



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ «Радиоэлектроника и лазерная техника»

КАФЕДРА «Радиоэлектронные системы и устройства»

РАСЧЁТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ НА ТЕМУ:

Технологическое проектирование цифрового лабораторного
блока питания с активным ККМ

Студент группы РЛ1-74

(Подпись, дата)

И.Е. Калайда

(И.О. Фамилия)

Руководитель курсового проекта

(Подпись, дата)

М.В. Родин

(И.О. Фамилия)

2022 г.

РЕФЕРАТ

Расчетно-пояснительная записка 46 с., 25 рис., 11 ист., 4 прил.

ЛАБОРАТОРНЫЙ БЛОК ПИТАНИЯ, ЦИФРОВОЙ ИМПУЛЬСНЫЙ БЛОК ПИТАНИЯ, АКТИВНЫЙ КОРРЕКТОР КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ, СИЛОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР, ДЕЖУРНОЕ ПИТАНИЕ, ПОЛУМОСТОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ, ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ

Объектом разработки является лабораторный блок питания с активным корректором коэффициента мощности.

Цель работы — провести разработку лабораторного блока питания, рассчитать параметры входящих в него трансформаторов, определить параметры линий разводки печатных плат, спроектировать корпус и провести тепловой анализ.

В процессе работы были рассчитаны силовой трансформатор и трансформатор дежурного питания. Были оценены граничные условия параметров разводки печатных плат, спроектирован корпус блока питания и проведен анализ температур и турбулентностей воздушных потоков.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Расчет трансформаторов	6
1.1 Расчет силовых трансформаторов	6
1.2 Расчет трансформатора дежурного питания	14
2 Проектирование печатной платы ККМ	19
2.1 Расчет ширины линий питания	19
2.2 Расчет зазоров линий ПП	22
2.3 Определение класса печатной платы	24
3 Проектирование корпуса блока питания	25
3.1 Проектирование модели корпуса	25
3.2 Упрощенное представление печатных плат	26
3.3 Тепловой расчет корпуса	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	32
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	33
ПРИЛОЖЕНИЕ А Техническое задание	35
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Структурная схема лабораторного блока питания	36
ПРИЛОЖЕНИЕ В Принципиальная схема блока дежурного питания	38
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Чертежи корпуса 19'	42

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БИ	— блок измерений
БК	— блок коммутации
БУ	— блок управления
ДП	— дежурное питания
ККМ	— корректор коэффициента мощности
КМ	— коэффициент мощности
КПД	— коэффициент полезного действия
ЛБП	— лабораторный блок питания
ПМ	— полумостовая схема
ПН	— преобразователь напряжения
ПП	— печатная плата
ПУ	— плата управления
СЗ	— схема защиты
СФ	— синфазный фильтр
ТЗ	— техническое задание
ШИМ	— широтно-импульсная модуляция

ВВЕДЕНИЕ

Современные потребности комплексного анализа электрических цепей требуют использования измерительного комплекса с единой системой управления, позволяющей запускать сложные автоматизированные сценарии анализа. Данная задача требует использовать цифровые измерительные устройства, интегрированные в сеть с централизованным управлением. Для обеспечения вариативности совмещения различного оборудования необходимо использовать корпуса и несущие конструкции широко распространенного стандарта.

Для проведения многих исследований требуется подача питания в анализируемую цепь или устройство, при этом требуются высокие характеристики точности и стабильности подаваемого напряжения различных номиналов, зачастую может требоваться питание модулированным напряжением. Также в современном мире предъявляются высокие требования к коэффициенту полезного действия (КПД) и коэффициенту мощности (КМ) оборудования в качестве нагрузки электрической сети. Эти потребности может обеспечить многоканальный цифровой лабораторный блок питания (ЛБП). Также, кроме точности, ЛБП должен обладать высокой надежностью для исключения поломок подключаемых устройств, обеспечивающаяся разделением отдельных выходных каналов и дополнительными датчиками на всем протяжении силовой линии.

С увеличением потребляемой мощности постоянного тока возникают проблемы, связанные с ухудшением качества питающей сети. Любой выпрямитель является генератором высших гармоник. Для решения вышеперечисленных проблем используются корректор коэффициента мощности (ККМ), устройства обеспечивающие снижение влияния негативных параметров потребляемого тока выпрямителей с общей нейтралью потребителей малой и средней мощности на параметры качества напряжения питающей сети.

1 Расчет трансформаторов

1.1 Расчет силовых трансформаторов

В лабораторном блоке питания присутствует силовая линия, несущая необходимые токи и напряжения на выводы устройства, а также вспомогательные линии питания, обеспечивающие работу силовой части.

В соответствии с функциональной схемой (ПРИЛОЖЕНИЕ Б), силовая линия 400 В проходит из корректора коэффициента мощности (ККМ) через полумостовые схемы (ПМ) на силовые трансформаторы. В соответствии с техническим заданием (ТЗ), каждый силовой трансформатор должен иметь одну первичную обмотку, рассчитанную на переменное напряжение 400 В, а также четыре одинаковых вторичных обмотки, обеспечивающие на выходе напряжение 20 В и предельный ток 5 А. Частота переключений ПМ составляет 100 кГц. Далее, вторичные обмотки подключаются к блоку коммутации (БК), обеспечивающему параллельное или последовательное включение обмоток для получения выходных значений напряжения и тока 20 В 20 А и 40 В 10 А соответственно. Суммарная мощность трансформатора составляет 400 Вт.

В соответствии с [1], для расчета трансформатора необходимо сначала определить входную мощность:

$$P_{\text{вх}} = P_{\text{вых}} \cdot \eta, \quad (1)$$

где $P_{\text{вых}}$ — требуемая выходная мощность трансформатора, а η — КПД трансформатора, на базе статистических данных принимается равным 0,99.

Далее производим расчет входного тока трансформатора при полученной входной мощности:

$$I_{\text{вх}} = P_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{вх}}$ — амплитуда входного напряжения трансформатора.

По полученным данным производится выбор сердечника трансформатора. Одним из самых распространенных производителей ферритовых сердечников для трансформаторов и дросселей является компания Epcos, являющаяся дочерним предприятием компании TDK. Этой компанией была разработана программа Ferrite Magnetic Design Tool,

позволяющая разработчикам электронных приборов, использующим продукцию Epcos, получать необходимые параметры ферритовых сердечников [2].

На странице Material Properties во вкладке Material Specifications получаем характеристики материала магнитопровода, например, N87 (рисунок 1).

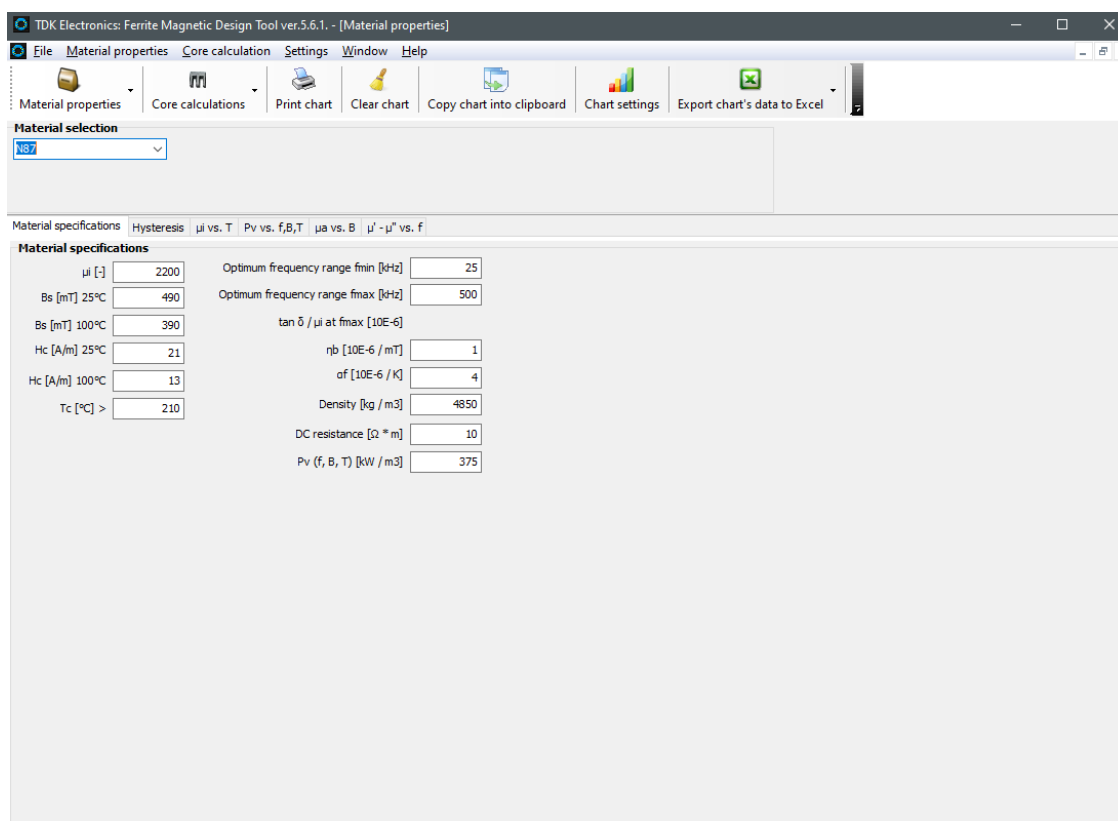


Рисунок 1 – Параметры материала N87

На той же странице во вкладке Hysteresis доступен график петли гистерезиса с возможностью вывода точек графика в таблицу или текстовый документ. Пример окна с вкладкой Hysteresis приведён на рисунке 2.

