

Эмменталь

Стол на резисторах TELPOD и SmCo магнитах.
Сборка и настройка.

Эволюционируй или умри

Внимание!

Данная инструкция не является исчерпывающим руководством по части электробезопасности. Все действия вы выполняете на свой страх и риск. Помните, сетевое напряжение является источником повышенной опасности.

Содержание:

Введение	2
Фрезеровка стола и вклейка магнитов	4
Установка резисторов TELPOD	7
Управление резисторами	13
Планы на будущее	17

Введение

В данном руководстве описана сборка и настройка кастомного стола принтера семейства Ender3 по проекту “Эмменталь v3” главной отличительной особенностью которого являются самарий-кобальтовые магниты, расположенные на лицевой стороне стола и предназначенные для удержания стального покрытия стола. Помимо магнитов интересной особенностью проекта является применение польских резисторов фирмы TELPOD на 230В в качестве нагревателя стола.

Выбор в пользу отдельных магнитов для удержания покрытия стола, а не магнитной подложки, которую зачастую можно купить одним лотом с тем же покрытием стола, был сделан сразу по трём причинам: во-первых, магнитные подложки имеют достаточно скромную силу удержания, во-вторых, они достаточно тяжёлые, и, в-третьих, магнитные подложки вносят дополнительные искривления поверхности стола.

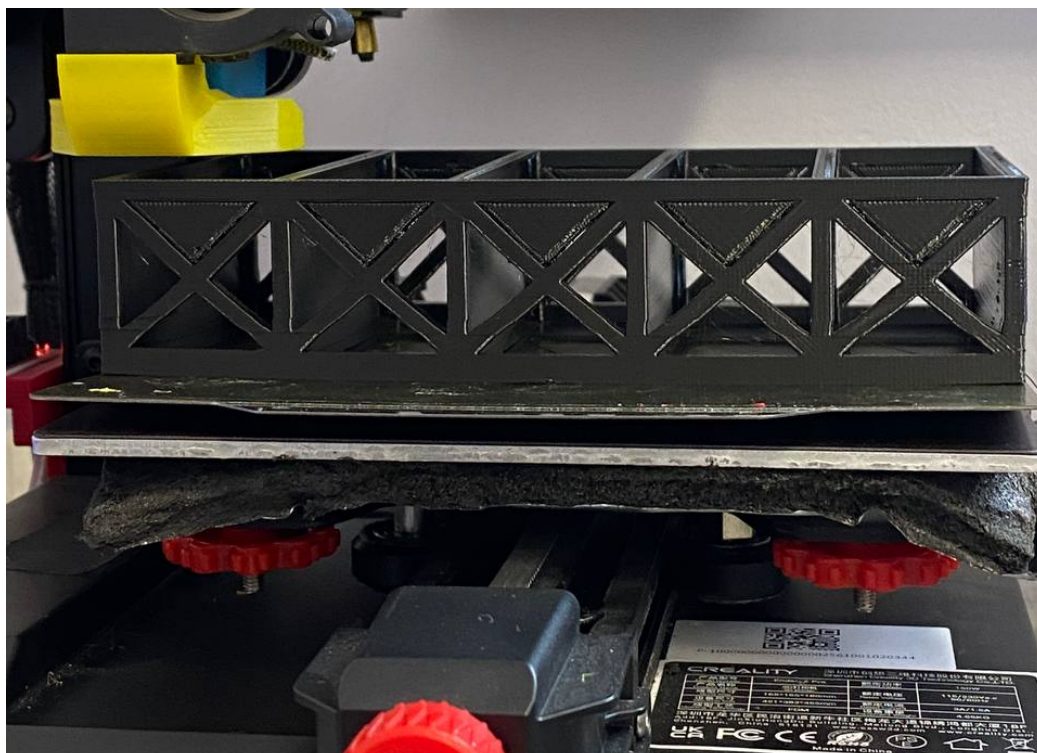


Рисунок 1 - отрыв магнитного покрытия от стола из-за усадки пластика

Особое внимание заслуживает первая причина. Поясню. Все пластики так или иначе обладают свойством менять свои линейные размеры при измерении температуры, проще говоря усаживаться при остывании. От усадки, при печати, модель стремится выгнуться лодочкой,

а вместе с собой потянуть и покрытие стола с самим столом (рис. 1) . Когда печать ведётся на стекло толщиной более 3мм, такое поведение пластика не является проблемой. Собственной изгибной жёсткости стекла более чем достаточно, чтобы сопротивляться желанию пластика свернуться и сохранять изначальную плоскую форму. Гибкие магнитные покрытия назвать жёсткими сложно. Им для сохранения формы требуется поддержка по всей плоскости стола - магнитное взаимодействие. Причём сила удержания необходима немаленькая.

Выбор польских резисторов фирмы TELPOD в качестве нагревателя стола, а не силиконовой грелки, сделан тоже сразу по нескольким соображениям: во-первых, снова вес (рис. 2), силиконовые грелки тяжёлые, во-вторых, это надёжность. Хорошие и безопасные грелки от Кееново дорогие, а дешёвый подвальный Китай у людей периодически горит. Правильно установленные резисторы будут как минимум не хуже Кееново в плане электробезопасности, а по цене обойдутся не дороже подвального Китая.



Рисунок 2 - вес комплекта польских резисторов

Фрезеровка стола и клейка магнитов

На данный момент в проекте применяются самарий-кобальтовые магниты размером d10h2 в количестве 73 шт. Магниты клеятся заподлицо во фрезерованные с лицевой стороны стола отверстия.



Рисунок 3 - столы Эмменталь трёх версий; V1 на 30 магнитов - сверху, V2 на 50 магнитов - снизу слева, V3 на 73 магнита - снизу справа

Получить нужную геометрию стола можно двумя способами:

1. Напечатать кондуктор, необходимые приспособления для ручного гравера и выполнить фрезеровку родного стола принтера своими силами.

Для выполнения этой работы понадобятся:

- печатный кондуктор (лежит в файле проекта)
- [фрезерная приставка на гравёр](#)
- [однозаходная фреза по алюминию](#) 3.175x3.175x6x38
- штангенциркуль для контроля размеров
- смазка или wd40

2. Заказать фрезеровку стола у фрезеровщика

Для заказа понадобятся:

- CAD модель стола
- мешок денег

Когда стол изготовлен/куплен можно переходить к следующему этапу - установке магнитов. Изначально метой было вклеивание магнитов на бф2. Это прочный и дешёвый клей по металлу, который хорошо справлялся со своей основной задачей - удержанием магнитов в отверстиях, но бф2 предъявляет высокие требования к точности фрезерования стола, что не есть хорошо.

