

Индукционный нагрев. Генераторы серии ТПЧ пятого поколения.

История проекта

Оглавление

1.	Обоснование выбора силовой схемы генератора	1
1.1.	Автономный инвертор тока (АИТ) и автономный инвертор напряжения (АИН).....	1
1.2.	Транзисторно-тиристорный инвертор.....	2
1.3.	Автономный инвертор тока с синхронным прерывателем (АИТСП)	3
1.4.	Сравнение себестоимости и КПД схем АИТСП и АИН	4
1.5.	АИТСП – схема 5-го поколения.....	4
2.	Система автоматизированного проектирования генераторов САПР-Т5	4
2.1.	Конструктивные группы.....	4
2.2.	Типоряд номинальных мощностей	5
2.3.	Варианты возможных соотношений напряжений на входе и выходе	5
2.4.	Проектирование сразу всей серии	6
3.	Математическая модель генератора в переходных режимах Модель-Т5	6
4.	Запуск сигнального образца в эксплуатацию	7

1. Обоснование выбора силовой схемы генератора

1.1. Автономный инвертор тока (АИТ) и автономный инвертор напряжения (АИН)

В связи с успешным производством контроллеров С5 пятого поколения в компании ALJUEL накопились к 2012 году достаточные финансовые средства для проведения новой наукоемкой разработки - генераторов серии ТПЧ пятого поколения. Основной предмет разработки - силовая часть генератора, а управление базируется на том же контроллере С5 пятого поколения, адаптируемого к новой силовой схеме.

Наиболее ответственная часть разработки – выбор принципиальной силовой схемы. Проводился обзор различных вариантов инверторов. В частности, рассматривался транзисторный автономный инвертор напряжения (АИН), работающий в режиме последовательного резонанса с выходным согласующим трансформатором. Был сделан вывод, что такая схема перспективна для высоких частот (10...100 кГц), но является неэкономичной для средних частот, поскольку трансформатор существенно завышает стоимость комплекса, особенно в широко используемом частотном диапазоне до 1 кГц. Анализ показал, что в среднем диапазоне частот наиболее конкурентоспособными схемами являются два варианта инвертора:

- 1) мостовая схема автономного инвертора тока (АИТ) на тиристорах;
- 2) мостовая схема автономного инвертора напряжения (АИН) на транзисторах IGBT.

У обеих схем в качестве нагрузки рассматривался параллельный контур. Основное отличие в классификации схем АИТ и АИН заключается в расположении и относительной величине дросселя. В схеме АИТ дроссель располагается на входе и имеет относительно большую индуктивность, а в схеме АИН – дроссель на выходе, индуктивность в 30...50 раз меньше, чем в АИТ. Сравнение проводилось в интервале средних частот от 0.5 до 8 кГц, особое внимание уделялось средней точке 1 кГц, где происходит наиболее массовое применение генераторов.

Выигрыш транзисторной схемы АИН проявился в простоте управления, в уменьшении массогабаритных показателей и себестоимости генераторов при мощностях в пределах до 250 кВт. Относительно небольшая себестоимость АИН связана с простотой управления и сборки модульной конструкции транзисторов, а также в связи с тем, что в схеме АИН используется относительно небольшой дроссель. Соответственно меньше потери в дросселе, выше КПД генератора. Достоинства АИН являются неоспоримыми для маломощных генераторов.

Однако по надежности в аварийных режимах выигрывает тиристорная схема АИТ. Также АИТ имеет почти на порядок лучшие динамические свойства: короче Пуск, быстрее обрабатываются возмущения по нагрузке и сети, быстрее реакция на скачок Задания при отсутствии перерегулирования. «Послушный» и стабильный АИТ легко встроить в систему внешней автоматики, в частности, построить качественный контур стабилизации мощности или температуры. Кроме того, тиристорный АИТ становится дешевле транзисторного АИН при мощностях более 250 кВт, поскольку начинает сказываться относительная дешевизна тиристоров.

1.2. Транзисторно-тиристорный инвертор

Смешанная схема представляет собой тиристорный АИТ с транзисторным Прерывателем на входе (чоппером), Рис.1.