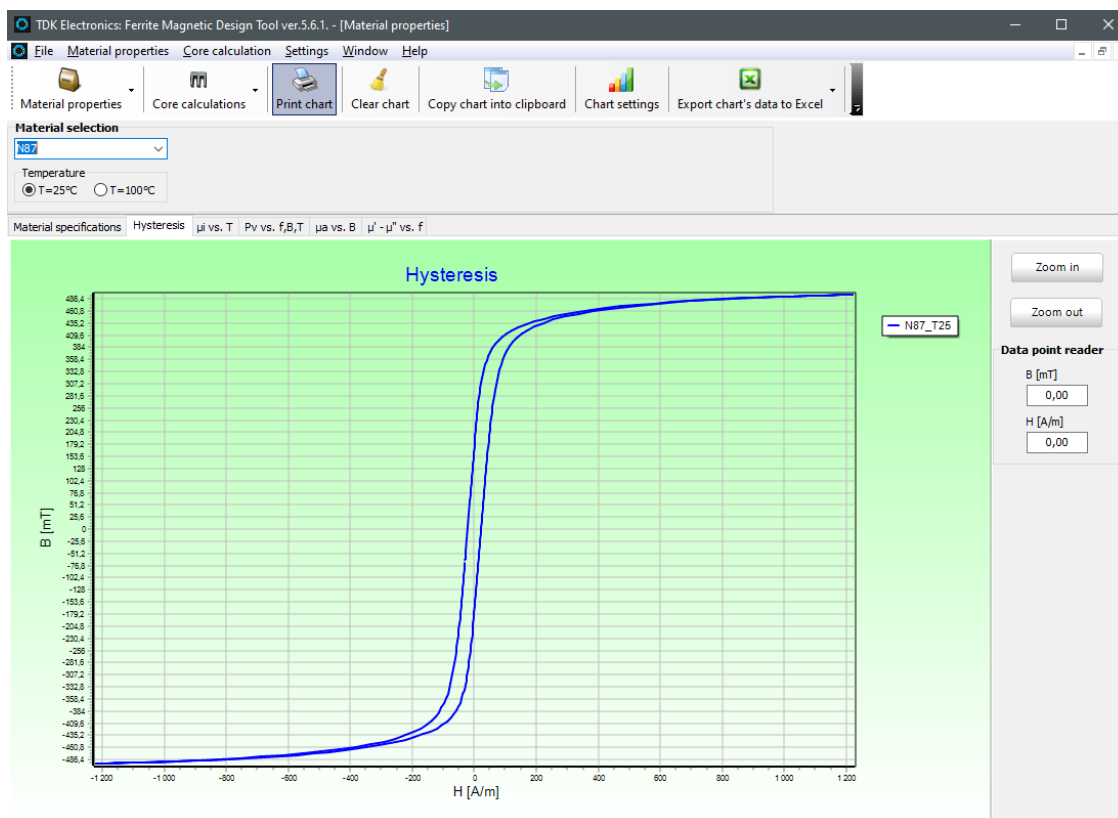


Рисунок 2 – Петля гистерезиса материала N87

Перейдя на страницу Core Calculations на вкладку Ptrans разработчику предоставляется возможность грубо оценить мощность теоретического трансформатора, собранного на выбранном сердечнике. Пример использования для сердечника типоразмера ETD39 и материала N87 представлен на рисунке 3.

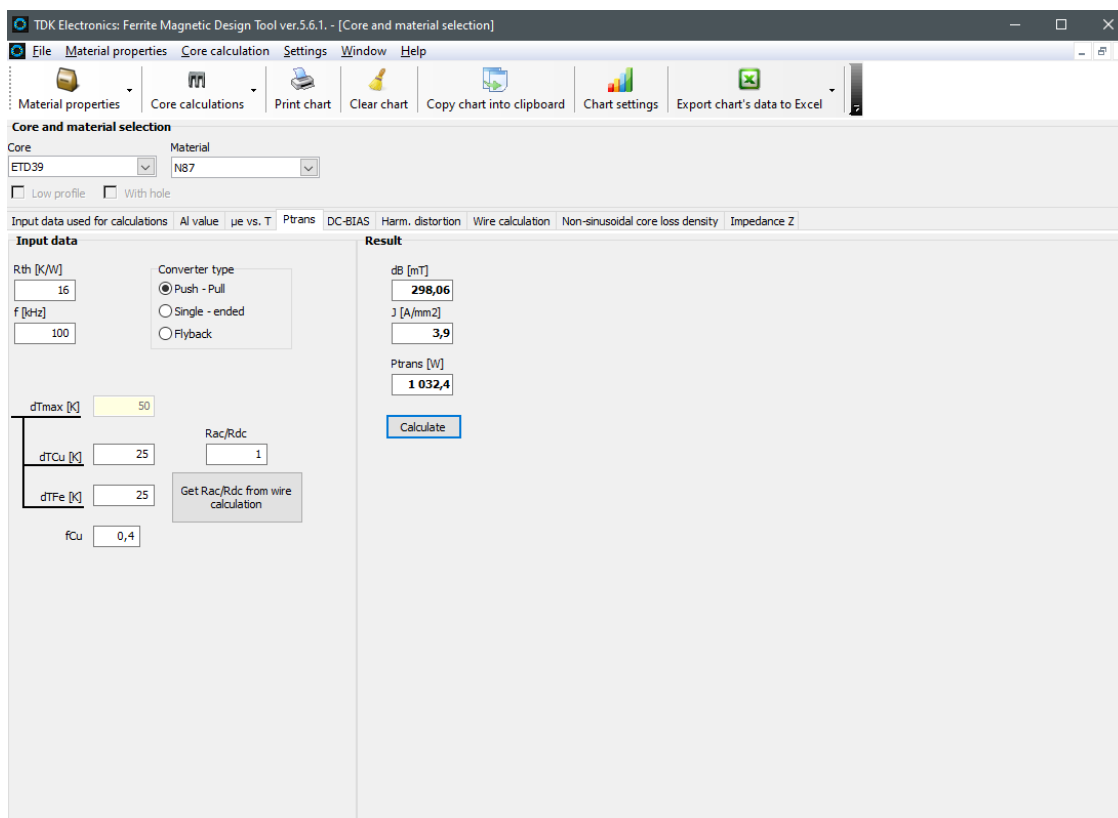


Рисунок 3 – Мощность трансформатора из материала N87

Используя программу Ferrite Magnetic Design Tool, определяем предельное значение плотности тока, обеспечиваемой магнитопроводом. Исходя из полученного значения производится расчет сечений проводов для каждой из обмоток:

$$q_{BX} = I_{BX} / \Delta_{BX}, \quad (3)$$

$$q_{ВЫХ} = I_{ВЫХ} / \Delta_{ВЫХ}, \quad (4)$$

где I — амплитуда тока на обмотке трансформатора, Δ — плотность тока выбранной обмотки, выбирается не больше плотности тока, обусловленной сердечником трансформатора.

Затем производим расчет количества витков для каждой обмотки по формуле 5.

$$n_{BX} = \frac{U_{BX} \cdot 10^4}{4 \cdot k_{\Phi} \cdot f \cdot B \cdot Q}, \quad (5)$$

где U_{BX} — напряжение входной обмотки трансформатора; k_{Φ} — коэффициент формы трансформируемого сигнала (для синусоидального равен 1,11, для прямоугольного - 1); f — частота трансформируемого сигнала; B —

магнитная индукция, не должна превышать предельное значение выбранного магнитопровода при выбранной частоте f ; Q — площадь поперечного сечения выбранного магнитопровода.

Для удобства количество витков можно незначительно округлять в большую сторону.

Для расчета количества витков во вторичной обмотке необходимо сначала рассчитать, сколько В (Вольт) приходится на один виток трансформатора:

$$e_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{n_{\text{ВХ}}}. \quad (6)$$

По полученному в формуле 6 отношению можем посчитать необходимое число витков вторичной обмотки:

$$n_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}} \cdot m_{\text{ВЫХ}}}{e_{\text{ВХ}}}, \quad (7)$$

где $m_{\text{ВЫХ}}$ — коэффициент, учитывающий падение напряжения на вторичной обмотке. Данный коэффициент рассчитывается по формуле 8.

$$m_{\text{ВЫХ}} = 1 + \Delta U, \quad (8)$$

где ΔU — падение напряжения в обмотке. Берется в численных величинах. Например, для выбранного магнитопровода $\Delta U \leq 3\%$. Тогда принимаем для обмотки $\Delta U = 0,5\%$ и рассчитываем $m = 1 + 0,005 = 1,005$.

После проведенного электрического расчета необходимо провести дополнительный конструкционный расчет. У каждого сердечника есть предельная ширина окна намотки, обусловленная конструкцией сердечника. Чтобы убедиться, что обмотки поместятся в обозначенное окно сердечника производим расчет коэффициента заполнения окна по формулам 9 - 12. Разрез трансформатора изображен на рисунке 4 (Половинки сердечника обозначены как А1 и А2).

