Плавный заряд емкости:

что выбрать?

Решению задачи ограничения зарядного тока посвящено немало работ, в которых описаны устройства так называемого «мягкого включения». В этом обилии схемных решений бывает трудно выбрать то, которое оптимально подходит для решения поставленной задачи. В данной статье рассмотрены базовые методы плавного заряда конденсатора и сделаны соответствующие выводы о целесообразности использования конкретного решения в конкретных ситуациях.

Павел Новиков
Николай Гриднев

При разработке частотных преобразователей, драйверов управления электродвигателями, мощных выпрямителей и т. д. возникает проблема с ограничением зарядного тока сглаживающего конденсатора большой емкости, установленного на выходе сетевого выпрямителя или на шинах питания инвертора. Зачастую разработчиком этап заряда емкости фильтра недооценивается или попросту игнорируется. Причина такого отношения в устойчивости диодов и тиристоров к ударным токам, возникающим при заряде емкости. Частично такой подход оправдан; даже диоды на несколько десятков ампер совершенно безболезненно переносят токи, возникающие, например, при заряде конденсатора 470 мкФ непосредственно от сети 220 В. Но тем не менее рано или поздно такой преобразователь выйдет из строя: большие токи заряда неизбежно приводят к деградации конденсаторов и к разрушению диодов. Таким образом, неиспользование специальных средств ограничения зарядного тока может привести к выходу из строя элементов входных цепей, что, в свою очередь, практически наверняка влечет за собой выход из строя всех силовых цепей преобразователя.

В сущности, все методы «мягкого включения» сводятся к нескольким основным вариантам, а именно: заряд с помощью зарядного резистора, заряд с помощью термистора, заряд с помощью транзисторов и заряд с помощью тиристоров. Все они имеют множество схемных вариаций и довольно широко используются на практике. Вопрос в том, что выбрать. Попробуем разобраться.

Заряд с помощью зарядного резистора

Структурная схема такого способа приведена на рис. 1.

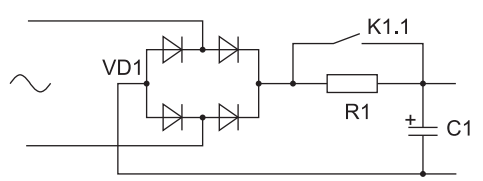

Рис. 1. Структурная схема заряда с помощью зарядного резистора

При включении контакт реле K1.1 разомкнут, и зарядный ток ограничивается резистором R1. По истечении определенного времени и/или по достижении напряжением на конденсаторе определенного порога замыкается контакт реле K1.1, шунтируя резистор R1. Существуют и более сложные вариации данной схемы: используется резистивная матрица и поочередно подключаются резисторы. Таким образом можно зарядить большую емкость за относительно малое время с сохранением приемлемого среднего тока заряда. Однако данный способ не нашел широкого применения, поскольку его минусами являются относительная сложность и большие габариты, а таких задач, где требуется быстрый заряд конденсатора большой емкости, не так много.

Заряд с помощью зарядного резистора, пожалуй, наиболее распространенный способ «мягкого включения». Популярность этого метода объясняется простотой и дешевизной реализации, очень высокой надежностью (при правильно подобранной мощности резистора даже при КЗ в нагрузке схема из строя не выйдет), применимостью в цепях как переменного, так и постоянного тока. Но имеются у данного метода и свои минусы. Основные из них следующие:

- Даже при невключенном реле нагрузка находится под напряжением (через резистор). Чтобы обесточить нагрузку, необходимо ставить дополнительное реле либо в силовой цепи, либо в цепи резистора, что, в свою очередь, значительно усложняет схему.
- Резистор подбирается один раз под конкретную активную и емкостную нагрузку; если нагрузка изменяется, то при отсутствии соответствующих защит схема может выйти из строя. Например, не была отключена нагрузка, напряжение на нагрузке через 1 с достигло не 300, а 5 В, включилось реле, далее большой ток заряда и выход из строя.
- Если реле включается по пороговому напряжению на конденсаторе, то данная схема неустойчива к провалам напряжения на нагрузке, возникающим, например, при запуске двигателя от маломощной сети: напряжение просядет, реле отключится и питание нагрузки будет осуществляться через зарядный резистор, от чего он, вероятнее всего, сгорит.

Разумеется, все эти недостатки не так сложно обойти, установив дополнительное реле, схемы перезапуска, схемы контроля напряжений на входе

и выходе резистора и т. д. Но тогда такой метод лишается основных преимуществ — простоты и дешевизны.