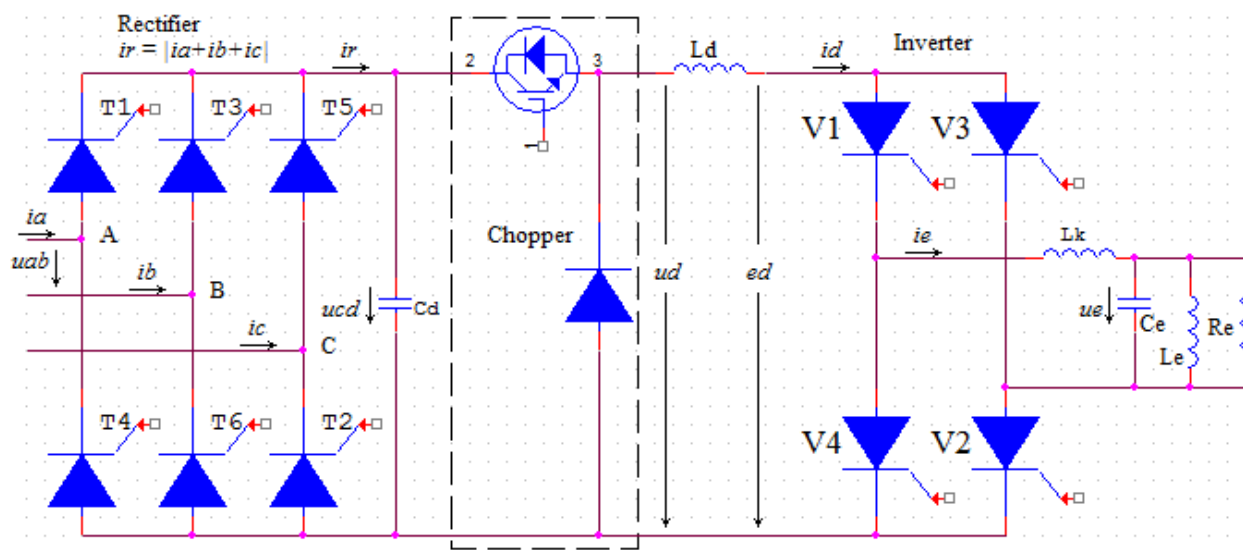


Рис.1. Схема генератора на базе тиристорного автономного инвертора тока (АИТ) с транзисторным прерывателем на входе (чоппером)

Схема на Рис.1 известна давно. Есть также мировой опыт практического применения, где использовались два канала управления, которые были независимы. Один канал – самовозбуждение АИТ – поддерживал в инверторе высокий косинус фи. Одновременно второй канал – ШИМ-канал Прерывателя – независимо (асинхронно) решал задачу регулирования тока id в дросселе Ld , поддерживая его относительно постоянным

и непрерывным (с небольшой пульсацией без паузы тока). Силовой блок, управляемый по двум каналам, классифицируется как АИТАП (АИТ с Асинхронным Прерывателем).

Основными достоинствами АИТАП, являются высокий косинус ϕ на входе и выходе генератора и высокая защищенность в аварийных режимах. Однако АИТАП не получил широкого распространения, поскольку ток i_d должен быть непрерывным, для этого требуется достаточной величины индуктивность дросселя L_d . Хотя дроссель L_d в схеме АИТАП несколько меньше, чем в классической схеме АИТ, но в целом экономия схемы АИТАП по себестоимости, массогабаритным показателям и потерям получается несущественной по сравнению АИТ. По факту АИТ имеет более широкое распространение.

1.3. Автономный инвертор тока с синхронным прерывателем (АИТСП)

Ставилась задача усовершенствовать управление АИТ с Прерывателем (Рис.1), чтобы получить такую же экономичность, как в транзисторном АИН (малый дроссель), и такую же защищенность в аварийных режимах, как в тиристорном АИТ. В результате анализа был сделан вывод о целесообразности синхронизации Прерывателя, т.е. Асинхронный Прерыватель (АП в схеме АИТАП) заменяется на Синхронный Прерыватель (СП в схеме АИТСП). При этом СП решает задачу не только регулирования тока i_d (как АП), но и одновременно задачу уменьшения коммутационных потерь инвертора, как при включении тиристоры, так и при их выключении. Если в схеме АИТАП только два канала управления, то схеме АИТСП задействованы 4 независимых канала:

- 1) самовозбуждение инвертора;
- 2) включение транзистора Прерывателя;
- 3) выключение транзистора Прерывателя – регулирование тока;
- 4) выключение транзистора Прерывателя – ограничение паузы тока на заданном минимуме (порядка $5...10^\circ$).

Каналы 3 и 4 работают по принципу – активен тот, кто сработал раньше.

