

О важных моментах при изготовлении и о методике настройки самодельной инфракрасной паяльной станции.



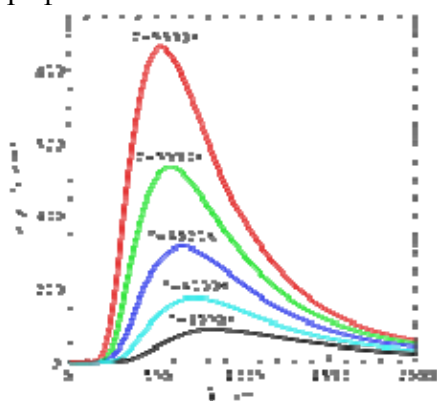
Не так давно мною был изготовлен аппарат, предназначенный в основном для монтажа-демонтажа чипов в корпусах BGA, именуемый в народе инфракрасной паяльной станцией. Конструктивные и схемотехнические особенности аппарата перечислены здесь <http://notebook1.ru/forma1/viewtopic.php?f=70&t=88181&sid=d4940d37b07b7fb6f508b37e3d71746c>, подробное видео первого варианта здесь <http://youtu.be/IJi7413jGAw>.

Однако результаты работы этого устройства не отличались стабильностью. Иногда возникали досадные случаи вздувания чипов и заметного коробления плат, несмотря на то, что термопрофиль процесса выдерживался довольно точно, в соответствии с рекомендациями уважаемой фирмы Intel, которые можно прочесть в этом документе <http://www.intel.com/content/www/xr/en/processors/packaging-chapter-09-databook.html>.

Это заставило более глубоко изучить теорию и практику создания подобных устройств. Напомню, что в данной конструкции в качестве нагревателей верха и низа применены дешевые китайские галогеновые лампы для прожекторов. Кое-кто считает, что сделать хорошую паяльную станцию на галогенках вообще невозможно, ибо у них слишком коротковолновый спектр излучения, а такое излучение не проникает достаточно глубоко в текстолит и греет его через поверхность. К тому же прогревающий эффект зависит от различий цвета и поглощающей способности разных деталей, что может привести к локальным перегревам. Да еще источник излучения состоит как бы из отдельных полос, что тоже снижает равномерность прогрева. Фирменный керамический нагреватель свободен от всех этих недостатков, а кварцевый от большинства из них, и только на них якобы можно сделать нормальную станцию. Такое мнение не лишено оснований, указанные недостатки конечно имеют место, но опыт работы многих людей показывает, что они вполне преодолимы. К тому же керамика и кварц тоже небезгрешны, они обладают намного большей тепловой инерцией, чем лампы, что значительно осложняет управление термопрофилем в реальном времени с помощью ПИДа из-за задержки сигнала в петле. Цитата из одной статьи по ТАУ гласит, что «для объектов с $t_0 > 0.5 \cdot t_i$ (где t_0 – транспортная задержка сигнала, t_i – постоянная времени объекта (примечание автора)), даже ПИД-регуляторы не могут обеспечить достаточно хорошего качества регулирования. В крайнем случае можно применить ПИД-регулятор с коэффициентом $T_d = 0$, но для таких

