

Об особенностях управления силовыми каскадами РПУ в режиме повторно-кратковременного включения

За последние годы в арсенале рентгенологии появляются всё новые и новые системы цифровой визуализации рентгеновского излучения. Повышается их световая чувствительность, контрастная чувствительность, уменьшается время регистрации и др.. Очевидно, что информативность получаемого изображения зависит как от системы регистрации, так и от генерирующего источника рентгеновского излучения (ИРИ). Данные реалии предъявляют всё более жёсткие требования к ИРИ. К примеру, значительная нелинейность в спектральной чувствительности фосфорсодержащих пластин, а так же матричных панелей на основе монокристаллического или аморфного кремния - требует максимально высокой стабилизации анодного напряжения. Тенденция к уменьшению экспозиции, снижающей динамическую нерезкость снимка, а так же уровень накопления темновых шумов детектора – резко повышает требования к фронтам импульса, форма которого должна приближаться к «идеальному» прямоугольнику. Более же короткое время импульса при сохранении экспозиционной мощности дозы требует эквивалентного повышения анодного тока. Другими словами, необходимо повышать мощность РПУ.

Современный интеллектуальный генератор рентгеновского излучения (ГРИ) с выходной мощностью 50-100КВт и более – сложный комплексный прибор, рассматривать его основные блоки необходимо комплексно, так как различные решения высоковольтного силового каскада требуют различного подхода к выбору силовых ключей, а те, в свою очередь, к управляющим драйверам и т.д.. Тем не менее, для детального анализа устройства ГРИ целесообразно его деление на функциональные блоки: 1) рентгеновская трубка (нагрузка); 2) высоковольтный трансформаторно - выпрямительный блок; 3) блок инверторов; 4) блок управления инверторами и внешней синхронизации.

В отдельных статьях мы подробно рассматривали особенности работы рентгеновских трубок как диодного так и триодного типа, расчёт и конструирование высоковольтных трансформаторов с максимально высоким КПД, а так же оптимизацию инверторных драйверов управляющих MOSFET на частотах 120-150КГц. В этой же статье мы хотим поделиться нашими результатами по использованию различных контроллеров в качестве управления драйверами силовых модулей.

Разрабатывая новый блок управления инверторами, мы поставили задачу максимально ускорить время выхода системы на заданный уровень выходного напряжения и тока. Глубина регулировки выходных параметров современного РПУ не менее 80%, а диапазон выходного сопротивления не менее 10^4 Ом. Учитывая, так же, необходимость быстрого изменения выходных параметров - эта группа источников питания наиболее критична в выборе методов регулировки. Анализ РПУ от различных производителей мира показывает, что наиболее частый метод регулировки – комбинированный. Так например в мощных генераторах пр-ва GE используется амплитудная + ШИМ регулировка, в генераторах TOSHIBA серии RX применён метод частотная + ШИМ регулировка, VOLTA в своих мощных генераторах применяет метод предварительной коммутации витков первичной обмотки высоковольтного тр-ра, с последующей ШИМ-коррекцией в процессе экспозиции.

Все вышеперечисленные методы значительно усложняют и удорожают ГРИ. Комбинирование нескольких методов регулировки обусловлены необходимостью

компенсации несовершенства высоковольтного трансформатора. Детальному анализу и расчёту высоковольтных блоков была посвящена отдельная статья, где подробно приводились расчёты и измерения. Хотим, лишь, напомнить о физических ограничениях при конструировании среднечастотных высоковольтных тр-ров. Необходимость удаления вторичной обмотки от магнитопровода (изоляция), а так же в ней большое количество витков - ухудшает магнитную связь, соответственно повышает индуктивность рассеяния. Такие трансформаторы имеют большую инертность изменения $dU_{\text{вп}} / dU_{\text{вн}}$, а это ограничивает скорость выхода системы на заданные условия. Таким образом, комбинированные методы регулировки – это частичная компенсация несовершенства высоковольтного трансформаторно-выпрямительного блока.

При повторно-кратковременном режиме работы используется время выведения трубки на заданный режим (накал, раскрутка анода) для изменения внутренних параметров системы как то: напряжения питания на силовых ключах, степень смещения частоты генерации относительно резонансной, изменение числа витков W_I и т.д..