Рабочая область АИТСП может быть выбрана таким образом, что потери выключения тиристоры сводятся практически к нулю – инвертор может быть «голым» – без демпфирующих RC-цепей (или могут использоваться незначительные «косметические» RC-цепи). В результате повышается предельная частота инвертора. Если в классической схеме АИТ не рекомендуется использовать частоту выше 8 кГц, то в АИТСП частота может достигать до 22 кГц (при использовании тиристоры с временем выключения 5 мкс).

В схеме АИТАП индуктивность дросселя L_d по сравнению с АИТ меньше в 30...50 раз – такая же, как в схеме АИН. Соответственно, меньше потери, выше КПД, а также расширяется диапазон частоты инвертора в сторону понижения вплоть до 50 Гц.

В то же время в схеме АИТСП отсутствует ненадежность, присущая транзисторной схеме АИН. Если в транзисторной схеме произошла порча (или отказ управления) одного транзистора в мосту, то произойдет короткое замыкание через другой транзистор (целый) в очередной момент его включения. Замыкание идет по контуру, где индуктивность на выходе не задействована – остается только собственная индуктивность ошиновки. Поэтому ток нарастает так быстро, что встроенная внутренняя защита транзистора (который цел) не может сработать, выключить транзистор и ограничить ток. В результате в силовой схеме происходят тяжелые разрушения.

Напротив, в схеме АИТСП всегда задействована индуктивность L_d , последовательная с транзистором Прерывателя, поэтому тяжелые разрушения невозможны. Даже в том случае, если порча возникла в самом Прерывателе, аварийный режим гасится с помощью инвертора. Возникает свойство надежной двухзвенной защиты: при порче Прерывателя авария гасится инвертором, при порче инвертора авария гасится Прерывателем.

1.4. Сравнение себестоимости и КПД схем АИТСП и АИН

Себестоимость дросселя в схеме АИТСП такая же, как у АИН. Остается сравнить себестоимость полупроводников. В Прерывателе частота тока вдвое выше частоты в плече инвертора. В первом приближении установленная мощность Прерывателя равна половине установленной мощности АИН. Себестоимость тиристорного моста примерно вдвое дешевле себестоимости транзисторного моста. Отсюда следует, что в первом приближении себестоимость АИТСП в целом равна себестоимости АИН. Если же дополнительно учесть, что в АИН форма тока, косинус ϕ и коммутационные потери значительно хуже, чем АИТСП, то у последнего получается меньше установленная мощность и себестоимость.

Прерыватель образует последовательное сопротивление в цепи тока инвертора, которого нет в других схемах. Следовательно, Прерыватель по отношению к другим схемам вносит дополнительные потери. С другой стороны, Прерыватель обеспечивает экономичный режим: высокий косинус ϕ , оптимальная форма тока, а также минимальные коммутационные потери в номинальном режиме, которые могут быть сведены практически к нулю при соответствующем выборе рабочей зоны. В результате, несмотря на дополнительный потери, упомянутые выше, полные потери относительно малы, чем и объясняется высокий КПД схемы АИТСП.

1.5. АИТСП – схема 5-го поколения

Статус 5-го поколения может присваиваться новой серии генераторов только в случае существенного улучшения небольшого числа главных объективных параметров, ценность которых должна быть бесспорной, например, КПД, масса, стоимость, соблюдение международных стандартов, универсальность. Главные параметры всех предыдущих поколений серии ТПЧ можно найти в Википедии (ключевые слова «ТПЧ вики»). Схема АИТСП сочетает в себе достоинства транзисторного и тиристорного инверторов, улучшаются главные параметры, в результате обеспечивается критерий статуса 5-го поколения:

- Косинус ϕ порядка 0.95, как на входе (в питающей сети), так и на выходе (в колебательном контуре);
- КПД повышен до 97.5..98.5% для 1 кГц;
- Удельные показатели порядка 1кг/кВт;
- Частотный типоряд расширен, как в сторону снижения частоты, так и в сторону повышения частоты: 50(60), 125, 250, 500, 1000, 2500, 4000, 8000(10000), 16000, 22000 Гц;
- В сеть не поступают высшие гармоники контурной цепи, соблюдается международный стандарт ГОСТ 13109-97, нормирующий искажения напряжения сети.