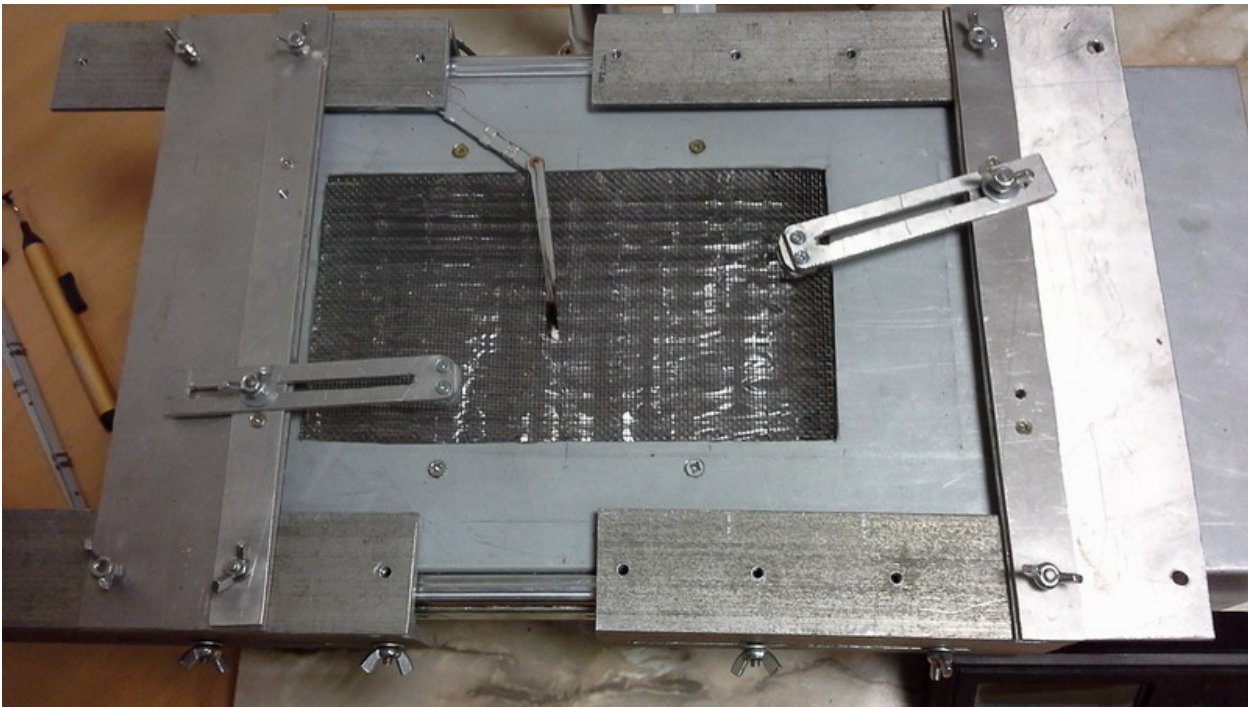
сложных объектов лучшие качественные показатели обеспечиваются системами автоматического управления (САУ) с моделью». Именно поэтому многие отказываются от ПИД-управления и переходят к простой диаграмме мощностей, несмотря на значительную потерю в точности. Да и опыты на равномерность нагрева, сделанные путем прожаривания обычной бумаги до получения темного отпечатка, проведенные некоторыми участниками форума, свидетельствуют о том, что равномерность нагрева даже фирменным керамическим нагревателем далеко не идеальна. И это при немалой цене. В общем выбор был сделан в пользу галогенок, но конструкция была доработана так, чтобы минимизировать влияние их врожденных недостатков.

Как известно, мощность ИК излучения с единицы площади поверхности пропорциональна четвертой степени температуры (закон Стефана-Больцмана), а длина волны, на которую приходится максимум спектра, обратно пропорциональна температуре. Галогенка в штатном режиме имеет температуру спирали 2500...3000К, максимум излучения на 1мкм. Но посмотрите на график:



Даже при такой температуре максимум очень пологий, в спектре содержатся в том числе и длинные волны, причем амплитуда их ненамного меньше максимума. При снижении температуры спирали путем последовательного соединения ламп и /или диммирования спектр становится еще более плоским, и вредная коротковолновая часть с волнами короче 2.5мкм составляет в общей мощности довольно малый процент. Таким образом, **галогеновая лампа, работающая с недокалом, по свойствам излучения мало отличается от промышленного кварцевого облучателя.** Так может еще более понизить температуру спирали, до невидимого

излучения? Нет, тут подстерегают другие грабли, мощность излучения с единицы площади поверхности резко падает (пропорционально четвертой степени температуры), а поверхность излучения спирали в галогенке очень мала. Мы просто не сможем обеспечить нужную плотность потока мощности. К тому же кварцевое стекло трубок ламп не пропускает волны длиннее 4мкм. Отсюда следует важный вывод: **для создания хорошего ИК излучателя из галогенок необходимо сосредоточить максимально возможную исходную мощность ламп на минимальной площади, расположив их вплотную, частоколом, а требуемую не слишком большую реальную мощность получать путем последовательного соединения и/или диммирования, то есть работы ламп с недокалом.** Эксперименты с первым вариантом станции показали, что удельной мощности низа 8 Вт/кв.см с головой хватает не только для разогрева платы с любыми допустимыми скоростями, а и для выпайки всяких разъемов и сокетов вообще без верха, одним низом, защитив остальную часть платы фольгой. Для верха необходимо хотя бы 10-12 Вт/кв.см. При расчете мощности следует учитывать, что лампы накаливания являются нелинейным элементом, при последовательном соединении двух одинаковых ламп мощность каждой составит не четверть номинала, как следует из закона Ома, а треть, при трех лампах – 1/6 часть номинала, при четырех – 1/8. С мощностью разобрались. А как же быть с полосатостью? Опять обратимся к теории http://www.all-fizika.com/article/index.php?id_article=835. Уважаемый товарищ Фейдман рассчитал, что **при расстоянии от ламп до облучаемой поверхности, большем, чем 4/3 расстояния между осями ламп, неравномерность становится ничтожно малой и ней можно пренебречь.** Тест с прожариванием бумаги это подтверждает, никакой полосатости не наблюдается. В итоге в качестве нижнего нагревателя выбрано 12 ламп длиной 254мм по 1.5кВт каждая, размещены вплотную друг к другу частоколом, соединены по 3 шт. последовательно (4 группы).