На данный момент бф2 не рекомендован для использования. Вместо него следует применять силиконовый клей Kafuter K-704, за тестирование которого надо сказать спасибо @stas2z.

Как уже было сказано выше замена клея на герметик обусловлена в первую очередь возможностью снизить требования к точности изготовления столов. Всё дело в том, что магниты должны располагаться как можно ближе к лицевой поверхности стола, иначе будет существенная потеря магнитной силы (воздушный зазор в 0.5мм снижает силу примагничивания примерно на 60%). В отличии от клея герметик позволяет варьировать толщину клеевого шва, тем самым компенсируя разность глубин отверстий в столе.

Собственно сам процесс вклеивания:

1. Стол после фрезеровки нужно очень хорошо обезжирить. Используйте феири, губку для мытья посуды и тёплую воду

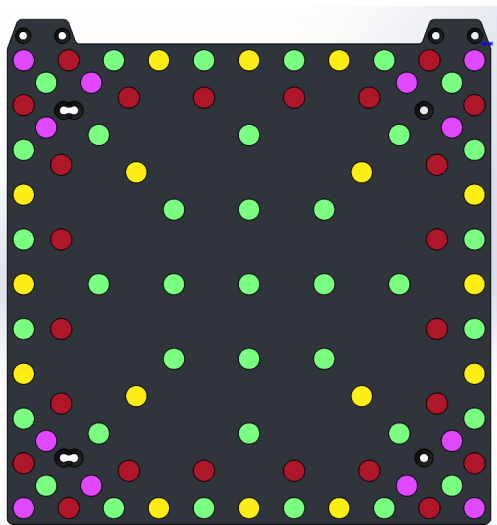


Рисунок 4 - предлагаемая очерёдность вклейки 89-ти магнитов

2. Все магниты должны располагаться одним полюсом кверху
3. Магниты нужно стараться располагать чётко заподлицо с поверхностью стола и ни в коем случае не выше её. Для этого магниты нужно позиционировать в два этапа: сперва руками на каплю силиконового клея заведомо немного выше плоскости стола, а затем прижать чем-то ровным, например, куском экструдированного алю. профиля.
4. Магниты нужно клеивать в несколько заходов таким образом, чтобы как можно меньше близлежащих магнитов клеивалось одновременно (см. рис 4). Оптимальный интервал между подходами два часа.
5. Магниты на углах, во избежание их съёбивания со своих мест, непосредственно после установки надо чем-то фиксировать. Например, приклеивать поверх магнитов на двухсторонний скотч пластиковые карты, либо прижимать прищепками куски стекла/пластика.
6. Излишки силикона, которые оказались на поверхности стола проще всего убирать после полного высыхания герметика под струёй воды неабразивной жёсткой нейлоновой губкой. За неимением таковой можно воспользоваться жёсткой стороной любой губки для посуды, но имейте ввиду, что она будет царапать алюминий.

Короткое видео процесса клеивания с моими комментариями:

<https://youtu.be/zADRAU40HkA>

В результате должно получиться нечто подобное:

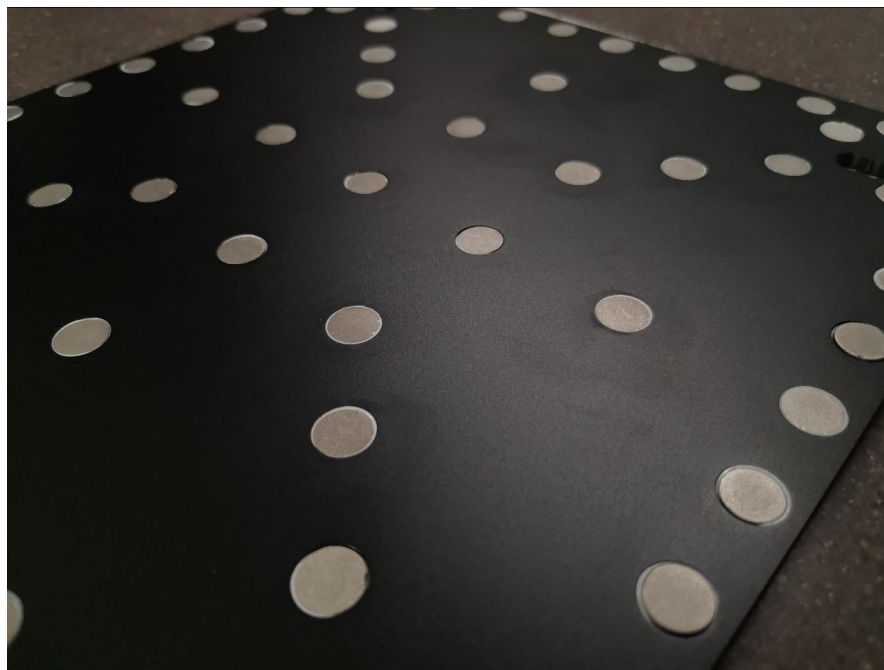


Рисунок 5 - стол с магнитами. крупный план

Установка резисторов TELPOD

Важно:

Резисторы TELPOD не являются обязательной частью проекта Эмменталь. По мнению автора данные резисторы можно считать оптимальным вариантом только при фрезеровке стола с нуля, когда стоит выбор между покупкой силиконовой грелки и установкой резисторов.

При переделке же родного стола Ender3 под установку магнитов целесообразность замены родного нагревателя на резисторы 230В остаётся спорной и может быть рекомендована по большей части ради получения нового опыта.

В отличие от нагревателей, распределённых по всей площади стола, резисторы прогревают не весь стол сразу, а лишь 11% его площади. Таким образом приемлемый уровень равномерности нагрева достигается лишь за счёт высокой теплопроводности алюминиевого стола и правильного расположения резисторов (рис. 6).