Таким образом, данный способ плавного заряда целесообразно использовать в схемах со стабильной нагрузкой и стабильным напряжением питания, в ремонтопригодных устройствах, допускающих сбои (точило в гараже). В том случае, если используется сложная схема управления, зарядный резистор имеет смысл использовать при заряде очень больших емкостей в десятки и сотни тысяч микрофарад, когда даже тиристоры могут выйти из строя, например при недопустимо больших значениях *dI/dt*. Если же требуется работа устройства заряда в различных режимах нагрузки и питания, то данный метод использовать нецелесообразно; конечная схема будет сложнее, чем схема управления тем же зарядным транзистором.

Заряд с помощью зарядного термистора

Структурная схема заряда с помощью термистора изображена на рис. 2.

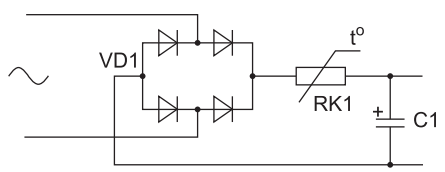

Рис. 2. Структурная схема заряда с помощью термистора

При включении термистор RK1 обладает большим сопротивлением, ограничивая зарядный ток конденсатора C1. По мере разогрева сопротивление термистора уменьшается, в результате чего на нем уменьшается падение напряжения и уменьшается выделяемая мощность. В итоге выход выпрямителя и нагрузка соединяются почти накоротко.

Данный способ очень прост, надежен, не требует никаких дополнительных схем, однако в мощных преобразователях он не нашел широкого применения по следующим причинам:

- Как и в предыдущем случае, без дополнительного реле нагрузка будет находиться под напряжением.
- Схема крайне плохо «переваривает» смену нагрузки. Например, на холостом ходу двигатель потребляет 1 А, а под нагрузкой 10 А. Если термистор выбран на минимальное сопротивление при 10 А, то на 1 А длительного тока его сопротивление будет недопустимо высоко; а если на 1 А, то при 10 А он может сгореть.
- Остаточное сопротивление термистора даже после разогрева оказывается недопустимо высоким при работе на большую нагрузку, что, во-первых, приводит к существенным тепловым потерям на самом термисторе, а во-вторых, ограничивает ток нагрузки, что может оказаться неприемлемым, например, если требуется запуск двигателя при сохранении номинального пускового момента.

Метод заряда с помощью термистора оптимален для преобразователей мощностью не более сотен ватт; для более «серьезных» преобразователей потери на термисторе оказываются слишком большими и, плюс к тому, недопустимо снижается надежность устройства в целом.

Указанные методы, если не применять дополнительных схем, являются пассивными способами плавного заряда конденсаторов; далее речь пойдет о заряде с помощью активных элементов: транзисторов и тиристоров.

Заряд с помощью транзисторов

Структурная схема этого способа показана на рис. 3.

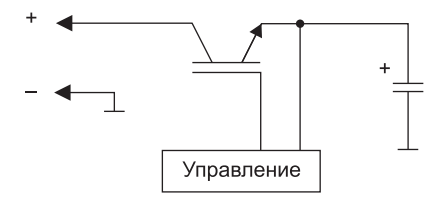

Рис. 3. Структурная схема заряда с помощью зарядного транзистора

В зависимости от управления для этой схемы существуют два основных режима: статический и динамический. Статический режим подразумевает работу транзистора на активном участке его ВАХ таким образом, что сопротивление его канала оказывается достаточно большим, чтобы ограничить ток заряда. Фактически в таком режиме транзистор используется как переменный резистор. Такое управление используется не часто в виду больших тепловых потерь на кристалле транзистора в процессе заряда, изменения параметров транзистора — в частности, при изменении температуры, и, в конечном итоге, из-за низкой надежности такого способа в целом. Другой режим — динамический — накачка емкости кратковременными импульсами. Такой способ плавного заряда гораздо более популярен и используется, например, в МККНМ («Электрум АВ»), о нем уже шла речь в статье «Контроль напряжения ПЧ: проблемы и решения», а потому здесь отметим только основные достоинства и недостатки.

Достоинства заряда емкости указанным способом следующие:

- возможность работы от постоянного напряжения питания;
- некритичность к напряжению питания и к емкостному сопротивлению нагрузки;
- возможность реализации защиты нагрузки от КЗ, в том числе и кратковременного;
- малые габариты в сравнении с резистивным (а тем более резистивно-транзисторным) способом заряда;
- при закрытом транзисторе нагрузка не находится под напряжением.

Но есть у этой схемы и недостатки:

- Относительно меньшая устойчивость к броскам тока в сравнении с тиристорами и тем более резисторами.
- Длительный заряд больших емкостей (в течение секунд и даже десятков секунд), что обусловлено ОБР транзистора: так как скважность сигнала велика, эквивалентное сопротивление цепи заряда тоже велико; если же скважность уменьшить, то вероятность перегрева транзистора (и его выхода из строя) может оказаться неприемлемо высока. Таким образом, применять данную схему для емкостей более нескольких тысяч микрофарад нецелесообразно.
- Сложность схемы управления, необходимость гальванической развязки цепей управления от цепей затвор–эмиттер транзистора.