У нашего коллектива есть опыт разработки систем с различными типами регулировки и управления инверторами. При разработке РПУ с приведёнными внизу параметрами:

Диапазон регулировки выходного напряжения	30-150 кВ;
Диапазон выходного тока	1-1200 мА;
Пульсация выходного напряжения (при $I=1000\text{мкА}$)	не хуже $\pm 2\%$;
Номинальная мощность	120 кВт;
Минимальная экспозиция	0,005с;
Максимальная экспозиция (при $P=120\text{кВт}$)	10с;
Время выхода на уровень стабилизации (при $U_{\text{вых}}=125\text{кВ}$; $U_{\text{вых}}=1000\text{мА}$)	не хуже 600мкс.

мы остановились на методе регулирования выходного напряжения – только изменяя скважность (ШИМ). Этому предшествовала работа по предварительному макетированию различных систем. Результаты изложены в отдельной статье, посвящённой расчёту мощных ВИП инверторного типа. Отметим, лишь, что добиться наиболее короткого фронта удалось на рентгеновской трубке с электронным затвором, сконструированной на базе 25-50БД52-150 (пр-во Россия, АОЗТ «Светлана-Рентген»). Время выхода на стабилизацию $U_{\text{вых}}=125\text{кВ}$; $U_{\text{вых}}=1000\text{мА}$ составило 70мкс, задний фронт импульса - 15мкс. Несмотря на ряд преимуществ работы с трубкой триодного типа, в нашем случае такое решение не подошло. Во-первых: необходима суммарная выходная ёмкость не менее 200нФ, во-вторых: усложнённая система управления катодного узла, с полной гальванической развязкой, в-третьих: превышение габаритных размеров генератора, указанных в ТТЗ. Необходимо так же отметить, что при обозначенных условиях даже самого короткого импульса перейти на полностью накопительную систему оставаясь в разумных габаритах - не представляется возможным (выходная ёмкость не менее $2,5\text{мкФ} \times 150\text{кВ}$). К тому же, напряжение на предварительно заряженном конденсаторе проседает или сразу после выхода на режим, или сразу после выхода на плато, соответственно при «подхватывании» стабилизации генератором отмечается картина «затухающего контура», аналогичная концу переднего фронта на генераторе «прямой» передачи энергии.

Мощный высоковольтный генератор, в котором используется только ШИМ-регуляция, предъявляет чрезвычайно жёсткие требования к силовому высоковольтному трансформатору (или трансформаторам). Именно с его макетирования нужно начинать разработку РПУ. Основная инженерная задача будет заключаться в том, чтобы с одной

стороны, энергии прокачиваемой в цепи первичной обмотки было достаточно для передачи мощности во вторичную обмотку во всём диапазоне скважности, с другой - не превысить верхний порог тока силовых ключей или не насытить магнитопровод. При этом необходимо учитывать: 1) рабочий диапазон распространяется и на малые скважности, 2) чем короче передний фронт, тем больший запас по мощности нужно закладывать в расчёте силового инвертора. По нашему опыту - при формировании импульса $U_{\text{вых}}=125\text{кВ}$; $I_{\text{вых}}=1000\text{мА}$ и длительностью переднего фронта 500мкс, первые 10-15 тактов ток измеренный на транзисторах превышает рабочий, в среднем, в 2,5 раза.

В случае успешного решения конструкции трансформатора, положительные аспекты ШИМ-регулируемого питания налицо. Это возможность быстрого изменения выходных параметров, относительная, техническая простота и экономичность реализации такой схемы.

Различные конструкции драйверов, управляющих силовыми ключами, рассмотрены в отдельной статье. Отмечу лишь, что наиболее эффективная система силового инвертора нами получена на мостовой схеме с параллельно включенными ключами (MOSFET), при чём управление по обратной связи выходным напряжением, а так же ограничением выходного тока осуществляется независимо, по противоположным плечам моста (см. статью).

Кратко отметив все основные нюансы конструирования мощных РПУ, возвращаемся к верхнему уровню управления РПУ. Итак, сконструировав силовую часть способную прокачать нужную энергию и имеющую выходную характеристику dU/dt , удовлетворяющую условиям задачи, необходимо интеллектуальное управление, для полной реализации аппаратных возможностей. Основная сложность управления—это инерционный «перемех» выходного напряжения, неизбежно возникающий после достижения заданного значения. Время на стабилизацию выходных параметров должно занимать не более 10% относительно всего импульса, соответственно при импульсе 5мс время выхода на режим не должно превышать 500мкс. Учитывая диапазон возможного изменения выходной нагрузки – задача не простая. Дело усложняется и изменением эмиссионной способности катодного узла рентгеновской трубки, возникающим в процессе старения катода. По этой причине предустановленные таблицы предварительного накала требуют постоянной коррекции, что не всегда возможно и достоверно.