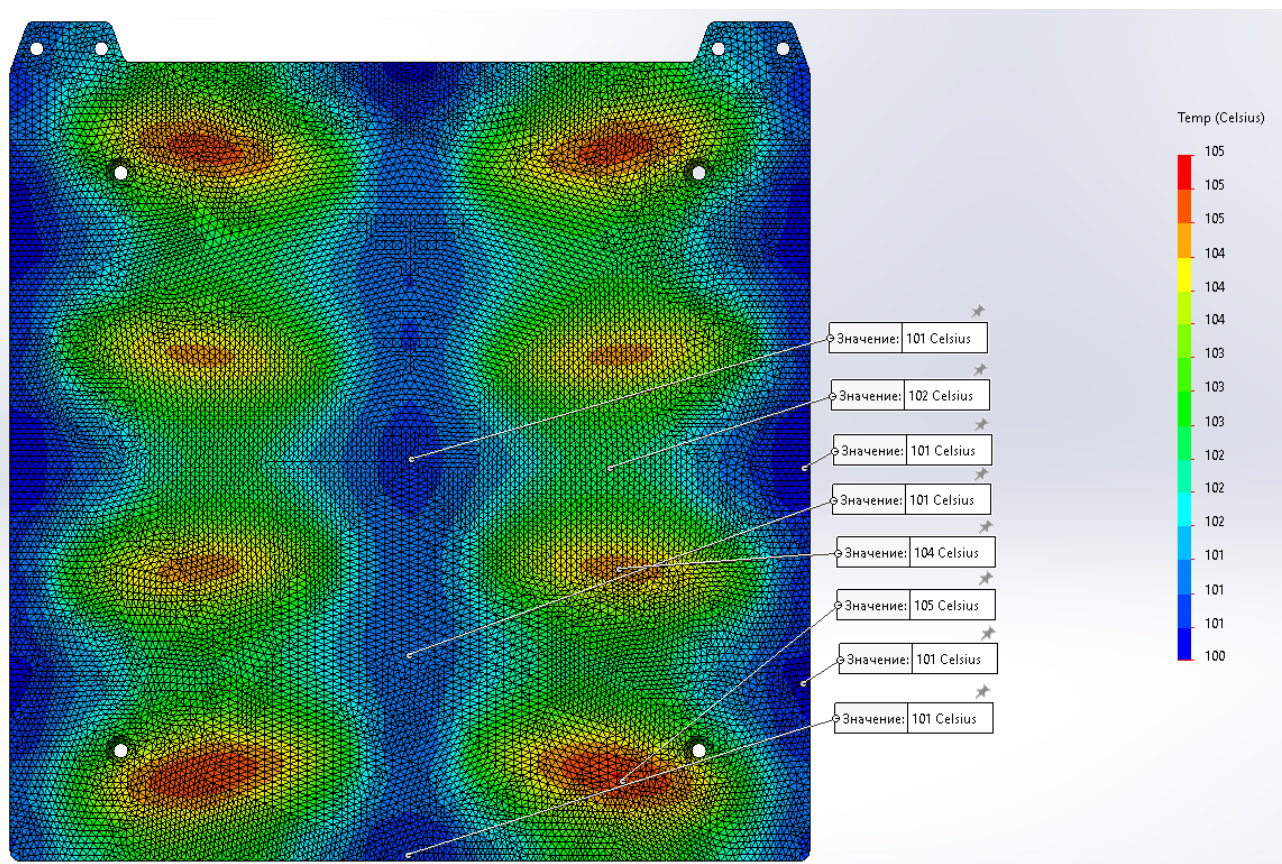


Рисунок 6 - термограмма стола, полученная расчётным путём

Для правильного позиционирования резисторов следует воспользоваться печатным приспособлением, которое лежит в файле проекта. Приклеивать резисторы стоит на тот же kafuter k-704, нанесённый равномерным тонким слоем. При использовании родного стола плёночный нагреватель 24в можно не сдирать, а клеить поверх неё, адгезия у клея к ней хорошая.

Проводка укладывается и припаивается после высыхания клея. Для подключения резисторов рекомендуется использовать провод в тефлоновой изоляции сечением не менее 0.14 мм², а для вводного кабеля сечением 0.5мм². Для защиты от неконтролируемого нагрева в цепи обязательно должен присутствовать термopедохранитель (рис. 7) номиналом 157 градусов или близким к нему.

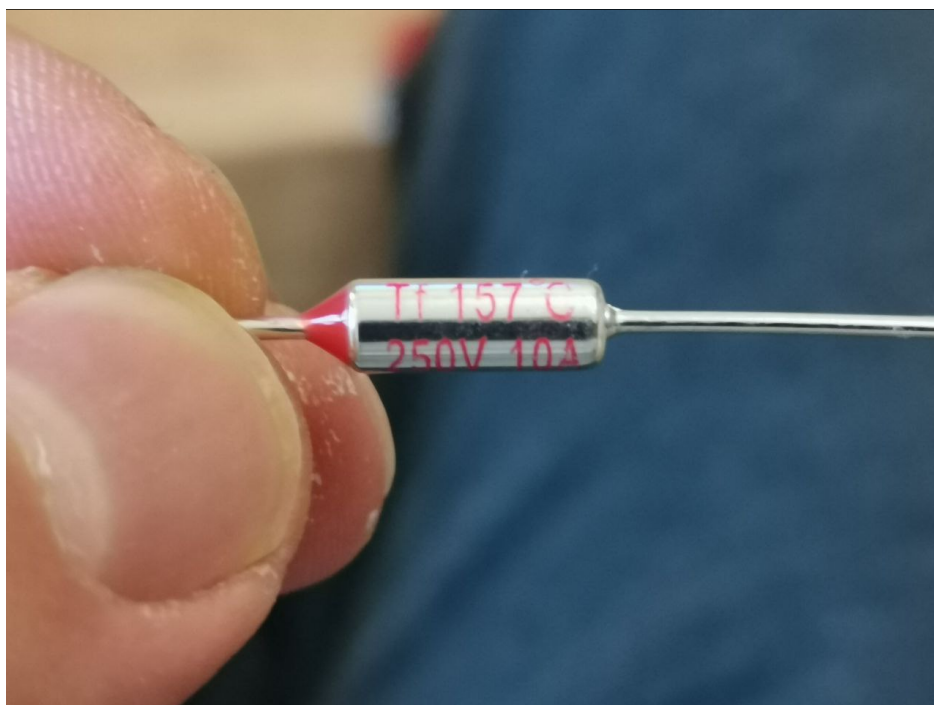


Рисунок 7 - термopедохранитель

Замечание:

Температура пайки оловянно-свинцовыми припоями значительно превышает температуру срабатывания предохранителя, поэтому пайка должна производиться за концы длинных выводов. Не нужно их обрезать под корень.