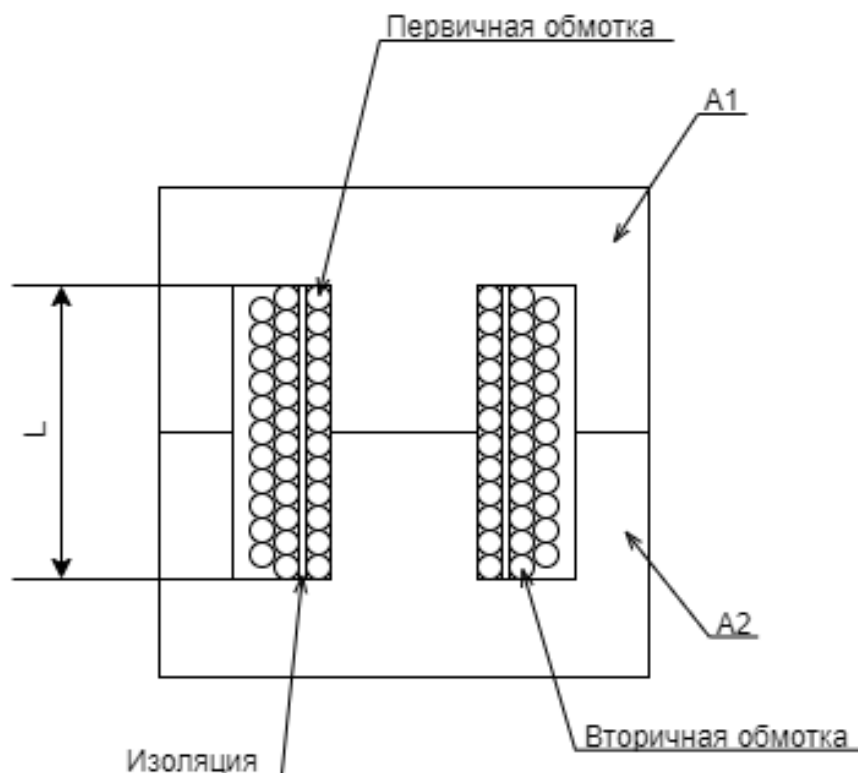


Рисунок 4 – Разрез трансформатора

Сначала рассчитываем количество витков каждой из обмоток в одном ряду:

$$b = \frac{L_{\text{н}} \cdot k_{\text{у}}}{d_{\text{из}}}, \quad (9)$$

где $L_{\text{н}}$ — длина окна намотки, изображена на рисунке 4; $k_{\text{у}}$ — коэффициент укладки провода (выбирается в диапазоне 0,92 - 0,98); $d_{\text{из}}$ — диаметр провода обмотки по изоляции. Количество витков в одном ряду намотки округляется до целых в меньшую сторону.

Далее производим расчет количества слоев намотки для каждой из обмоток:

$$N = \frac{n \cdot k_{\text{пр}}}{b}, \quad (10)$$

где n — число витков обмотки; $k_{\text{пр}}$ — коэффициент параллельной намотки проводов: для намотки в один провод $k_{\text{пр}} = 1$, для намотки в два провода - $k_{\text{пр}} = 1$ и т.д.; b — количество витков в одном ряду намотки, рассчитанное по формуле 9.

Затем производим расчет высоты общей намотки на сердечник

трансформатора:

$$h_{\text{нам}} = \sum_{i=1}^M d_{\text{изи}} \cdot N_i + \sum_{j=1}^K \delta_j, \quad (11)$$

где $\sum_{i=1}^M d_{\text{изи}} \cdot N_i$ — общая толщина обмоток количества M , намотанных проводами, имеющими диаметр по изоляции $d_{\text{изи}}$ в N_i слоя; $\sum_{j=1}^K \delta_j$ — общая толщина изолирующих междуслойных прокладок толщиной δ_j в количестве K .

После чего можем посчитать коэффициент заполнения окна:

$$k_{\text{зап}} = \frac{h_{\text{нам}}}{h_{\text{окна}}}, \quad (12)$$

где $h_{\text{нам}}$ — рассчитанная в формуле 11 общая толщина обмоток; $h_{\text{окна}}$ — ширина окна намотки, обусловленная выбранным сердечником. Коэффициент заполнения окна $k_{\text{зап}}$ должен удовлетворять условию $k_{\text{зап}} \leq 0,3$.

Для упрощения расчетов участниками сообщества радиоинженеров и радиолюбителей был разработан пакет программ, доступный бесплатно всем желающим и включающий в себя программу для расчета силового трансформатора ExcellentIT и её упрощенную версию, использующая для многих промежуточных коэффициентов стандартные значения Light-CalcIT [3].

Для расчета трансформатора по техническому заданию воспользуемся программой Light-CalcIT. Окно программы изображено на рисунке 5.

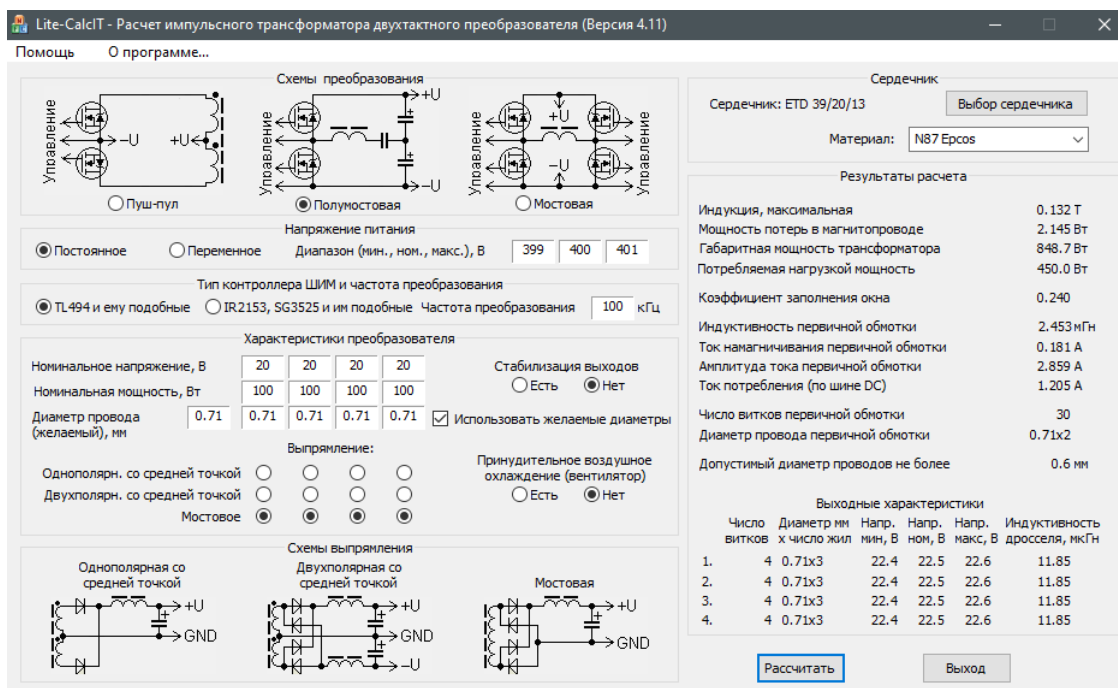


Рисунок 5 – Окно программы Light-CalcIT

Здесь мы задаем все входные данные:

- схема преобразования — полумостовая;
- напряжение питания — постоянное, 400 В;
- тип контроллера ШИМ — оставляем по умолчанию, TL494;
- частота преобразования — 100 кГц;
- четыре вторичных обмотки 20 В 5 А (100 Вт);
- желаемый диаметр провода и для первичной, и для вторичных обмоток один — 0,71 мм;
- выпрямление напряжения на вторичных обмотках будет производиться по мостовой схеме;
- материал сердечника — N87;
- формат сердечника — ETD, для экономии места выбираем размер 39/20/13.

По итогам расчета получаем параметры намотки трансформатора (рисунок 6).

Результаты расчета	
Индукция, максимальная	0.132 Т
Мощность потерь в магнитопроводе	2.145 Вт
Габаритная мощность трансформатора	848.7 Вт
Потребляемая нагрузкой мощность	450.0 Вт
Козффициент заполнения окна	0.240
Индуктивность первичной обмотки	2.453 мГн
Ток намагничивания первичной обмотки	0.181 А
Амплитуда тока первичной обмотки	2.859 А
Ток потребления (по шине DC)	1.205 А
Число витков первичной обмотки	30
Диаметр провода первичной обмотки	0.71x2
Допустимый диаметр проводов не более	0.6 мм

Выходные характеристики						
	Число витков	Диаметр мм x число жил	Напр. мин, В	Напр. ном, В	Напр. макс, В	Индуктивность дросселя, мкГн
1.	4	0.71x3	22.4	22.5	22.6	11.85
2.	4	0.71x3	22.4	22.5	22.6	11.85
3.	4	0.71x3	22.4	22.5	22.6	11.85
4.	4	0.71x3	22.4	22.5	22.6	11.85

Рисунок 6 – Результат работы Light-CalcIT

1.2 Расчет трансформатора дежурного питания

В соответствии с функциональной схемой лабораторного блока питания (ПРИЛОЖЕНИЕ Б), для обеспечения работы основной силовой части устройства присутствуют платы управления (ПУ), блоки измерений (БИ) и блоки управления (БУ). Всем им требуется свой источник питания, обеспечивающий работу отдельно от силовой линии. Эта задача ложится на плату дежурного питания (ДП). ПУ принимают стабильные 5 В для обеспечения работы контроллеров управления. БУ и БИ принимают дополнительное питание 6 В для обеспечения работы операционных усилителей. Также, плата ДП обеспечивает каждую из полумостовых схем (ПМ) и ККМ своим источником напряжения 12 В для обеспечения работы ключей.