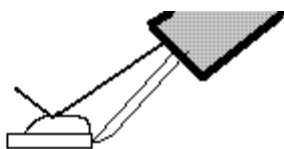
Общая мощность при полном открытии управляющего симистора составила около 3кВт, цвет свечения оранжевый, как у всем известных нагревателей UFO. Во время работы на полную мощность включается очень редко, обычно светит красным, а в режиме поддержания вообще почти невидимым. Конфигурация верха – 6 ламп 118мм по 300Вт (есть лампы такой же длины пятисотки, но они заметно толще и плохо влезли бы в мой корпус, у кого корпус больше, можно смело ставить их). На фото видна выдвижная сменная диафрагма, она специально задвинута не до конца для наглядности.



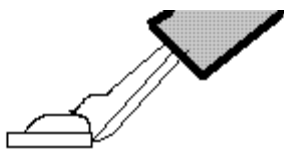
Естественно, лампы расположены частоколом. Соединение – по две последовательно (3 группы), общая мощность около 600Вт. Эти лампы я заматировал, с целью повысить равномерность, наверное зря, отдача немного снизилась. Потом уже, прочитав статью Фейдмана, я понял, что этого можно было не делать. Но мне хватает отдачи. Для сравнения решил все же попробовать соорудить на скорую руку макет кварцевого нагревателя, просунув в отрезанную от лампы трубку спираль для электроплиты. Да, конечно светится более красным, но инерционность

просто жуткая, постоянная времени десятки секунд! Точно воспроизвести термопрофиль с таким неповоротливым «исполнительным механизмом» было бы сложно. Кстати, для промышленных кварцевых нагревателей тоже заявлены довольно большие постоянные времени, не говоря уже о керамических.

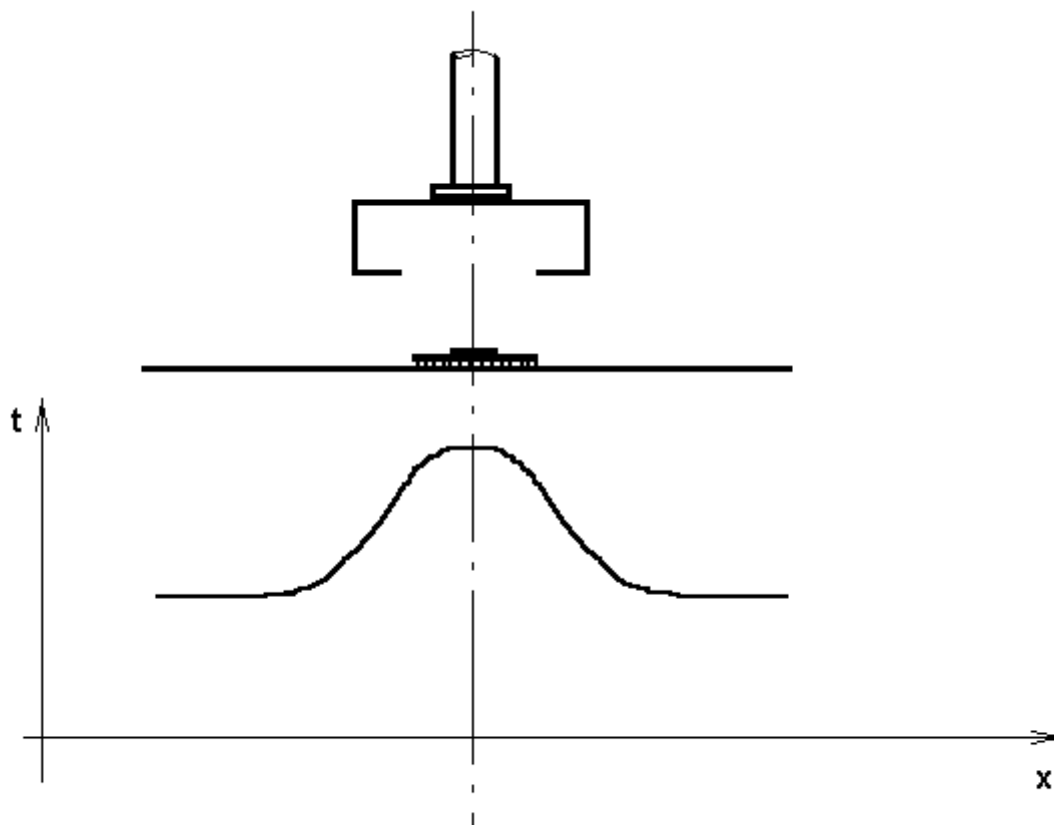
Итак, с нагревателями разобрались. Теперь об еще одном очень важном моменте, правильном измерении температуры. Когда я только начинал проект и выбрал в качестве датчиков терморезисторы Pt100 типа PT106051, думал, что у меня с этим проблем вообще не будет. Термопары принципиально не хотел, компенсация холодного спая, инструментальные усилители с обвязкой из высокоточных резисторов... Pt100 позволяет без всего этого обойтись без ущерба для точности. Схемотехника радикально упрощается, никакой настройки и калибровки не требуется. Маленькие размеры датчиков сулили малое время отклика. Однако не все оказалось так просто. Во-первых, несмотря на то, что датчики имеют размер 1.7x2.4мм, это все же больше, чем капля спая термопары. Первоначально конструкция крепежа была такая:



Думал, что пластинчатая пружина сверху, кроме того, что будет прижимать датчик к плате, еще и затенит его от прямого излучения, чтобы он нагревался только платой. Оказалось, что затеняется и сама плата в этом месте (а может еще и отводится тепло через пружину, не знаю), и датчик показывает на 5...8градусов ниже, чем на самом деле. Изменил конструкцию:



Пробовал ставить датчик прямо на чип при выпаивании, все как по учебнику, начинает плавиться при 217градусах для безсвинца. Однако это еще не все. Главной проблемой первого варианта верха было слишком маленькое рабочее окно. **Из-за отвода тепла в стороны от нагреваемого места на плате распределение температур имеет следующий вид:**



Центр чипа будет по любому горячее, чем термодатчик, установленный сбоку от него. А термопрофили Интела, прописанные в вышеупомянутом документе, измерены датчиком, размещенным прямо среди шаров в специальном отверстии (см. рисунок на стр. 9-5 документа). В этом вся и проблема, датчик, расположенный сбоку, да еще на краю облучаемой области, показывает значительно меньше, чем реальная температура в центре чипа. Чтобы минимизировать эту разницу, окно облучателя должно перекрывать область чипа с запасом, иметь размеры не менее 60x60мм, так чтобы датчик, стоящий сбоку, облучался по возможности так же как чип, а не попадал на край области. Расстояние от облучателя до платы не должно быть слишком большим. Но даже с этими мерами некоторая разница остается. Для того, чтобы станция работала правильно, необходимо эту разницу (градиент) измерить и ввести как поправку в программу управления. Для этого надо провести пробный цикл демонтажа, периодически пробуя покачивать чип. Можно считать, что на безсвинцовом припое чип начинает шевелиться при 217градусах (датчик при этом показывает меньше). После этого всегда стараться устанавливать верхний нагреватель на одной и той же высоте, на которой проводились измерения (я у себя риску нарисовал). В новом варианте моей станции крепление верхнего датчика заменено на традиционный «колодец-журавль» (гибкий рукав себя не оправдал, был неудобен).



«Шея» журавля сделана из медной трубки диаметром 3мм, которую при необходимости можно легко согнуть руками как угодно для обхода неудобно расположенных деталей на плате, вылет регулируется винтовым зажимом. Прижимная пружина закреплена так, что в рабочем положении прижимает датчик к плате, и в то же время удерживает «журавля» в верхнем положении, когда нужно, без всяких дополнительных фиксаторов, чисто за счет кинематики. Датчик температуры низа перенесен на нижнюю часть платы.



Дело в том, что текстолит, как оказалось, имеет очень неважную теплопроводность, примерно как сухое дерево (по данным википедии). При нагреве платы только низом со скоростью 2градуса в секунду разность температур верхней и нижней стороны платы достигает

15...20градусов (измерил лично). К примеру, если мы задаем режим стабилизации температуры платы по датчику, расположенному сверху, ПИД конечно стабилизирует температуру датчика, но при этом температура нижней стороны платы постоянно гуляет в довольно больших пределах, что не есть хорошо. Датчик закреплен на рычаге, состоящем из двух половин, соединенных шарниром (подобно руке с локтем), что позволяет легко установить его в любое свободное место на плате. Если возникают сомнения, туда ли попал датчик, всегда можно приложить плату, затем снять и посмотреть отпечаток термопасты, оставленный датчиком. Прижим осуществляется за счет упругих свойств самого рычага, этого вполне достаточно.