Провода должны быть зафиксированы на столе силиконовым клеем (рис. 9). На этот же клей следует приклеить термисторы. Схема установки термисторов приведена на рисунке 8. Установка двух

термисторов (№№ 1 и 2) для данной схемы нагрева является обязательной, третий термистор служит лишь для визуального контроля разницы температур max-min на столе и может быть исключён из схемы. При желании термисторы №№ 2 и 3 могут быть расположены на одном резисторе.

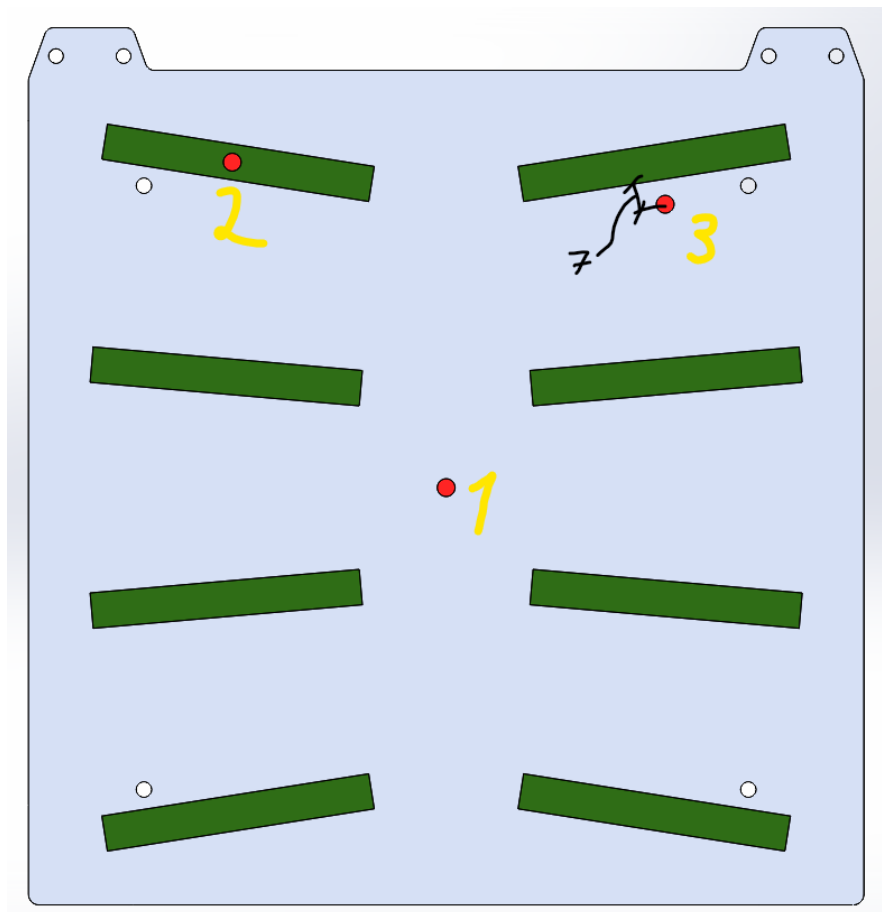


Рисунок 8 - схема расположения термисторов

Очередность сборки:

1. Приклеивание резисторов по шаблону
2. Пайка проводов к резисторам (для расширения температурного диапазона нагрева можно использовать более высокотемпературный бессвинцовый припой, например, ПОМ 3)
3. Временная фиксация проводов на изоленту
4. Фиксация проводов на силиконовый клей
5. Пайка термopедохранителя и вводного кабеля
6. Установка термисторов
7. Фиксация проводов прижимными планками (модели лежат на синги)