Новая серия генераторов 5-го поколения имеет одинаковое обозначение кириллицей и латиницей Т5, или альтернативное обозначение ТПЧ-5, если по контексту сравнивается с серией предыдущего поколения ТПЧ-4. Для получения более полной информации о серии Т5 смотрите Приложения (документ открывается щелчком мыши):

- [Приложение1](#). Характеристики серии ТПЧ-5.pdf
- [Приложение2](#). Соблюдение ГОСТ 13109-97 по искажениям напряжения сети.pdf

2. Система автоматизированного проектирования генераторов САПР-Т5

2.1. Конструктивные группы

Генераторы серии Т5 подразделяется на 3 группы по конструктивному исполнению:

- В группе Т5А (буква “А” от слова “Air”), от 25 кВт до 320 кВт, все тепловыделяющие компоненты охлаждаются воздухом. Полупроводниковые компоненты имеют модульный тип и привинчиваются к

общему радиатору. При малой мощности, до 80кВт, вентилятор не ставится – используется естественное охлаждение.

- В группе T5M (буква “М” от слова “Module”), от 125 кВт до 500 кВт, используются тиристоры модульного типа, которые привинчиваются к плите с жидкостным охлаждением (водяным). Вода изолирована, не имеет электрического потенциала, поэтому к воде нет жестких требований по чистоте и электропроводности.
- В группе T5C (буква “С” от слова “Capsule” – таблетка), от 100 кВт до 4 МВт (в одиночном генераторе), используются тиристоры таблеточного типа с жидкостным охлаждением (водяным). Вода находится под электрическим потенциалом, к ней предъявляются жесткие требования по удельному электрическому сопротивлению: не менее 50 кОм•см. Качество воды должно обеспечиваться посредством двухконтурной системы водяного охлаждения с применением централизованных или индивидуальных теплообменников.

2.2. Типоряд номинальных мощностей

Для формирования типоряда номинальных мощностей P_n на выходе генератора взяты три базовых числа 16, 20, 25 и кратные им числа. В то же время существует некоторые исключения, поскольку по требованию Заказчика могут использоваться нестандартные значения P_n . В серии T5 ряд номинальных мощностей разбит на 10 групп, которые пронумерованы цифрами 0,1,2,...,9. В таблице ниже представлено базовое число p , на основе которого номинальная мощность вычисляется по формуле $P_n = p \cdot 10^X$, где X это степень $X=0,1,2,3$.

Группа	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p	1	1.25	1.6	2	2.5	3.2	4	5	6.3	8

Таким образом, любое стандартное значение P_n можно кодировать двумя цифрами: первая указывает группу, а вторая – степень 10-ти. Например:

$P_n = 1$ кВт (код 00)

$P_n = 160$ кВт (код 22)

$P_n = 1250$ кВт (код 13)

$P_n = 4000$ кВт (код 63).

2.3. Варианты возможных соотношений напряжений на входе и выходе

Весьма важным фактором, влияющим на режимы генератора и его энергетику, является соотношение напряжений на входе и выходе. Это соотношение определяется как отношение выпрямленного напряжения в звене постоянного тока U_{cd} к амплитуде выходного напряжения U_{em} :

$$K_u = \frac{U_{cd}}{U_{em}}$$

Диапазон возможных значений K_u распределен на 8 групп:

Группа	0	1	2	3	4	5	6	7
K_u	0.32..0.42	0.43..0.56	0.57..0.62	0.63..0.69	0.7...0.76	0.77..0.85	0.86..0.94	0.95..1.05

Наиболее энергетически выгодным является соотношение K_u из групп 3, 4, 5 (K_u от 0.63 до 0.85). Самым невыгодным является соотношение K_u из групп 0 и 1 (K_u менее 0.57). Например, в невыгодную группу 0 попадает генератор, у которого напряжение питающей сети 3х380А, а на выходе 1000В. У такого генератора КПД сниженный, а себестоимость завышенная. Если оставить без изменения выходное напряжение 1000В, а

на вход подать питающее напряжение, например, 3х660В (группа 2), или 3х800В (группа 4), или 3х1000В (группа 6), то себестоимость генератора резко снизится, а КПД повысится.

2.4. Проектирование сразу всей серии

По умолчанию в генераторе предусматривается двукратный диапазон изменения частоты – от номинального значения f_n вниз на 50%. Также возможен другой диапазон, заданный Заказчиком.

Каждый генератор характеризуется четырьмя главными параметрами: 1) Номинальная мощность P_n ; 2) Номинальная частота f_n ; 3) Соотношение напряжений на входе и выходе K_u ; 4) Конструктивная группа (Т5А, Т5М, Т5С). Число сочетаний для 4-х параметров является практически необозримым. Если для старых ТПЧ существовала возможность последовательно проектировать различные модели (их было всего несколько), то в новой серии Т5 последовательное проектирование отдельных моделей становится невозможным – необходимо проектировать сразу всю серию.