Тем не менее данный способ подкупает своею универсальностью, надежностью работы в связке с транзисторным инвертором и способностью работать как на переменном, так и на постоянном питающем напряжении. Фактически данный способ является оптимальным для создания надежных систем с непостоянными параметрами питания и нагрузки для мощностей от единиц до нескольких десятков киловатт, если, конечно, габариты схемы управления позволяют создать адекватный алгоритм работы такого рода накачки емкости.

Заряд с помощью тиристоров

Пожалуй, наиболее распространенный способ заряда в сетях переменного тока. Пример схемной реализации такого способа приведен на рис. 4.

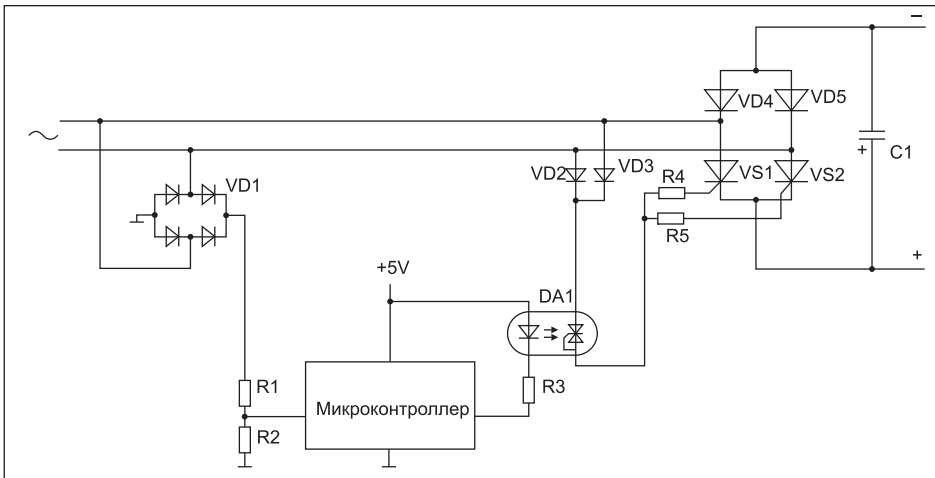

Рис. 4. Схема заряда емкости с помощью тиристоров

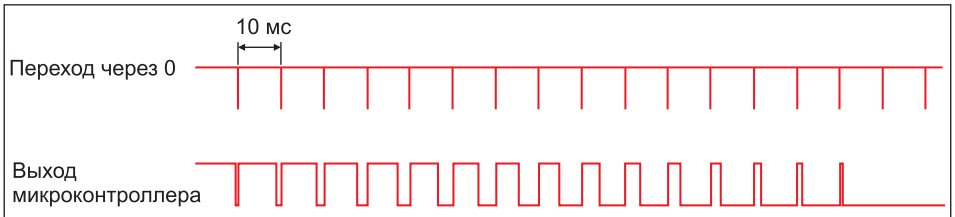

Рис. 5. Диаграмма заряда конденсатора

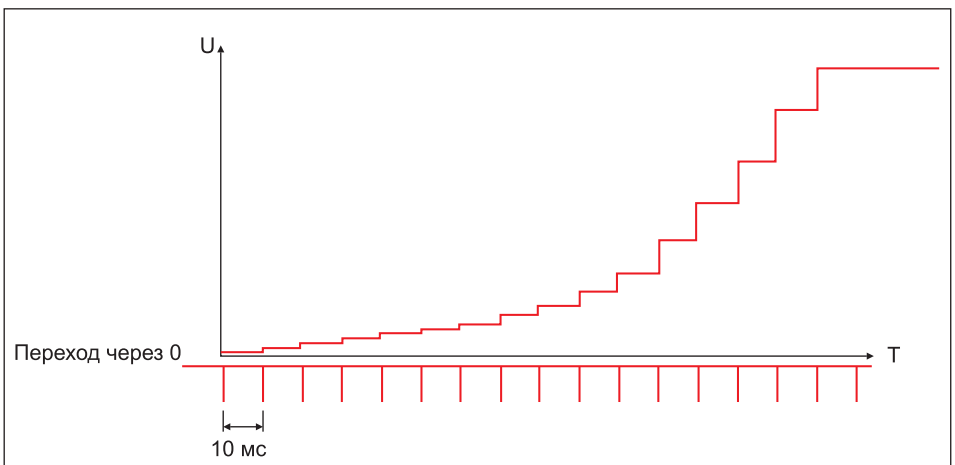

Рис. 6. График изменения напряжения на конденсаторе нагрузки

Данная схема применена в устройстве плавного заряда емкости фильтра приборов типа М31 («Электрум АВ»). Ее принцип работы основан на ступенчатом отпирании тиристоров управляемого моста VS1, VS2, начиная с минимального угла и заканчивая полным открытием. Заряд конденсатора происходит за 15 полуволн, т. е. за 150 мс. Этого времени вполне достаточно для ограничения зарядного тока конденсатора большой емкости. Диаграмма, поясняющая работу схемы заряда конденсатора, приведена на рис. 5.