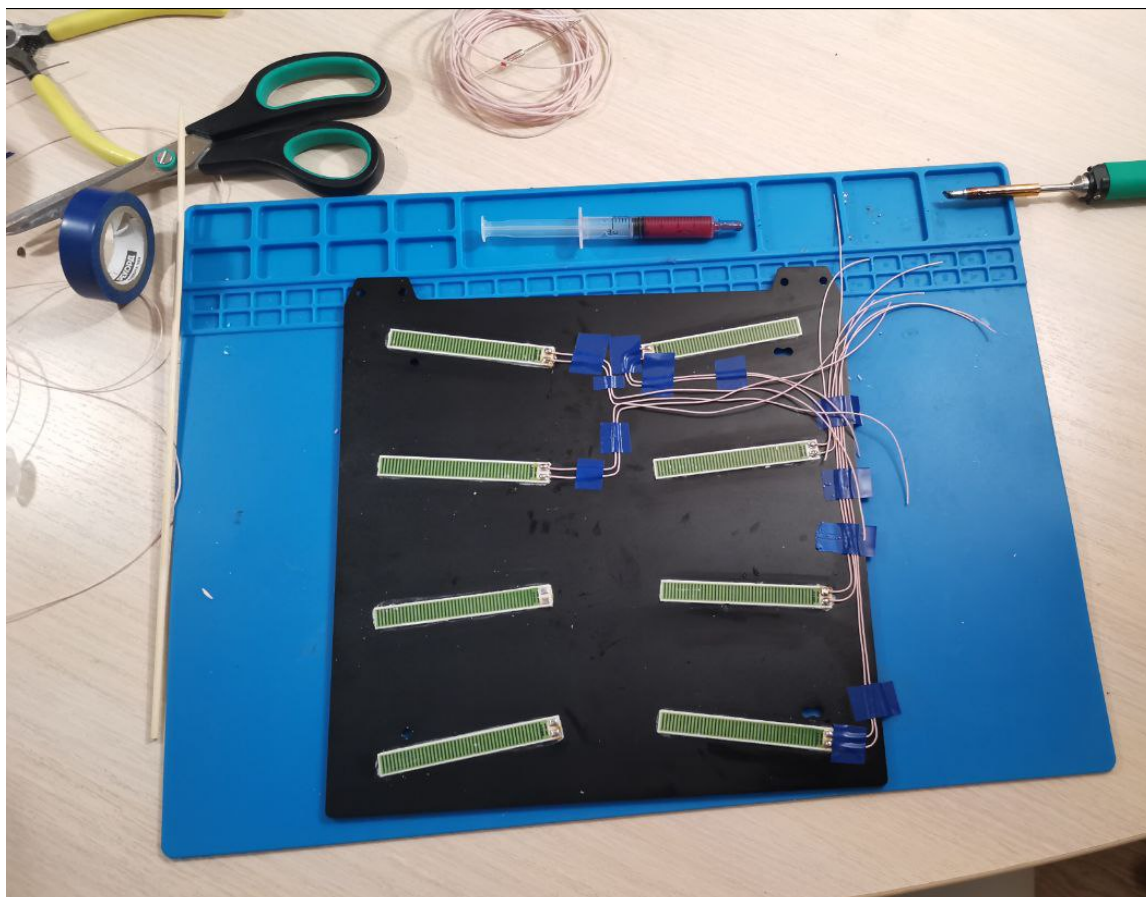


Рисунок 9а - процесс укладки проводов

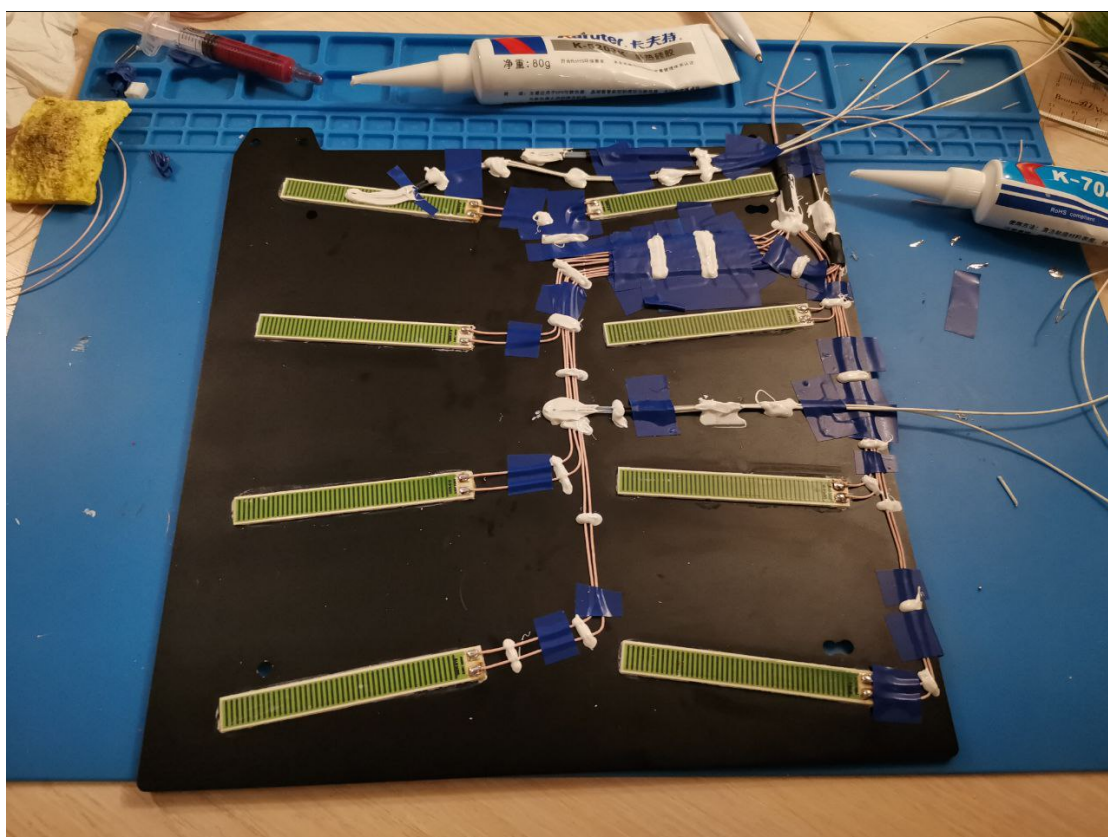


Рисунок 9б - фиксация проводов на силиконовый клей



Рисунок 9в - стол после снятия изоленты

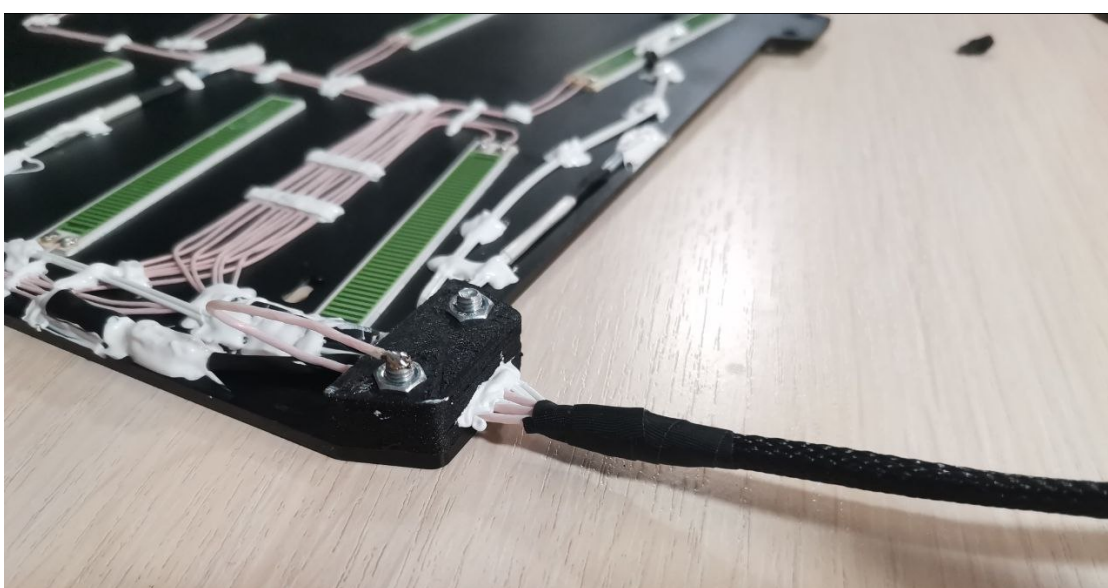


Рисунок 9г - фиксация проводов на входе в стол



Рисунок 9д - фиксация проводов на входе в стол

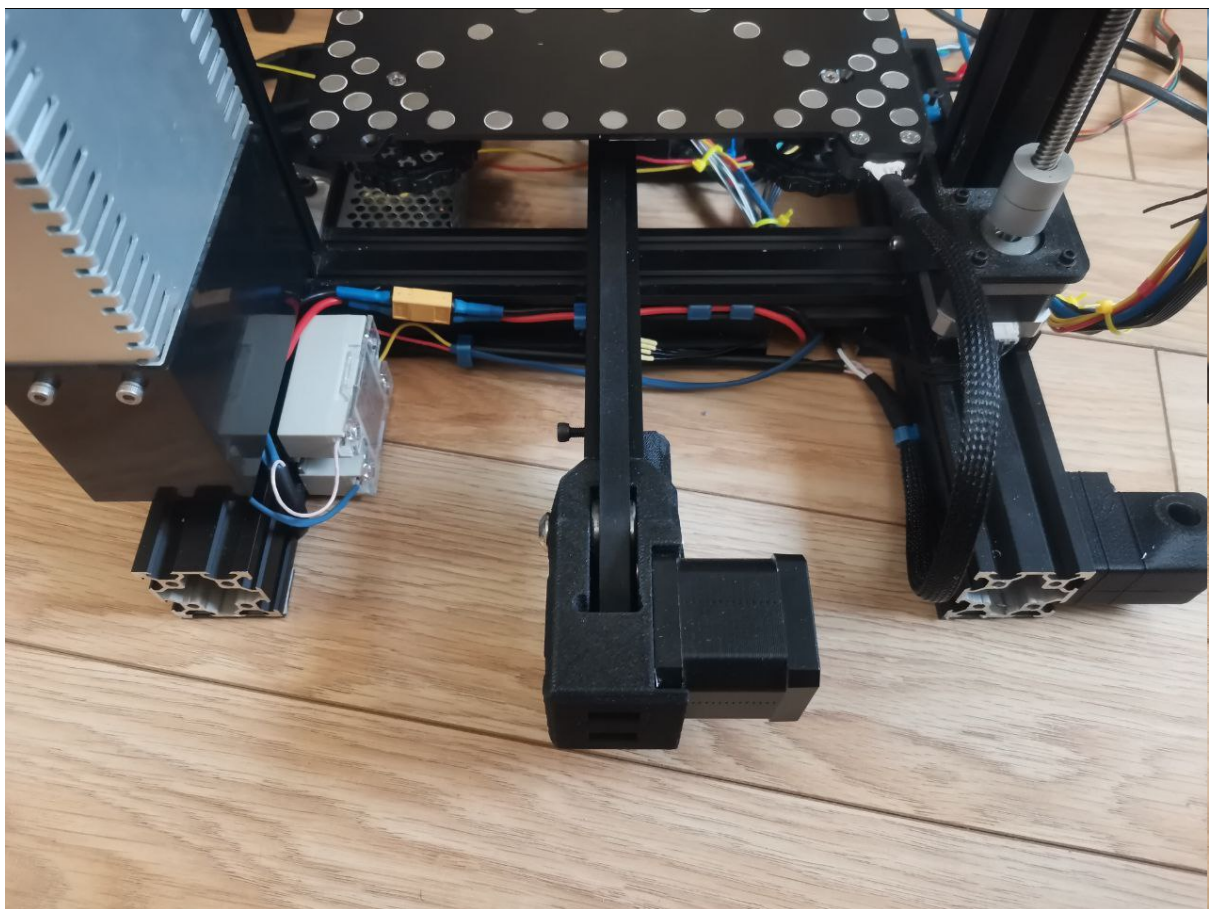


Рисунок 10 - прокладка проводов, установка твердотельного реле

Управление резисторами

Это самая важная и интересная часть данного документа. Логика работы с резисторами TELPOD кардинально отличается от управления стоковым нагревателем на 24в и от управления силиконовыми грелками.

Особенности управления резисторами TELPOD вытекают из следующих фактов:

1. Резисторы нагревают не весь стол сразу, а лишь 11% его площади
2. Температура резисторов в момент нагрева не равна температуре стола, более того, эта разница может превышать 100 градусов
3. На резисторы накладывается строгое ограничение по температуре сверху, обусловленное температурой плавления припоя.

- *А что будет если я просто подключу термистор в центре стола и запущу калибровку пидов, что я увижу?*

- *Пожар*



Рисунок 11 - пример неправильного управления нагревателем