Дежурное питание лабораторного блока питания выполнено по распространенной схеме обратноходового преобразователя

(ПРИЛОЖЕНИЕ В) на основе контроллера широтно-импульсной модуляции (ШИМ) UC3842 [4] и управляемого стабилитрона TL431 [5]. Необходимо обеспечить следующие параметры:

- схема преобразования — обратноходовая;
- напряжение первичной обмотки — 400 В;
- напряжения вторичных обмоток — 6 В 1 А x1, 12 В 0,5 А x1, 20 В 0,1 А x1, 24 В 0,5 А x2 (с отводом в середине);
- используемый в обратноходовой схеме ключ — STD3NK80Z [6];
- частота коммутации — 100 кГц.

В соответствии с [7] для начала производится расчет индуктивности первичной обмотки трансформатора. Для этого используется формула дросселя 13, так как в обратноходовом преобразователе напряжения (ПН) при открытом ключе в первичной обмотке накапливается энергия, как в дросселе, а при закрытом - передается во вторичную обмотку.

$$L_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot \Delta t}{I_{\text{ср}}}, \quad (13)$$

где $U_{\text{вх}}$ — напряжение, прикладываемое к первичной обмотке; Δt — длительность импульса, проходящего через индуктивность. Выбирается исходя из необходимого режима работы ПН; $I_{\text{ср}}$ — средний ток, проходящий через первичную обмотку.

Так как нам известна мощность, которую необходимо передать во вторичные обмотки, рассчитываем средний ток $I_{\text{ср}}$:

$$I_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{транс}}}{U_{\text{вх}}}, \quad (14)$$

где $P_{\text{транс}}$ — общая мощность всех вторичных обмоток; $U_{\text{вх}}$ — напряжение первичной обмотки.

Далее, по такой же формуле дросселя, как и в случае 13 производим расчет индуктивности каждой из вторичных обмоток:

$$L_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}} \cdot \Delta t}{I_{\text{пик}}}, \quad (15)$$

где $U_{\text{вых}}$ — напряжение, которое необходимо обеспечить данной обмоткой трансформатора; Δt — та же длительность импульса, что и в формуле 13; $I_{\text{пик}}$ — пиковое значение тока, которое необходимо обеспечить данной обмоткой трансформатора.

Затем рассчитываем отношения количества витков первичной обмотки к количеству витков каждой из вторичных обмоток:

$$\frac{N_{\text{BX}}}{N_{\text{ВЫХ}}} = \sqrt{\frac{L_{\text{BX}}}{L_{\text{ВЫХ}}}}. \quad (16)$$

Это же соотношение справедливо и для напряжений на обмотках:

$$\frac{N_{\text{BX}}}{N_{\text{ВЫХ}}} = \frac{U_{\text{BX}}}{U_{\text{ВЫХ}}}. \quad (17)$$

Может показаться, что это классическое уравнение трансформатора. Эти уравнения действительно схожи, так как обмотки связаны, но следует помнить, что напряжения обмоток определяются их индуктивностями. В свою очередь уравнения трансформатора применимы только тогда, когда ток как в первичной, так и во вторичной обмотке протекает одновременно.

Далее, опираясь на [8], производим расчет индуктивности каждого из дросселей по формуле:

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S_{\text{сеч}}}{l_{\text{ср}}}, \quad (18)$$

где μ и μ_0 — относительная магнитная проницаемость сердечника и магнитная постоянная соответственно; N — количество витков дросселя; $S_{\text{сеч}}$ — площадь сечения сердечника дросселя; $l_{\text{ср}}$ — длина средней линии магнитопровода.

Параметры сердечника можно получить из рассмотренной ранее программы Ferrite Magnetic Design Tool [2].

Так как по формулам 13 и 15 уже были определены необходимые индуктивности обмоток, преобразуем формулу 18 для расчета необходимого количества витков на выбранном сердечнике:

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot l_{\text{ср}}}{\mu\mu_0 S_{\text{сеч}}}}. \quad (19)$$

Для упрощения расчетов трансформаторов обратноходовых схем преобразования напряжения в рассмотренном ранее пакете программ AllInOne [3] присутствует программа Flyback и её упрощённый аналог Flyback-Lite. Они производят все необходимые расчеты по заданным пользователем параметрам, что позволяет избежать многих ошибок и сократить время разработки устройства.

Воспользуемся программой Flyback-Lite. Окно программы изображено

на рисунке 7.

Рисунок 7 – Окно программы Flyback-Lite

Заполним известные параметры:

- напряжение питания — постоянное, от 85 В до 410 В;
- частота преобразования — 100 кГц;
- максимальное напряжение на ключе — 800 В, из документации на STD3NK80Z [6];
- сопротивление открытого канала — 3,8 Ом, из документации на STD3NK80Z [6];
- диаметр провода первичной обмотки — 0,71 мм, как у силового трансформатора, для повышения технологичности производства;
- параметры вторичных обмоток: 20 В 0,1 А, 6 В 1 А, 12 В 0,5 А, 24 В 0,1 А, 24 В 0,1 А, падение напряжения на диоде 0,5 В, диаметр провода 0,71 мм;
- величина немагнитного зазора — 0,5 мм;
- сердечник — ETD 29/16/10 из материала N87.

По завершении расчета получаем параметры трансформатора, изображенные на рисунке 8.

Результаты расчета					
Сердечник					
Требуемый немагнитный зазор, не менее	0.21 мм				
Амплитуда индукции (не более 0.271 Т)	0.173 Т				
Мощность потерь в магнитопроводе	0.348 Вт				
Коэффициент заполнения окна	0.204				
Первичная обмотка					
Индуктивность первичной обмотки	97.496 мкГн				
22 витков, провод 0.71 x 1	Плотность тока	3.139			
Отраженное напряжение	75.2 В				
Выброс напряжения на ключе от Ls не более	314.8 В				
Амплитуда тока транзистора	2.963 А				
Сопротивление датчика тока	0.194 Ом				
Емкость конденсатора выпрямителя (минимум)	543 мкФ				
Напряжение питания	мин.	ном.	макс.		
Ток потребления (по шине DC), А	0.539	0.107	0.104		
Коэффициент заполнения импульса	0.364	0.072	0.070		
Вторичные обмотки					
Витки	Провод	U вых.	Ud обрат.	Ic(rms)	Плот. тока
1.	6 0.71 x 1	20.00 В	132 В	0.105 А	0.440
2.	2 0.71 x 1	6.33 В	44 В	1.047 А	4.405
3.	4 0.71 x 1	13.17 В	88 В	0.523 А	2.202
4.	8 0.71 x 1	26.83 В	176 В	0.523 А	2.202
5.	8 0.71 x 1	26.83 В	176 В	0.523 А	2.202

Рисунок 8 – Результат расчета в программе Flyback-Lite

2 Проектирование печатной платы ККМ

2.1 Расчет ширины линий питания

Для определения толщины металлизации воспользуемся программными решениями, встроенными в средство проектирования печатных плат (ПП) KiCad [9]. Калькулятор толщины и ширины дорожки позволяет рассчитать параметры трассируемой дорожки в зависимости от протекающего по ней тока, возможного превышения температуры и материала металлизации (рисунок 9).

PCB Calculator

Регуляторы | **Ширина дорожки** | Электрический зазор | Линия передачи | СВЧ аттенуатор | Цветовой код | Классы плат

Параметры:

Ток: 1.0 A

Превышение температуры: 10.0 °C

Длина проводника: 20 mm

Удельное сопротивление: 1.72e-8 Ом/м

Если указать максимальный ток, то будет рассчитана соответствующая ширина трассировки. Если указать одну трассировочную ширину, то будет рассчитан допустимый максимальный ток. Также будет рассчитана ширина других трассировок, допускающих данный ток. Контрольные значения выделены жирным.