Проектирование всей серии означает, что должна быть разработана система автоматизированного проектирования генератора под заказ (САПР-Т5), где строго систематизируются входные и выходные данные. САПР-Т5 разработана на базе приложения МАТКАД и изначально предусматривает полные диапазоны 4-х главных параметров. САПР-Т5 выполняет множество сервисных функций:

- расчет установившихся режимов генератора (угловые параметры, токи в узлах, выходная мощность, потери, КПД) в нескольких точках напряжения и частоты;
- расчет максимальных температур полупроводниковых приборов;
- выбор параметров системы охлаждения (расход воды, перепад давления, мощность и шум вентилятора, выбор вентилятора из базы данных);
- выбор параметров дросселя на входе инвертора для Т3 к изготовлению;
- выбор силовых приборов (тиристоров и транзисторов) из базы данных;
- выбор охладителей для силовых приборов из базы данных;
- расчет массы и габаритов шкафа из базы данных;
- выдача стандартизованных табличных спецификаций в двух форматах.

Выходные данные САПР-Т5 предоставляются Заказчику в стандартизованных табличных спецификациях в двух формах: PDF-спецификация на 2-х листах и EXCEL-спецификация. PDF-спецификация удобнее для чтения, однако в EXCEL-спецификации больше параметров – всего 258. По желанию Заказчика ему предоставляются обе спецификации. Результаты работы САПР-Т5 можно посмотреть по ссылке ([20 проектов](#)).

3. Математическая модель генератора в переходных режимах Модель-Т5

В САПР-Т5 не предусмотрены сервисные функции в части системы управления. Задача схемотехнической реализации, программирования и настройки системы управления решается отдельно. На базе МАТКАД разработана математическая модель генератора Модель-Т5, в которой предусмотрены следующие сервисные функции:

- Расчет пусковых, установившихся и аварийных режимов;
- Проверка и подбор всех параметров, которые обеспечивают устойчивость системы автоматического регулирования во всех зонах;
- Расчет эталонных осциллограммы режимов, которые используются при тестировании генератора;
- Расчет эталонных осциллограмм генератора, которые могут быть переданы Заказчику по его желанию для облегчения ремонта и обслуживания.

Модель-Т5 является завершающим этапом в создании теоретической базы, предшествующей разработке полного комплекта конструкторской и технологической документации.

4. Запуск сигнального образца в эксплуатацию

С начала марта 2015 года на территории Заказчика ФГУП «МЗСС», г. Москва, запущен в эксплуатацию сигнальный образец генератора новой серии ТПЧ 5-го поколения. Подробные технические данные сигнального образца Т5М-200-1.5-1000-660 смотрите в [спецификации](#). От генератора питается индукционная печь, предназначенная для плавки специальных сплавов меди, серебра, золота и других металлов. Сигнальный образец продемонстрировал преимущества новой серии:

- Косинус фи порядка 0.95, как на входе (в питающей сети), так и на выходе (в колебательном контуре);
- КПД 98.5% для 1.5 кГц в номинальном режиме;
- Удельные показатели 1.05 кг/кВт (210 кг на 200 кВт);
- В сеть не поступают высшие гармоники контурной цепи, соблюдается международный стандарт ГОСТ 13109-97, нормирующий искажения напряжения сети;
- Надежный Пуск при любой загрузке печи, в том числе, при глубокой перегрузке генератора (независимо от полноты загрузки тигля, от материала и температуры шихты);
- Пуск не зависит от помех, вызываемых работой других генераторов в непосредственной близости;
- Реализована разветвленная многоканальная защита плюс принцип двухзвенной защиты: при порче Прерывателя авария гасится инвертором, при порче инвертора авария гасится Прерывателем;
- Предусмотрен мульти-частотный режим генератора, во Флеш-памяти сохраняются настройки для 4-х контуров нагрузки;
- Реализован принцип «быстрого реагирования» при ремонте и обслуживании – при срабатывании аварии Осциллограмма автоматически посылается на сайт Интернет-Диагностики и одновременно заносится в «Черный ящик»;
- Предусмотрены средства для встраивания генератора в систему цеховой автоматизации: USB канал, RS-422 канал, беспроводной GSM канал (связь через Интернет).

В течение полутора месяцев наблюдается успешная работа генератора через сайт [Интернет-Диагностики](#) (см. SerNum=1). В этот период сделано более 100 плавов (как правило, по 3 плавки в день).