Нет, пожар - это конечно утрирование, скорее результатом будет отвал провода от нагревателя и, если места пайки не залиты силиконом и провода не зафиксированы должным образом, КЗ. На фотографии показан нагрев при задушенном до 70% мощности нагревателе и калибровке ПИД всего лишь на 100 градусах. При полной мощности на резисторе и калибровке пидов на 120 градусах, температура на резисторе перевалила бы далеко за 250 градусов, а это уже близко к максимальной температуре эксплуатации самих резисторов.

- Окей, а как тогда этим всем управлять?
- Через костыли 😊

На самом деле можно настроить ПИДы руками и использовать для управления термистор в центре стола, но работать такая система будет из рук вон плохо. Виной тому большой лаг в системе: термистор в центре стола удалён от нагревателей на 35мм. То есть термистор воспринимает обратную связь от теплового воздействия нагревательных элементов только после прогрева 35мм алюминия между ними. Это очень много. В таком варианте ПИД будет работать плохо.

Лучше ситуация обстоит с термистором №2, он ближе к нагревателям, но использовать его для контроля температуры я бы тоже не советовал.

Идеальный вариант регулировать температуру резисторов таким образом, чтобы добиваться прогрева стола до нужной температуры. Проще говоря нужна некая функция связи между температурой стола и температурой резистора. Эту функция будет получена далее.