Вычисления справедливы для токов до 35 А (внешний) или 17,5 А (внутренний), повышение температуры до 100 °C и ширина до 10 мм (400 мил).
Формула из IPC 2221

$$I = K \cdot dT^{0.44} \cdot (W \cdot H)^{0.725}$$

где:
I = максимальный ток в А
dT = превышение температуры выше окружающей среды в °C
W, H = ширина и толщина в мил
K = 0,024 для внутренней трассировки или 0,048 для внешней трассировки

Внешний слой трассировки:

Ширина трассировки: 0,300387 мм

Толщина трассировки: 0,035 мм

Площадь поперечного сечения: 0,0105135 мм x мм

Сопротивление: 0,0327197 Ом

Падение напряжения: 0,0327197 В

Потери мощности: 0,0327197 Ватт

Внутренний слой трассировки:

Ширина трассировки: 0,781437 мм

Толщина трассировки: 0,035 мм

Площадь поперечного сечения: 0,0273503 мм x мм

Сопротивление: 0,0125776 Ом

Падение напряжения: 0,0125776 В

Потери мощности: 0,0125776 Ватт

Рисунок 9 – Окно калькулятора толщины и ширины дорожек KiCad

Расчет производится по стандарту ГОСТ Р 55693-2013 (межд. IPC 2221A) [10].

$$I = K \cdot dT^{0,44} \cdot (W \cdot H)^{0,725}, \quad (20)$$

где I — максимальный ток, протекающий в линии; dT — превышение температуры окружающей среды; W и H — ширина дорожки и толщина металлизации соответственно; K — коэффициент, показывающий размещение линии на слое. Для внешних слоев $K = 0,048$, для внутренних $K = 0,024$.

В соответствии с ТЗ (ПРИЛОЖЕНИЕ А) лабораторный блок питания обеспечивает суммарную мощность на всех выходных каналах порядка

1600 Вт. В соответствии с функциональной схемой, данная мощность передается по линии 400 В от корректора коэффициента мощности к платам выходных каналов. Рассчитаем ток, протекающий по данной линии:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1600 \text{ Вт}}{400 \text{ В}} = 4 \text{ А.} \quad (21)$$

Подставим известные параметры в средство проведения расчета (рисунок 10).

- протекающий ток — 4 А;
- превышение температуры — оставим незначительные 10 °С;
- длина проводника — не имеет значения, так как учитывается только для расчета потерь в линии;
- удельное сопротивление материала проводника — не имеет значения, так как учитывается только для расчета потерь в линии.

Parameters:

Ток:	4.0	А
Превышение температуры:	10	°C
Длина проводника:	20	мм
Удельное сопротивление:	1.72e-8	Ом/м

Рисунок 10 – Внесение данных в расчет ширины дорожек

Дополнительно выбираем толщину металлизации стеклотекстолита. Для производства платы будет использоваться стеклотекстолит с толщиной металлизации не менее 70 мкм. Это значение и укажем в расчете (рисунок 11). Там же получаем результат расчета.

External layer routing:

Ширина трассировки:	1,01643	мм
Толщина трассировки:	70	мкм

Рисунок 11 – Результат расчета ширины дорожек

Далее произведем расчет ширины дорожек для линий дежурного питания.

На вход схемы дежурного питания приходит линия 400 В с ККМ, рассчитанная ранее.

На выходе схемы дежурного питания имеем четыре вида линий:

- 6 В 1 А для питания контроллеров (после стабилизации 5 В);
- 13 В 0,5 А для питания ключей ККМ (после стабилизации 12 В);
- 27 В 0,5 А для питания ключей полумостовых схем (после стабилизации 24 В);
- 20 В 0,1 А для обратной связи обратногоходовой схемы.

Так как схема дежурного питания располагается на той же плате, что и ККМ, толщина металлизации остается та же. Превышение температуры уменьшим до 5 °С. Произведем необходимые расчеты (Рисунки 12 - 14)

Параметры:		Внешний слой трассировки:	
Ток:	1 А	Ширина трассировки:	0,228741 мм
Превышение температуры:	5 °С	Толщина трассировки:	70 мкм
Длина проводника:	20 мм	Площадь поперечного сечения:	0,0160119 мм х мм
Удельное сопротивление:	1,72e-8 Ом/м	Сопротивление:	0,021484 Ом
		Падение напряжения:	0,021484 В

Рисунок 12 – Расчет ширины дорожек линии 6 В

Параметры:		Внешний слой трассировки:	
Ток:	0.5 А	Ширина трассировки:	0,0879287 мм
Превышение температуры:	5 °С	Толщина трассировки:	70 мкм
Длина проводника:	20 мм	Площадь поперечного сечения:	0,00615501 мм х мм
Удельное сопротивление:	1,72e-8 Ом/м	Сопротивление:	0,0558894 Ом
		Падение напряжения:	0,0279447 В

Рисунок 13 – Расчет ширины дорожек линии 13 В и 27 В

Параметры:		Внешний слой трассировки:	
Ток:	0.1 А	Ширина трассировки:	0,00955068 мм
Превышение температуры:	5 °С	Толщина трассировки:	70 мкм
Длина проводника:	20 мм	Площадь поперечного сечения:	0,000668547 мм х мм
Удельное сопротивление:	1,72e-8 Ом/м	Сопротивление:	0,514548 Ом
		Падение напряжения:	0,0514548 В

Рисунок 14 – Расчет ширины дорожек линии 20 В

Также на плате располагается схема входной защиты и синфазный фильтр. Оба эти устройства располагаются на линии «220 В», по которой, в соответствии с ТЗ (ПРИЛОЖЕНИЕ А) и функциональной схемой (ПРИЛОЖЕНИЕ Б) протекает ток мощностью 1650 Вт и напряжением от 85 В до 265 В. Максимальный ток будет обеспечиваться при минимальном

напряжении питания — 85 В. Рассчитаем ток, протекающий в линии:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1650 \text{ Вт}}{85 \text{ В}} = 19.4 \text{ А.} \quad (22)$$

Получаем значительный ток в 20 А. Произведем расчет линии с превышением температуры 10 °С (рисунок 15)

Параметры:		Внешний слой трассировки:	
Ток:	20 А	Ширина трассировки:	9,35782 мм
Превышение температуры:	10 °С	Толщина трассировки:	70 мкм
Длина проводника:	20 мм	Площадь поперечного сечения:	0,655047 мм х мм
Удельное сопротивление:	1,72e-8 Ом/м	Сопротивление:	0,000525153 Ом
		Падение напряжения:	0,0105031 В

Рисунок 15 – Расчет ширины дорожек линии 220 В

2.2 Расчет зазоров линий ПП

Кроме толщины и ширины дорожек линий питания в проектировании печатной платы также важно учитывать зазоры между линиями. Если ширина трассировочной линии обусловлена протекающим по ней током, то зазоры в свою очередь обеспечивают невозможность пробоя в зависимости от приложенного напряжения.

Расчет зазоров будем производить в калькуляторе зазоров, включенном в пакет проектирования печатных плат KiCad [9]. Расчетчик, встроенный в KiCad включает в себя таблицу с шириной зазоров в зависимости от приложенного напряжения и характера изоляции проводника, а также позволяет рассчитать зазоры для конкретных напряжений выше 500 В по ГОСТ Р 55693-2013 (межд. IEC 2221A) [10]. Окно калькулятора зазоров представлено на рисунке 16.

PCB Calculator

Регуляторы | Ширина дорожки | Электрический зазор | Линия передачи | СВЧ аттенуатор | Цветовой код | Классы плат

mm

Напряжение > 500В:
500

Обновить значения

Примечание: минимальные значения (из IPC 2221)

	B1	B2	B3	B4	A5	A6	A7
0 ... 15В	0,05	0,1	0,1	0,05	0,13	0,13	0,13
16 ... 30В	0,05	0,1	0,1	0,05	0,13	0,25	0,13
31 ... 50В	0,1	0,6	0,6	0,13	0,13	0,4	0,13
51 ... 100В	0,1	0,6	1,5	0,13	0,13	0,5	0,13
101 ... 150В	0,2	0,6	3,2	0,4	0,4	0,8	0,4
151 ... 170В	0,2	1,25	3,2	0,4	0,4	0,8	0,4
171 ... 250В	0,2	1,25	6,4	0,4	0,4	0,8	0,4
251 ... 300В	0,2	1,25	12,5	0,4	0,4	0,8	0,8
301 ... 500В	0,25	2,5	12,5	0,8	0,8	1,5	0,8
> 500В	0,25	2,5	12,5	0,8	0,8	1,5	0,8

* B1 - Внутренние проводники
 * B2 - Внешний проводник, без изоляции, высота до 3050м над уровнем моря
 * B3 - Внешний проводник, без изоляции, высота выше 3050м над уровнем моря
 * B4 - Внешние проводники с постоянным полимерным покрытием (любая высота)
 * A5 - Внешние проводники с конформным покрытием поверх монтажа (любая высота)
 * A6 - Внешние компоненты пайка/выводы, без покрытия
 * A7 - Внешние компоненты пайка/выводы, с конформным покрытием (любая высота)

Рисунок 16 – Окно определения зазоров между линиями в KiCad

Выберем ширину зазора для основных используемых линий:

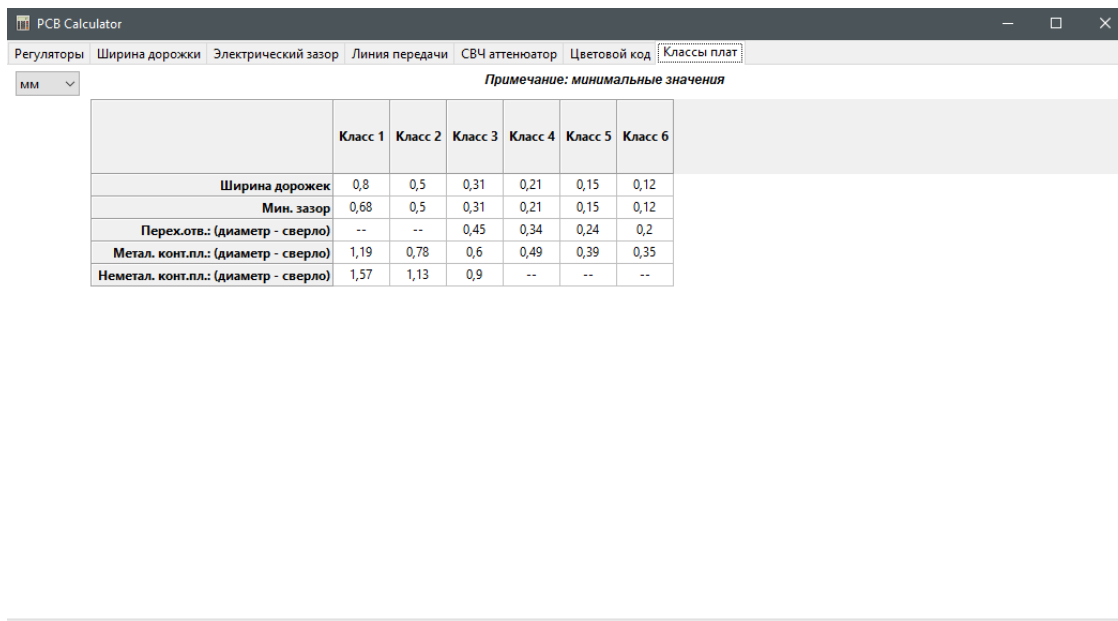
- 6 В 1 А — питание контроллеров (после стабилизации 5 В);
- 13 В 0,5 А — питание ключей ККМ (после стабилизации 12 В);
- 27 В 0,5 А — питание ключей полумостовых схем (после стабилизации 24 В);
- 20 В 0,1 А — для обратной связи обратноттоковой схемы;
- 400 В 4 А — силовая линия;
- 85-265 В макс. 20 А — линия сетевого питания ЛБП.

При производстве платы будет использоваться полимерное покрытие проводников, поэтому в таблице сверяемся с классом В4. В соответствии с таблицей, представленной на рисунке 16, определяем ширину зазоров:

- 6 В 1 А — 0,05 мм;
- 13 В 0,5 А — 0,05 мм;
- 27 В 0,5 А — 0,05 мм;
- 20 В 0,1 А — 0,05 мм;
- 400 В 4 А — 0,8 мм;
- 85-265 В макс. 20 А — 0,4 мм.

2.3 Определение класса печатной платы

Для выбора производства печатной платы необходимо определить класс ПП. Опираясь на рассчитанный класс будет произведена разводка всей ПП. Для оценки данного параметра воспользуемся таблицей, представленной в наборе расчетных средств KiCad [9] (рисунок 17).



	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5	Класс 6
Ширина дорожек	0,8	0,5	0,31	0,21	0,15	0,12
Мин. зазор	0,68	0,5	0,31	0,21	0,15	0,12
Перех.отв.: (диаметр - сверло)	--	--	0,45	0,34	0,24	0,2
Метал. конт.пл.: (диаметр - сверло)	1,19	0,78	0,6	0,49	0,39	0,35
Неметал. конт.пл.: (диаметр - сверло)	1,57	1,13	0,9	--	--	--

Рисунок 17 – Окно определения класса ПП в KiCad

В предыдущих пунктах были получены следующие значения: минимальная ширина трассируемой дорожки — 0,0095 мм, минимальный зазор между линиями — 0,05 мм. Так как эти величины несут характер минимально-рекомендованных, для упрощения производства и разводки ПП увеличим минимальную ширину дорожки до 0,25 мм, а минимальный зазор до 0,15 мм. По полученным значениям определяем — 5 класс ПП:

- минимальная ширина дорожек — 0,15 мм;
- минимальный зазор между линиями — 0,15 мм;
- диаметр сверла переходного отверстия — 0,24 мм;
- диаметр сверла металлической контактной площадки — 0,39 мм.

3 Проектирование корпуса блока питания

3.1 Проектирование модели корпуса

Так как в общем проекте лабораторного оборудования предполагается сборка устройств в стандартную стойку 19 дюймов, то и корпус проектируется 19 дюймовый по ГОСТ Р МЭК 60297-3-101-2006 [11].

Для уменьшения масса-габаритных параметров корпуса и возможности укладки всех необходимых печатных плат был выбран корпус глубиной 263,5 мм.

Для повышения технологичности производства корпуса лабораторного блока питания был выбран метод изготовления штамповкой с последующей гибкой из листового металла толщиной 0,6 мм.

Модель корпуса представлена на рисунке 18.

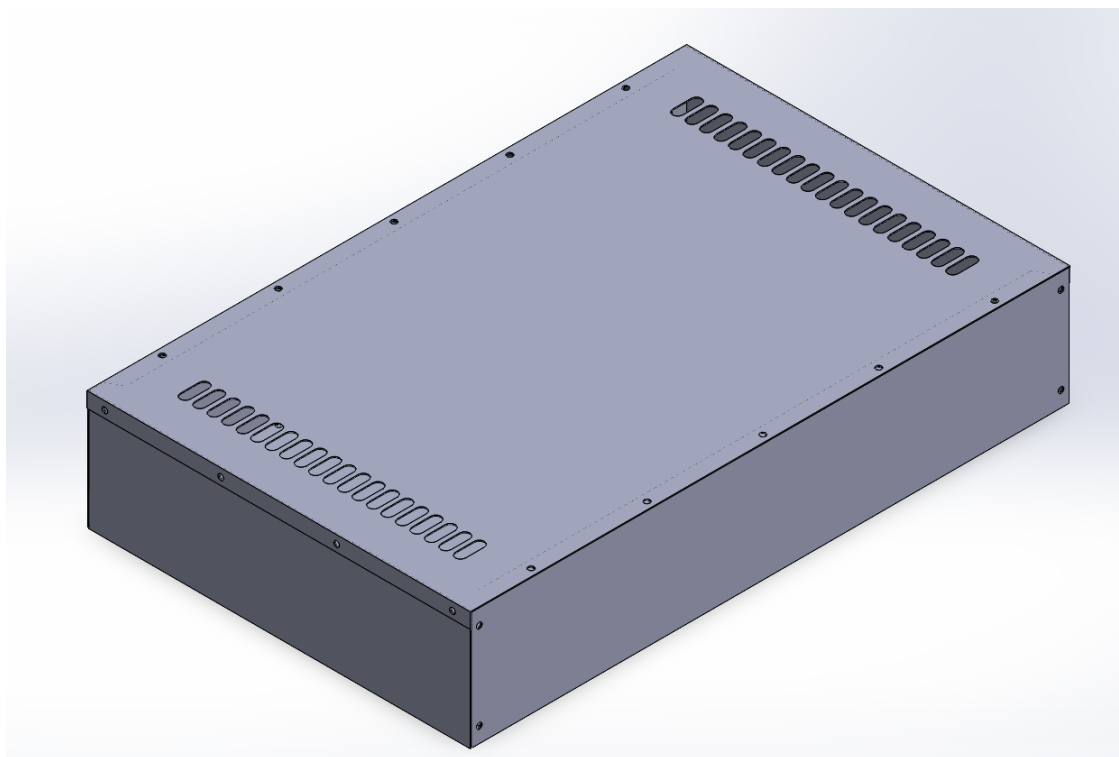


Рисунок 18 – Общий вид корпуса 19'

Для повышения технологичности производства, корпус спроектирован из четырех деталей (ПРИЛОЖЕНИЕ Г), соединенных винтовыми соединениями. Для лучшей вентиляции корпуса на верхней части расположены технические вентиляционные отверстия.

3.2 Упрощенное представление печатных плат

Для проектирования расположения печатных плат внутри корпуса, а также для проведения теплового анализа необходимо представить ПП упрощенными моделями. Это позволит сэкономить время разработки, уменьшить нагрузку на вычислительное устройство и даст незначительно отличающиеся от реальности показатели.

Плата КKM включает схему самого КKM и схему ДП. Основными нагревающимися компонентами на этих схемах являются трансформатор обратноходовой схемы дежурного питания и транзисторы корректора коэффициента мощности и ДП. Также в упрощенной модели должны присутствовать элементы электролитических конденсаторов, препятствующие свободному обдуву нагреваемых элементов.

Упрощенная модель печатной платы корректора коэффициента мощности и дежурного питания представлена на рисунке 19.