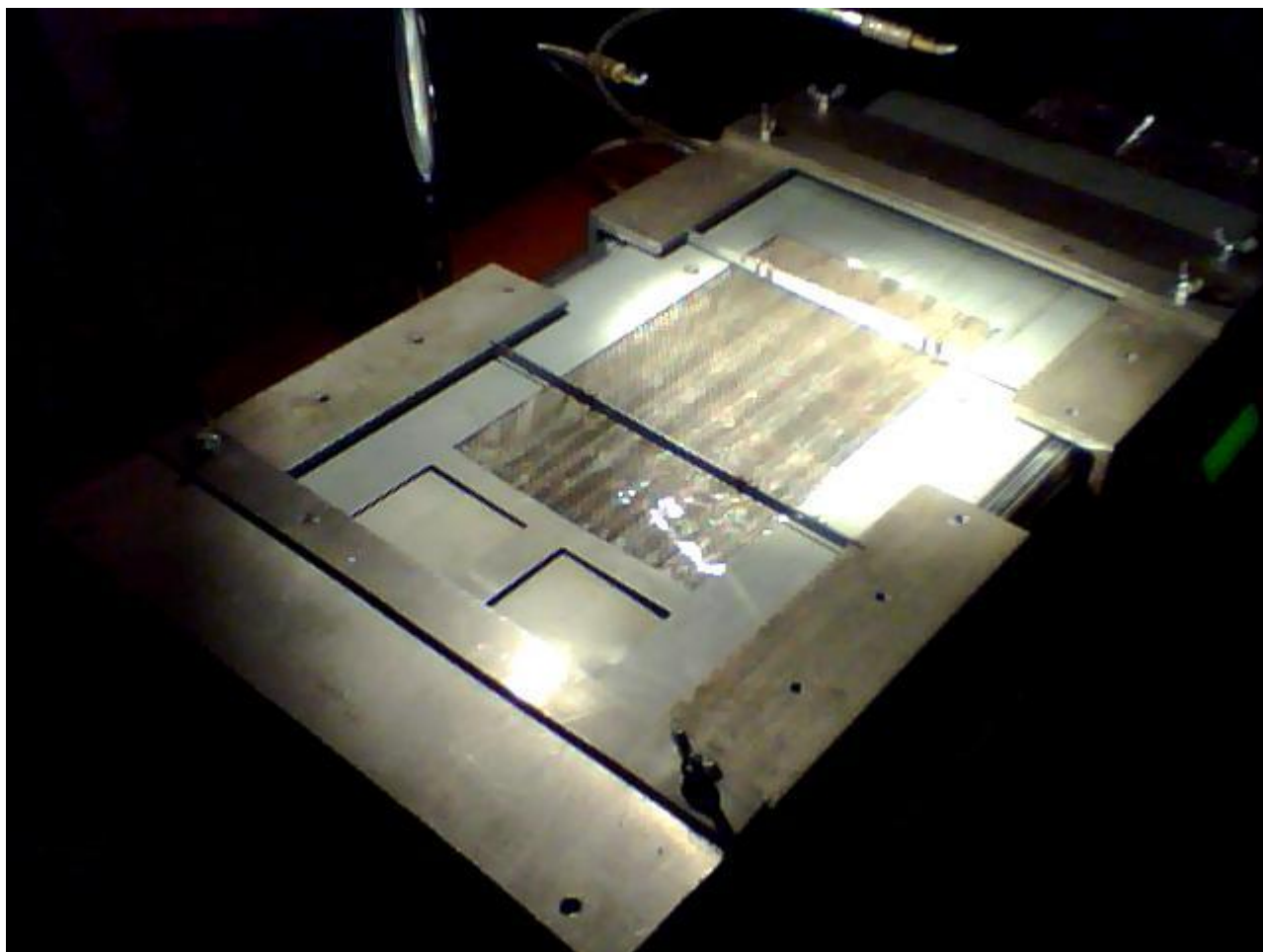
Теперь о ПИДе. Для тех, кто не знает, что это такое, советую прочесть вот эту статью, где все разжевано очень понятным языком:

http://roboforum.ru/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%B4_%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D0%B8_%22%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE_%D0%BE_%D0%9F%D0%98%D0%94-%D0%B0%D0%BB%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BC%D0%B0%D1%85%22.