Настройка прошивки на примере конфигурационного файла Klipper:

```
[heater_bed]
heater_pin: HEAT_BED
sensor_type: EPCOS 100K B57560G104F
sensor_pin: SENS_BED_R
#control: pid
min_temp: 0
max_temp: 170


pwm_cycle_time: 0.2


max_power: 0.8

[verify_heater heater_bed]
check_gain_time: 120
max_error: 600
hysteresis: 7
```

```
[temperature_sensor SENS_BED]
sensor_type: EPCOS 100K B57560G104F
sensor_pin: SENS_BED
```

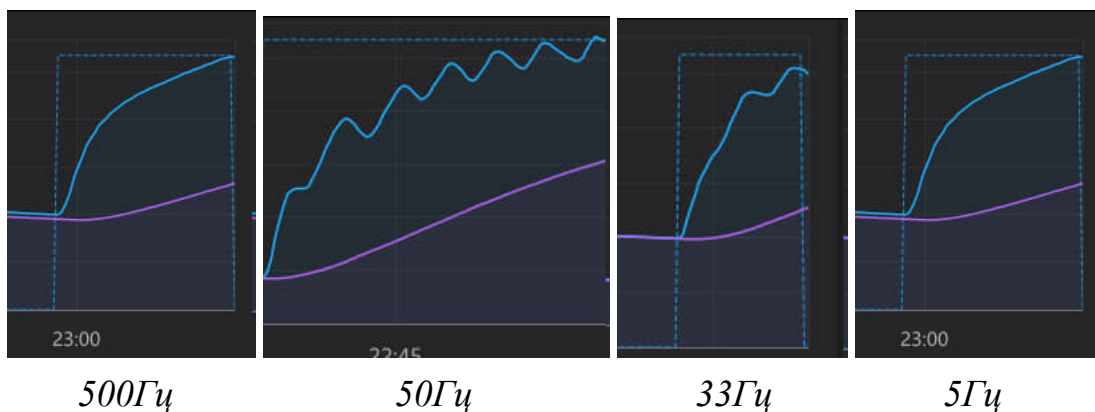
```
[temperature_sensor SENS_BED_2]
sensor_type: EPCOS 100K B57560G104F
sensor_pin: SENS_BED_2
```

Замечание:

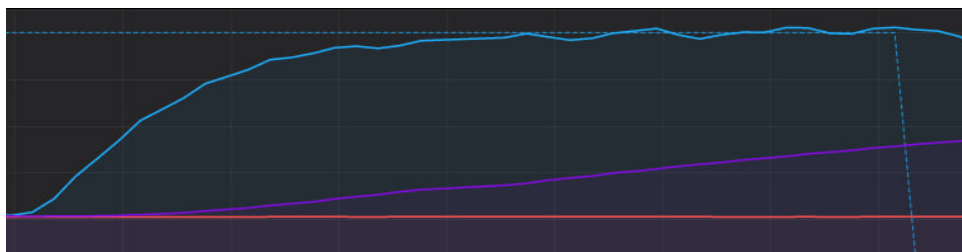
НИКОГДА НЕ ИСПОЛЬЗУЙТЕ СЕТЕВУЮ ЧАСТОТУ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫМИ РЕЛЕ БЕЗ КОНТРОЛЯ zero cross.

Результатом синфазности будет регулярная ошибка управления и как следствие падение мощности нагревателя и ухудшение работы ПИД регулятора.

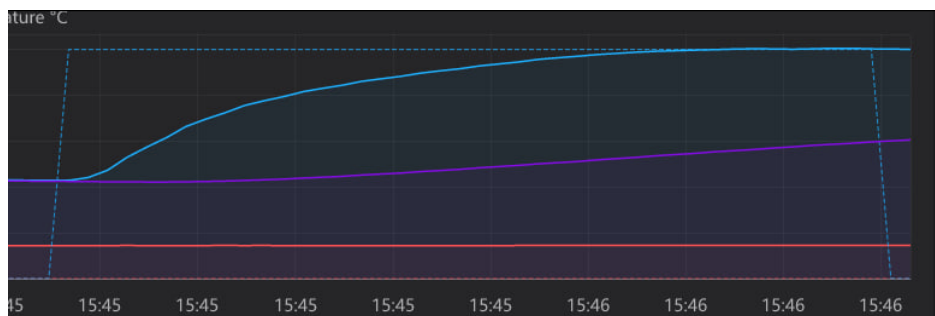
Для подтверждения этого привожу работу PWM 80% на разных частотах управляющего сигнала:



В примере конфигурационного файла частота управляющего сигнала задана 5Гц, так как на высоких частотах ПИД регулятор калибруется хуже.



Поддержание температуры после калибровки ПИД; частота управляющего сигнала 500Гц



Поддержание температуры после калибровки ПИД; частота управляющего сигнала 5Гц

После конфигурации прошивки можно переходить к определению функции перепада температур между корпусом резистора и поверхностью стола.

Получить эту функцию достаточно просто: нужно посмотреть до какой температуры нагревается стол при выставленной температуре резистора.

Продельываем следующую последовательность действий:

1. Выставляем на резисторе определённую температуру
2. Дожидаемся момента теплового равновесия (минут 5)
3. Запоминаем показание с термистора в центре стола
4. Повторяем пункты 1-3 несколько раз

Замечание:

Данная методика предполагает постоянство всех тепловых потоков, действующих на стол, во времени. Если у вас есть какой-то вентилятор электроники в подвале стола, который включается только при печати, его следует включить при выполнении данных измерений.

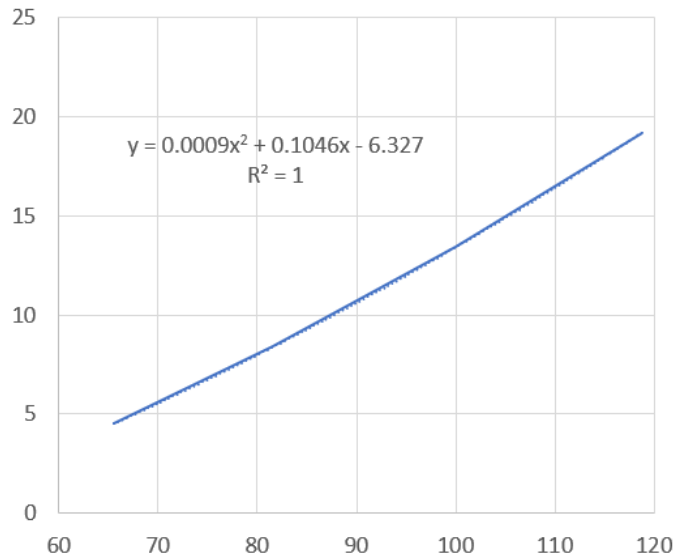
Замечание 2:

Как следствие наличие вспененного утеплителя стола увеличивает точность данной методики

В результате должна получиться таблица примерно следующего содержания:

стол	резистор	delta
65.5	70	4.5
81.6	90	8.4
100	113.4	13.4
118.8	138	19.2

По этой таблице можно построить график:



Далее необходимо получить интерполяцию этого графика гладкой функцией. Для этого следует скачать и открыть [эту таблицу](#) в excel и поправить значения на свои. Искомая функция будет написана на самом графике.