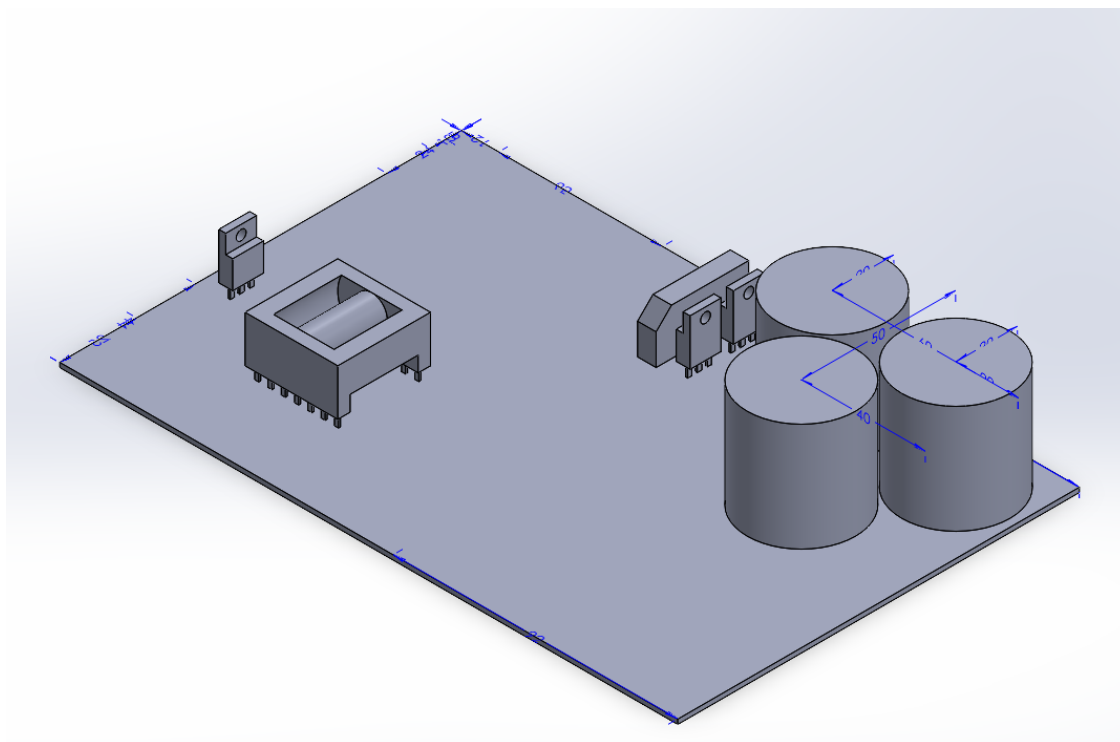


Рисунок 19 – Общий вид имитации печатной платы КKM и ДП

На печатных платах выходных каналов тоже основными источниками тепла являются транзисторы полумостовой схемы и преобразовательный трансформатор. Также, как и в случае с платой КKM упростим

отображение данной ПП, оставив только транзисторы, конденсаторы и трансформатор (рисунок 20).

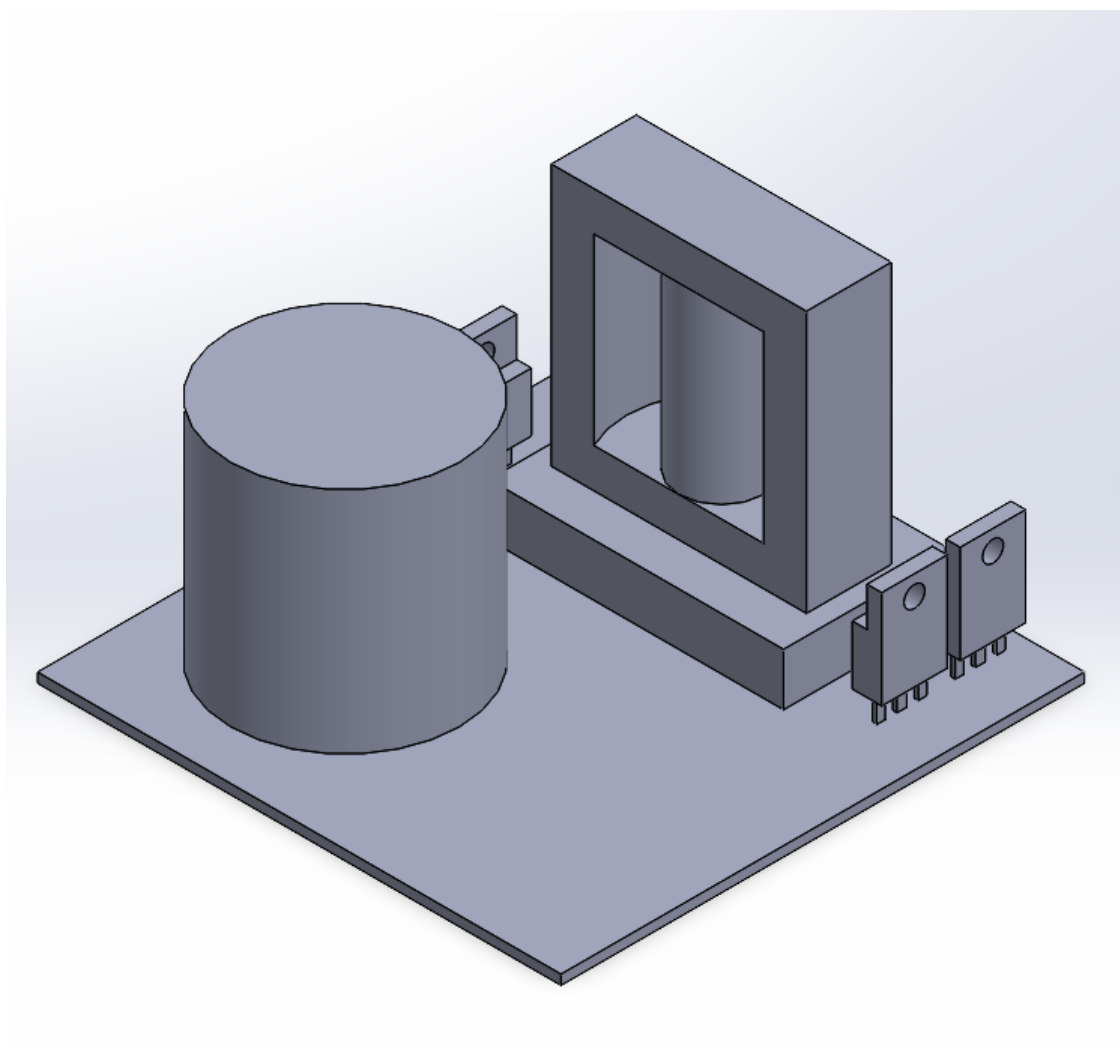


Рисунок 20 – Общий вид имитации печатной платы ПМ

3.3 Тепловой расчет корпуса

Для проведения теплового анализа разместим все имитации печатных плат в корпусе лабораторного блока питания (рисунок 21) и добавим поле анализа Flow Simulation.

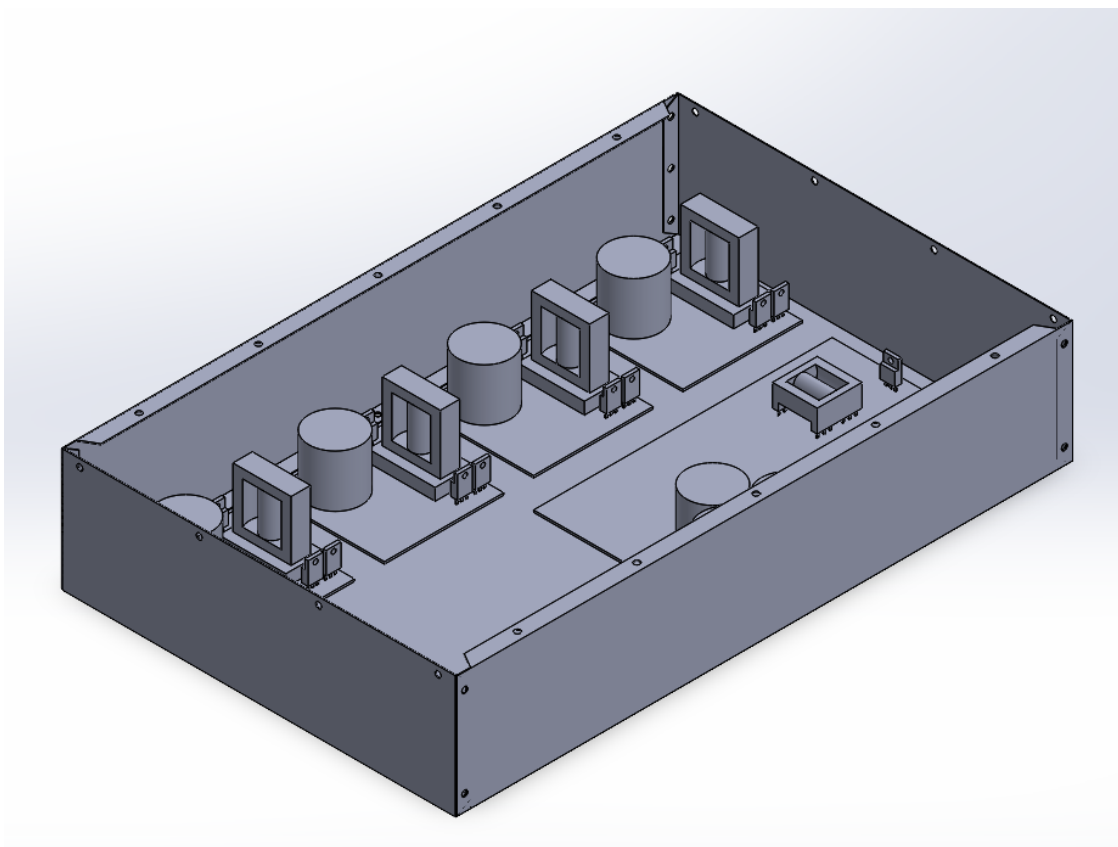


Рисунок 21 – Общий вид на корпус с печатными платами

Далее зададим материалы всем элементам (рисунок 22):

- упрощенные транзисторы — алюминий;
- упрощенные конденсаторы — алюминий;
- упрощенные трансформаторы — феррит N87;
- материал плат — FR-4;
- материал корпуса — сталь.