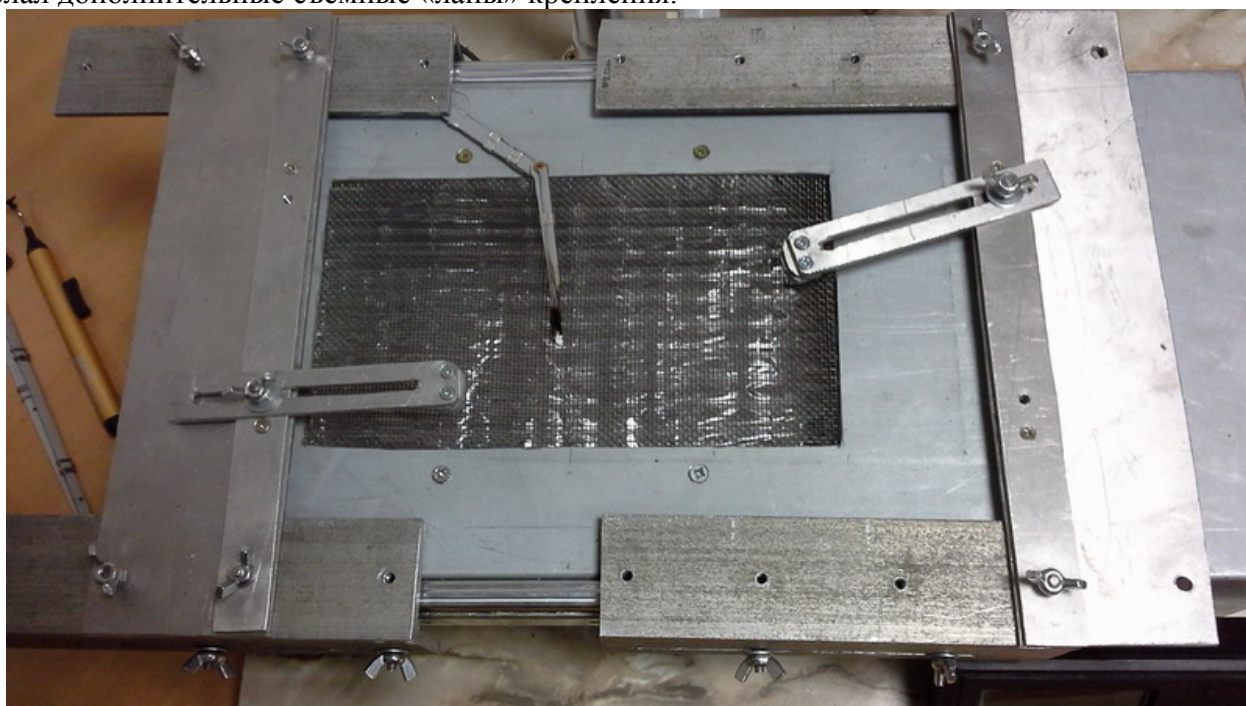
Если в конструкции механической части учтены указанные выше рекомендации, Вы без труда настроите как верхний, так и нижний ПИД на практически идеальную работу, руководствуясь методикой ув. Тима Вескотта. Но есть одно Но. **Как ни парадоксально, но в силу принципа измерения и некоторых конструктивных особенностей идеально работающий ПИД отнюдь не обеспечивает хорошую работу паяльной станции в целом. ПИД управляет температурой датчика и понятия не имеет, какую температуру имеет плата или чип в 10мм от него.** А здесь уже все зависит от градиентов, величины и направления потоков тепла, и определять температуру можно только косвенно. Пирометры тоже не панацея, во-первых их показания сильно зависят от вида измеряемой поверхности, во-вторых все известные мне недорогие пиродатчики требуется размещать далеко от верхнего нагревателя, чтобы избежать прямого нагрева, и оснащать оптикой, так как без нее получается слишком большое поле зрения. По точности они уступают традиционным термопарам и RTD. **Всегда следует учитывать тот факт, что верхний нагреватель греет локальную область, и тепло расходится от нее кругами во все стороны иногда до самых краев платы (если та небольшая).** Если просто сделать 2 независимых ПИДа для верха и низа, возникает неприятный эффект: тепло от верха достигает нижнего датчика и повышает его температуру выше уставки. ПИД, естественно, на это реагирует полным отключением нижнего нагревателя, а верхний без подогрева снизу просто не в состоянии нормально прогреть шары, не перегрев верхушку чипа. В итоге брак. Я у себя решил эту проблему следующим образом: после разогрева платы ПИДом до необходимой температуры нижний ПИД отключается и переводит лампы в режим фиксированной мощности, а датчик используется только для индикации температуры. Величина этой фиксированной мощности измерена заранее и забита в программу. Путем нескольких тестовых нагревов с разными фиксированными мощностями я построил график зависимости установившейся температуры от мощности, данные из которого и занес в свой контроллер. Конечно, при изменении температуры в помещении и напряжения сети температура может медленно уползать от заданной, но сеть у меня хорошая, и на практике уползание не превышает десяти градусов, что для низа приемлемо. Была мысль после выхода на «полку» термопрофиля некоторое время стабилизировать температуру ПИДом, при этом запоминать среднюю мощность нагревателя и фиксировать уже на ней. Но для получения достоверной величины это время получается довольно большим, да и программа усложняется. Оставил пока так, может быть сделаю в следующей версии. Кстати, о самой температуре низа. **На мой взгляд, температура разогрева всей платы должна быть как можно выше для облегчения работы верха и уменьшения эффекта «кругов на воде».** Главное гарантированно не расплавить припой, чтоб детали снизу не поотпадали, если есть что-то нежное снизу (пластиковые разъемы например), их нужно защитить фольгой. У меня сейчас при безсвинцовом процессе плата разогревается до 175градусов, при свинцовом 140.