Полученную функцию загоняем в стартовый код слайсера и добавляем 10 секунд времени на ожидание прогрева:

```
M190 S160
TEMPERATURE_WAIT SENSOR="temperature_sensor SENS_BED"
MINIMUM=first_layer_bed_temperature[0]
M190 S{first_layer_bed_temperature[0] + 0.0009 *
first_layer_bed_temperature[0] *
first_layer_bed_temperature[0] + 0.1046 *
first_layer_bed_temperature[0] - 6.327}
G4 P10000
```

Данные, которые следует поправить, выделены цветом.

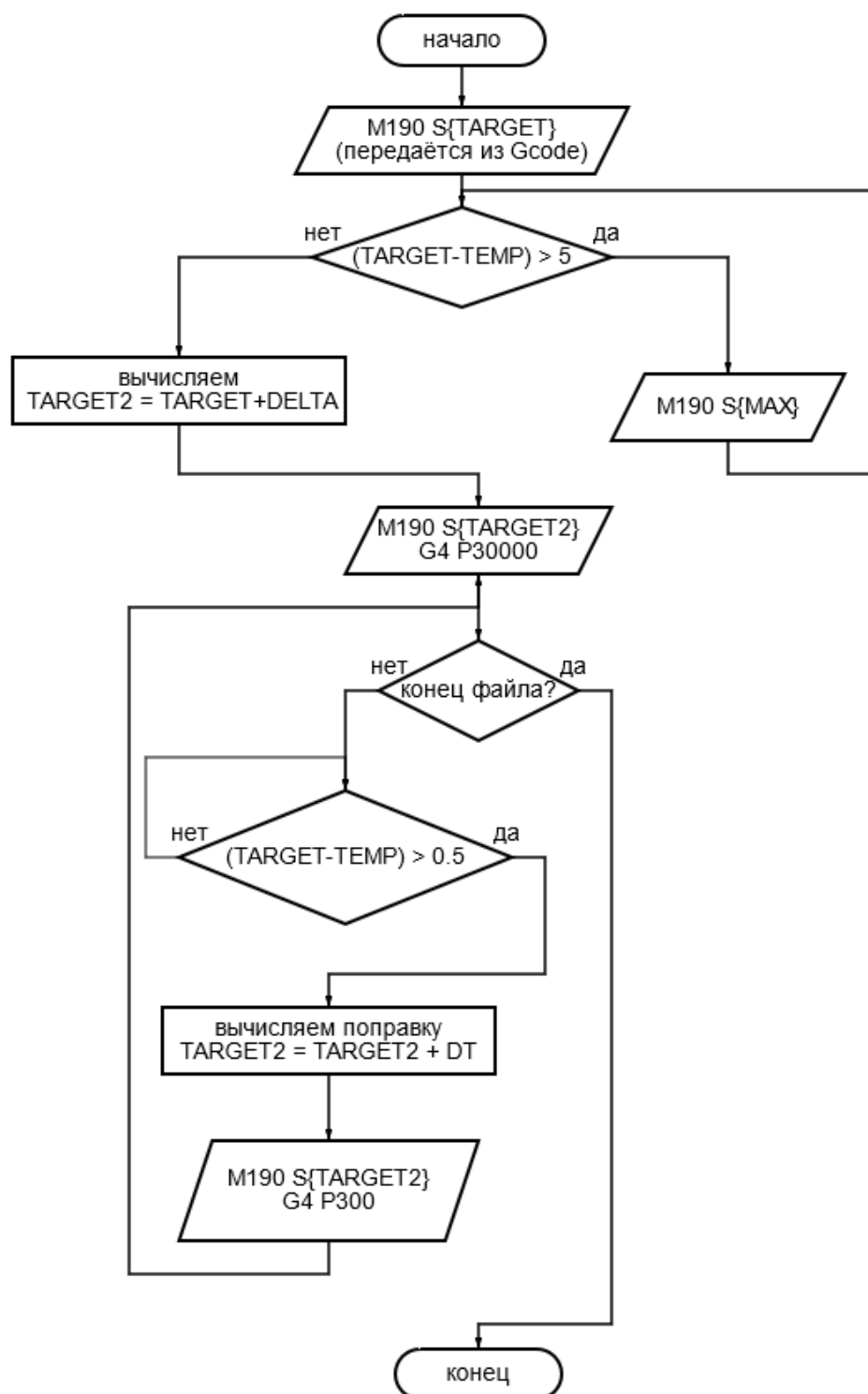
Всё. теперь можно печатать.

Планы на будущее

Описанный выше алгоритм хоть и является полностью рабочим, он остаётся далёк от идеала. Во-первых, манипуляции с M190 лучше оформить как макрос в клиппере, во-вторых, сам алгоритм управления

может быть оптимизирован в рамках этого макроса как по части скорости нагрева стола, так и по части точности поддержания температуры.

“Идеальный” алгоритм управления:



TARGET - температура, выставленная в слайсере

TARGET2 - температура резистора, соответствующая температуре TARGET стола

TEMP - температура по термистору в центре стола

MAX - максимальная температура резистора

Для тех, кто запутался в блок-схеме, поясню на примере работы предполагаемого макроса:

1. В слайсере выставлена температура стола 100 градусов, она передаётся из GCODE в макрос
2. Эта температура сравнивается с текущей температурой стола. Если стол холоднее более, чем на 5 градусов, значит стол можно греть с максимальной мощностью.
3. Максимальная мощность = максимальная температура корпуса резистора, которая для припоя ПОС61 будет 160 градусов
4. Когда стол прогрелся и разница температур желаемой и действительной стала меньше 5 градусов, максимальный нагрев надо выключать
5. Вычисляем температуру резистора по интерполированной функции (см стр 17)
6. Поддерживаем температуру на резисторе равную TARGET2 и ждём 30 секунд перед началом печати для стабилизации стола
7. В процессе печати каждые 300мс корректируем температуру стола для компенсации ошибки, вызванной изменением температуры и подвижности среды в помещении.