В процессе макетирования РПУ был опробован целый ряд контроллеров. Подавляющее большинство из них не отвечали условиям нашей задачи или в силу низкой скорости обратной связи, или недостаточной вычислительной мощности. В этой статье мы отметим лишь некоторые из них.

Контроллер STM32F103. Ядро ARM. Достаточно развитая периферия. Внутренней памяти достаточно для реализации не слишком сложного синергического режима и библиотеки органоавтоматики.

Нужно отметить высокую помехоустойчивость, что в наших условиях очень важный фактор. т.к. несмотря на все предпринимаемые меры: экранировку, снабберы, гасящие цепочки силового каскада, помехи и наводки - одна из основных проблем мощных импульсных преобразователей. Скорости обработки хватает для трёх предустановочных, статичных таблиц: уровень разогрева спирали, пропорциональная и дифференциальная компоненты программного ПИД-регулятора. При этом, реальная скорость петли обратной связи 12-15кГц (в зависимости от выбранного алгоритма). Оптимальный диапазон эффективной обработки сигнала – не выше 80-85кГц генерируемой частоты главного инвертора.

Лучший результат выхода системы на режим
(при 125кВ / 1000мА F=80кГц)

$1,1 \times 10^{-3} \text{с} \pm 5\%$.

Контроллер TMS320F28 TexasInstruments. DSP. Мощные вычислительные возможности, хорошо развитая периферия, имеются несколько выходов ШИМ. Внутренних ресурсов достаточно для реализации любого синэргического режима и введения широкой базы данных.

Помехоустойчивость – средняя. Возможностей процессора с избытком хватает для введения пяти статичных таблиц и трёх динамичных. На этом контроллере был реализован алгоритм обработки крутизны нарастания переднего фронта (dU/dt) с коррекцией компонентов ПИД-регулятора. Как указывалось выше, подготовительный разогрев катода не всегда обеспечивает точное соответствие электронной эмиссии. При этом, статично установленные коэффициенты ПИД-регулятора не полностью соответствуют реальной выходной нагрузке, при этом возникает или «перемах» анодного напряжения или затягивание нарастания. То и другое приводит к увеличению времени стабилизации. Измерения показали, что введение алгоритма динамической коррекции даёт выигрыш во времени стабилизации $\sim 25\%$. При этом, реальная скорость петли обратной связи не хуже 30кГц. Оптимальный диапазон эффективной обработки сигнала – не выше 100-103кГц генерируемой частоты главного инвертора.

Лучший результат выхода системы на режим
(при 125кВ / 1000мА F=100кГц)

$0,72 \times 10^{-3} \text{с} \pm 5\%$.

Контроллер USD3138 TexasInstruments. Ядро ARM. Одна из последних разработок в данной линейки. На этот контроллер мы хотим обратить особое внимание, именно на нём получены лучшие результаты. Периферии и памяти хватает для обеспечения всех основных сервисных функций РПУ. Несмотря на, относительно, медленное ядро, данный контроллер имеет аппаратный ШИМ с внедрённым ПИД-регулятором, обеспечивая тем самым преимущества цифрового и аналогового метода управления. Слабой стороной контроллера является отсутствие собственного кварцевого генератора, в связи с чем написание программы для калибровки анодного напряжения и тока требует вдумчивого подхода программиста нижнего уровня. Помехоустойчивость ядра – средняя.

В процессе макетирования нам пришлось несколько раз корректировать дизайн процессорной платы. В окончательном варианте мы получили устойчивую работу даже в условия повышенной зашумлённости. Обратило на себя внимание, что даже при «зависании» ядра по внешней связи, работа ШИМ безотказно доводила экспозицию до конца, обеспечивая при этом хорошую стабилизацию. Как показала практика, при использовании данного контроллера отпала необходимость введения динамических таблиц, а скорость отработки в несколько раз превысила DSP-контроллеры работающие с алгоритмом динамической коррекции. Доступная скорость петли обратной связи 350кГц. Реальная скорость, в нашем случае, ограничена фильтрацией измерительной цепочки обратной связи, тем не менее, составила 55-60кГц. Оптимальный диапазон эффективной обработки сигнала – более 120кГц генерируемой частоты главного инвертора.

Лучший результат выхода системы на режим
(при 125кВ / 1000мА F=120кГц)

$0,44 \times 10^{-3} \text{с} \pm 5\%$.

Надеемся, что в этой обзорной статье разработчики импульсных источников питания смогут найти для себя полезную информацию.

сентябрь 20014год.

Зам. директора по технике ООО «Икс-Про»
Мамонов И.А.