Теперь о верхе. Здесь требуется максимальная точность и недопустимо даже небольшое перерегулирование. Также недопустимы «гонки за уставкой», когда из-за большого и/или долгого рассогласования нагреватель длительное время работает на полную мощность. Многие применяют разбивку конечного (самого горячего) участка термопрофиля на много мелких шагов (каждый последующий шаг не начинается до тех пор, пока не «устаканится» предыдущий). Это очень эффективный способ. Я же просто уменьшил до минимума дифференциальную составляющую в верхнем ПИДе, чтобы регулятор «не делал резких движений» мощностью, этого оказалось достаточно. Скорость нагрева на конечной фазе не стоит делать слишком большой, достаточно где-то 0.3...0.5градусов в секунду, иначе возрастет разница чип-датчик (вышеупомянутый градиент).

Теперь об еще одном важном моменте – поддержках. Стандартный стеклотекстолит FR-4 имеет температуру размягчения 125градусов (так называемая температура стеклования). Выше нее его можно гнуть руками почти как пластилин, а при остывании он запоминает новую форму. Соответственно при нагреве плата провисает, и после охлаждения (если нет поддержек или они неправильно установлены) принимает форму вертолетного винта. **Поддержек должно быть как можно больше, примерно через каждые 7..8см.** Наиболее распространены две основные конструкции крепежа платы на столе: «свободная», это когда плата с помощью стоек, вставленных в штатные крепежные отверстия, просто свободно лежит на сетке или стекле, и «жесткая», где плата зажимается с боков, а промежуточные поддержки выполняют вспомогательную роль, просто не дают ей провисать. Первая конструкция прогрессивней, но для нее трудно найти жесткую непрогибающуюся сетку или ИК-прозрачное стекло. На моей станции стол подвижный, поэтому пришлось применить вторую конструкцию. Опасения, что плата будет выгибаться из-за теплового расширения, не оправдались. При обычном для паялки перепаде температур в 200градусов расширение даже самой большой десктопной материнки не превышает 0.5мм, поэтому если зажимать плату не слишком плотно, ничего никуда не выгибается. К тому же участки платы, оказавшиеся за пределами рабочего окна низа (а оно у меня 210x120мм), остаются жесткими и играют роль рамки, которая часто применяется в промышленных паяльных печах для борьбы с короблением. Для борьбы с прогибом вниз изготовил съемные поддержки с подвижными слайдерами, их легко передвинуть на место, не занятое деталями.

