогенератор со средней точкой?

Обращаю внимание на то, что базовые обмотки этого преобразователя намотаны не на центральном керне Ш-образного сердечника, вместе с коллекторными, а на боковом. Известно, что в автогенераторном преобразователе требуется приличная магнитная связь между коллекторной и базовой обмотками, иначе он может не запуститься. Что происходит с магнитопроводом при насыщении? В нём прекращается рост магнитного потока (или индукции).

«Фокус» заключается в том, что коллекторная и базовая обмотки разнесены в пространстве, и магнитная связь между ними осуществляется только через магнитопровод. Насыщаясь, магнитный материал препятствует дальнейшему нарастанию потока через него (следовательно, и через сечение витков базовой обмотки), и э.д.с. базовой обмотки падает практически до нуля.

В результате к базовым резисторам прикладывается отрицательное напряжение конденсатора C3 (около 1,5 В), и в открытом транзисторе начинается процесс рассасывания избыточных носителей. В момент выхода силового транзистора из насыщения ток его коллектора начинает резко уменьшаться, но быстрому росту коллекторного потенциала препятствует имеющий непривыч-

но большую ёмкость конденсатор C2 (0,1 мкФ), обеспечивая очень эффективное демпфирование. Очевидно, что этот конденсатор и формирует наблюдаемую трапецию.

Итак, напряжение на коллекторной обмотке начинает практически линейно уменьшаться. Однако напряжение в базовых обмотках сможет появиться только тогда, когда вновь начнёт изменяться магнитный поток в сечении витков её обмотки, т.е. в боковом керне. Но всё это время магнитный поток в сечении коллекторной обмотки только нарастал, вытесняясь в воздушное пространство вокруг центрального керна, и будет продолжать расти, пока не изменится полярность приложенного к ней напряжения. Только в этот момент поток в сечении коллекторной обмотки начнёт уменьшаться.

Однако, прежде чем начнёт уменьшаться поток в боковом керне, поток через сечение коллекторной обмотки должен вернуться к значению, которое он имел в момент насыщения магнитопровода, а на это потребуются столько же времени, сколько пройдёт между моментами его насыщения до смены полярности на обмотке. И только после этого на базовых обмотках вновь появится напряжение. То есть ток в базу транзистора второго плеча будет подан в тот момент, когда напряжение на его коллекторе будет уже нулевым.

Важно, что такая работа схемы возможна благодаря наличию на вторичной стороне магнитных усилителей – они эффективно «отключают» от автогенератора шунтирующее действие выходного выпрямителя и LC-фильтра, позволяя ему (и даже помогая накопленной энергией) свободно перейти из одного устойчивого состояния в другое.

Таким образом, преобразователь работает так, что транзисторы имеют нулевые потери при переключении!

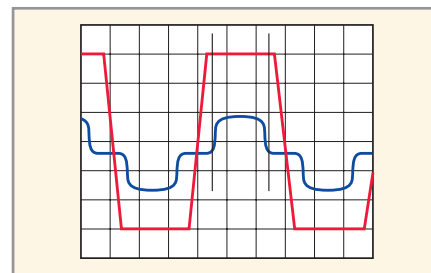


Рис. 4. Эюры напряжений на базе и коллекторе силового транзистора

Трапециевидная форма напряжений, отсутствие ударных токов при включении транзисторов, связанных с нулевым временем восстановления выпрямительных диодов и наличием паразитных емкостей, уменьшают спектр излучаемых помех до уровней, считавшихся доступными только резонансным преобразователям.

### Выводы

Достоинства описываемого источника питания:

- простой и, благодаря этому, надёжный;
- излучает низкий уровень помех;
- транзисторы преобразователя, переключаясь при нулевом напряжении, работают в безопасной области, не испытывают импульсных перегрузок и не имеют потерь на переключение;
- выгодно отличается от резонансных преобразователей тем, что его элементы работают при амплитудах токов и напряжений классических импульсных преобразователей;
- позволяет добавлять выходные каналы с независимой стабилизацией. Недостатки:
- перемагничиваясь на высокой частоте по полной петле, силовой трансформатор сильно греется, поэтому разработчикам пришлось установить его с теплопроводящим компаундом на металлическое шасси;
- есть проблемы с обеспечением режима холостого хода.

Возможно ли, сохранив лучшее, избавиться от недостатков этой схемы? Оказалось, что возможно, и не единственным способом. Впоследствии было разработано и применено в различных изделиях несколько вариантов схемы; среди них были и двухтактные, и однотактные, с различными способами управления выходным напряжением. Об этом – в другой статье.