Пульсирующее напряжение с частотой 100 Гц снимается с диодного моста VD1, уменьшается делителем R1, R2 до необходимого значения, по которому микроконтроллер определяет переход через 0, и по заложенной характеристике открывает оптопару DA1, которая в свою очередь открывает тиристоры VS1 и VS2. Открывается тот тиристор, на аноде которого относительно катода находится положительная полуволна. После 15 полуволн тиристоры остаются постоянно открытыми. Тиристоры и диоды выбираются в зависимости от входного напряжения и тока нагрузки. На рис. 6 изображен график изменения напряжения на конденсаторе C1 при его заряде.

Схему заряда емкости можно доработать, заведя на дополнительный вход АЦП микроконтроллера сигнал с токового датчика. При превышении допустимого тока совместно с основной защитой силовых ключей (частотные преобразователи, модули управления двигателями и т. д.) закроются тиристоры управляемого моста. Также можно привнести управление третьим тиристором (для трехфазной сети), индикацию заряда и т. д. Но тем не менее общий принцип заряда остается тем же.

Преимущества следующие:

- относительная простота реализации (в сравнении со схемой управления для транзистора), не требуются гальваническая развязка, преобразователь питания и т. д.;
- относительно меньшая критичность к изменению напряжения питания (минимальный порог обусловлен делителем на резисторах R1, R2);
- устойчивость к изменению нагрузки, к импульсным токам большой амплитуды;
- малые габариты, т. к. не требуется дополнительных устройств, помимо собственно выпрямительного моста.

Недостатки:

- возможность работы только от сети переменного напряжения;
- невозможность реализации быстрой защиты нагрузки от КЗ: например, для выхода из строя транзистора инвертора достаточно нескольких десятков микросекунд, в то время как тиристоры не закроются ранее, чем закончатся соответствующие полуволны, а это десятки миллисекунд.

В целом же плавный заряд емкости на тиристорах в цепях переменного тока обладает явными преимуществами по части габаритов в сравнении с резистором, простотой в сравнении с транзистором и возможностью работы практически при любых мощностях. Применение же микроконтроллера в такой схеме еще больше упрощает реализацию схемы управления.

Таблица. Выбор способов заряда емкости нагрузки

	Резистор	Резистор + управление	Термистор	Транзистор	Тиристор
Работоспособность на постоянном напряжении источника	+	+	+	+	–
Работоспособность при изменении напряжения питания и/или нагрузки	–	+	–	+	+
Работоспособность на больших мощностях	+	+	–	+	+
Отсутствие питания нагрузки в выключенном режиме	–	+	–	+	+
Простота схемы управления	+	–	+	–	+

Выводы

В итоге можно составить таблицу выбора способа заряда емкости фильтра. Выше было рассмотрено четыре основных способа, в таблице же их пять; добавлен комбинированный способ заряда с помощью резистора и схемы управления (с контролем напряжений, токов, перезапуском). В этом случае под собственно резистивным зарядом подразумевается такая схема, где резистор шунтируется оптореле (и т. п.), либо по достижении напряжением на конденсаторе определенного порога (например, соответствующего току засветки светодиода оптореле), либо по истечении определенного времени (RC-цепочка, установленная по включению оптореле со входа напряжения питания).

Таким образом, зная требования к системе и исходя из предложенной таблицы, можно определиться с выбором оптимальной схемы «мягкого включения». Например, если требуется зарядить конденсатор для сети 220 В (±10%) на мощность нагрузки 200 Вт, то оптимальным выбором будет термистор; если сеть та же, но мощность 5 кВт, то оптимальной будет тиристорная схема; если условия те же, но напряжение подается уже выпрямленное, то резистор; если напряжение постоянное, но значительно меняется нагрузка, то транзистор, и т. д. Впрочем, выбор той или иной схемы — во многом вопрос предпочтений разработчика: кому-то нравится одно, кому-то другое. Тем не менее, надеемся, данная статья сможет помочь разработчику в таком нелегком деле, как разработка, и в еще более непростом вопросе — выборе.