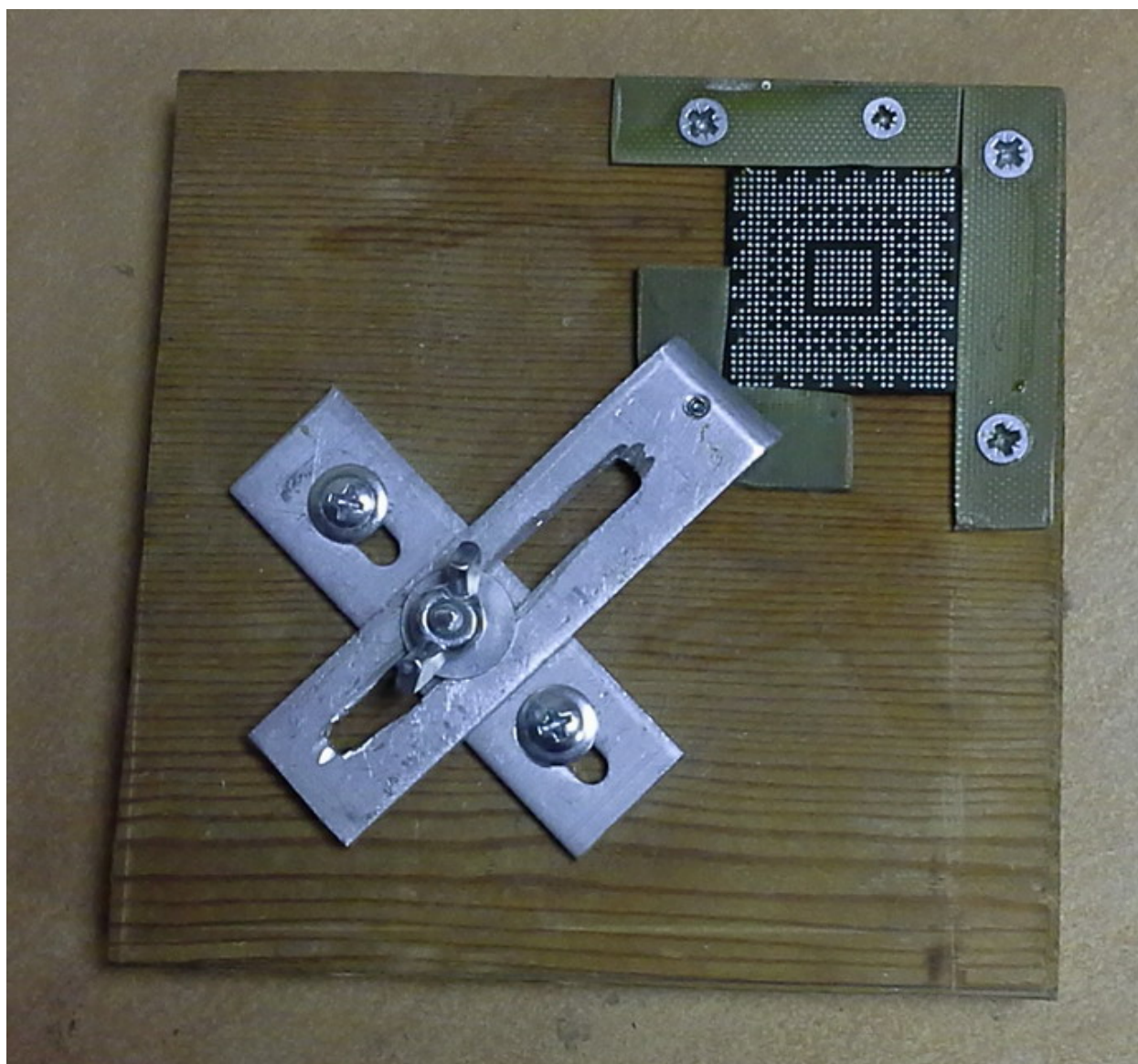


Думаю со временем добавить еще и поперечины, образовав что-то наподобие крупной решетки. Чтобы можно было закрепить сложные непрямоугольные платы (ноутбучные и т.п.), сделал дополнительные съемные «лапы» крепления.



Все эти меры вместе достаточно эффективны, «вертолет» практически не наблюдается.

Во время работы выяснилось, что в процессе очистки пятаков на выпаянном чипе последний все время хочет куда-то убежать, удерживать его очень неудобно. Раскопал в загашнике обрезки стеклотекстолита толщиной 2мм и, не мудрствуя лукаво, сделал вот такую мышеловку:



Обратите внимание, что прижимной уголок закреплен шарнирно одним винтом, что позволяет ему самоустанавливаться, равномерно распределяя нагрузку на чип, а также без проблем закреплять неквадратные (прямоугольные) чипы.

Ну что ж, это пожалуй все. Все вышесказанные выводы сделаны исключительно из личных наблюдений, всевозможных экспериментов и изучения литературы. Ни в коем случае нельзя их считать догмой или истиной в последней инстанции. Любые замечания и дополнения приветствуются. В настоящее время мой аппарат работает стабильно в полностью автоматическом режиме, брака практически не бывает. Думаю, что, прочитав эту статью, Вам будет намного легче изготовить свой вариант аппарата, поскольку многие вопросы станут яснее.

С уважением Сенькин Юрий aka Yurasvs.