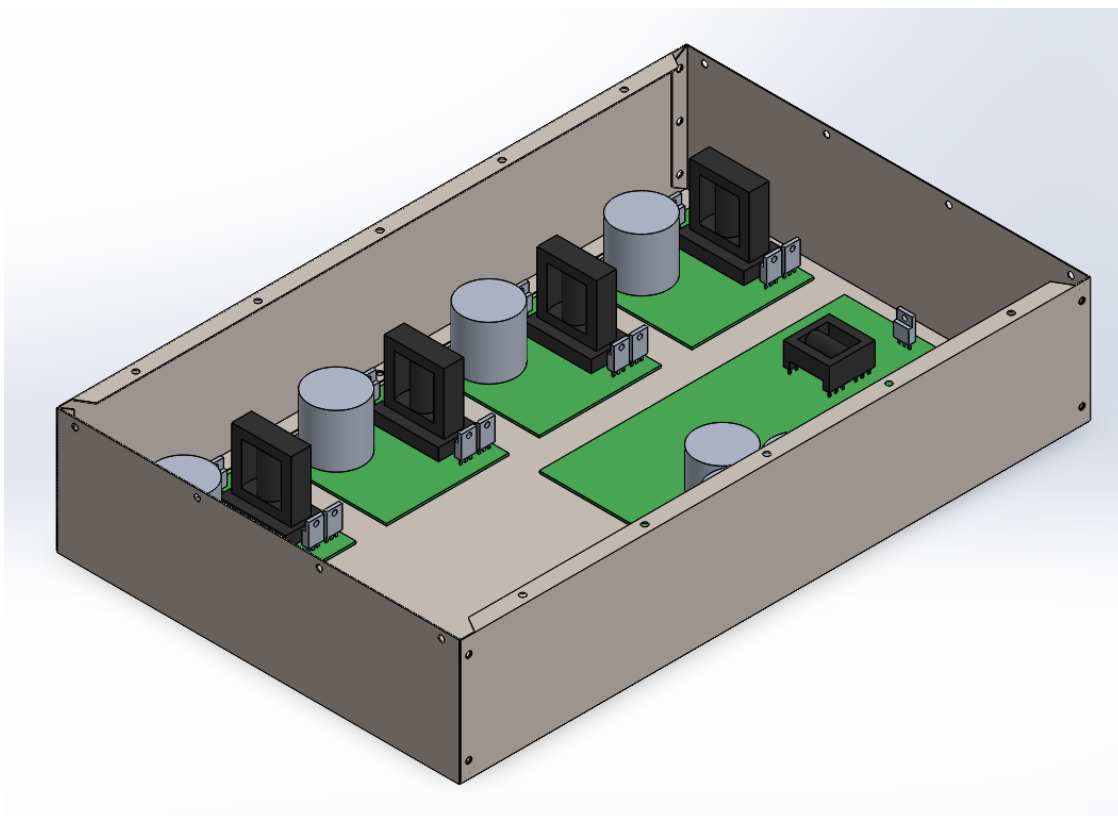


Рисунок 22 – Общий вид на корпус с заданными материалами

Зададим температуры нагрева силовых элементов и запустим тепловой анализ. По завершении расчетов включаем отображение нагрева по поверхностям. По полученному изображению можно оценить нагрев компонентов (рисунок 23).

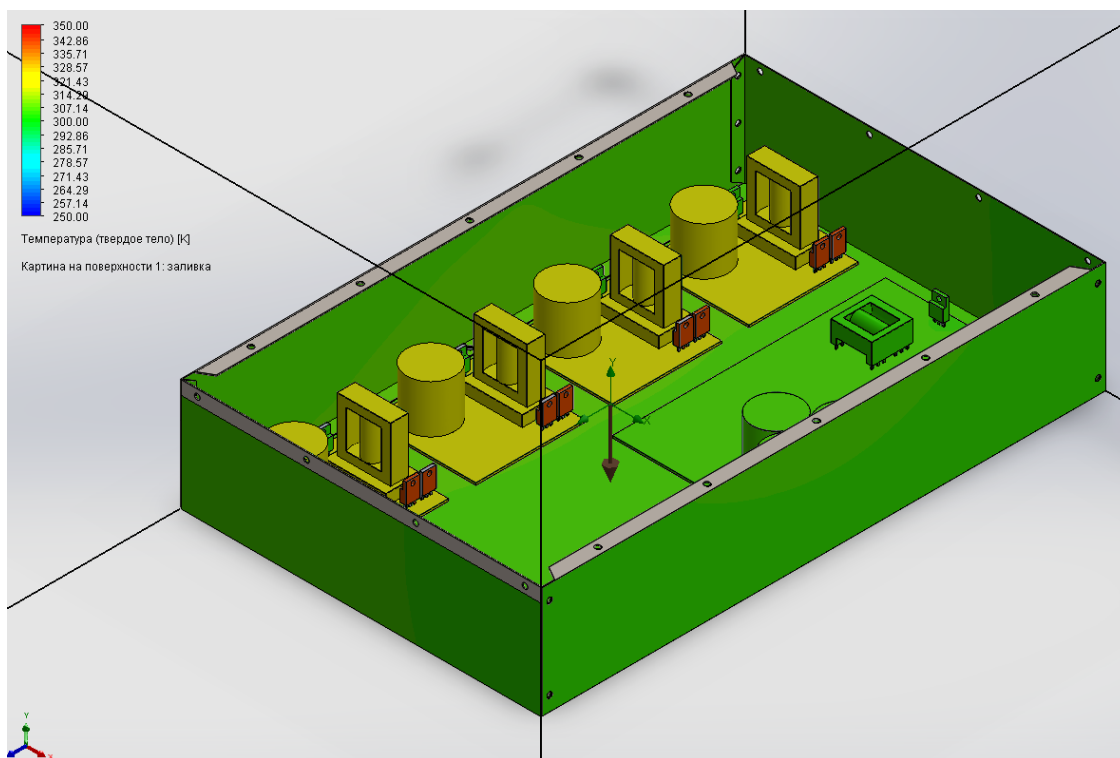


Рисунок 23 – Нагрев компонентов ЛБП

Также можно включить отображение воздушных потоков корпуса (рисунок 24). Видно, что по корпусу воздух проходит с большим количеством турбулентностей. Включим видимость верхней крышки (рисунок 25) и обнаружим, что потоки пытаются пройти через все щели корпуса.

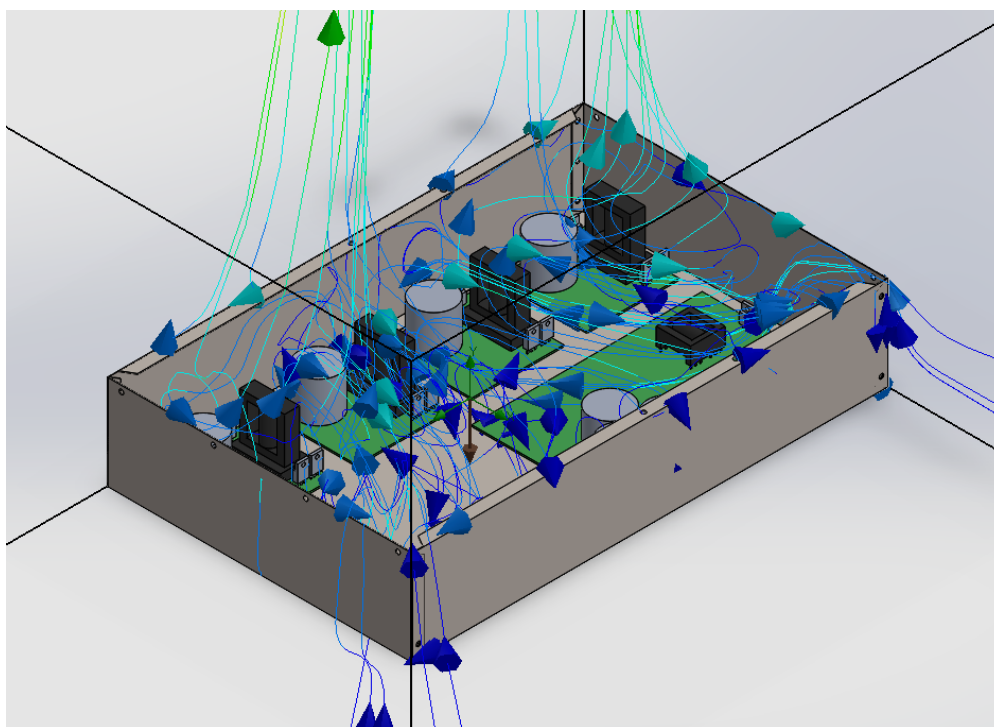


Рисунок 24 – Турбулентные потоки воздуха в корпусе ЛБП

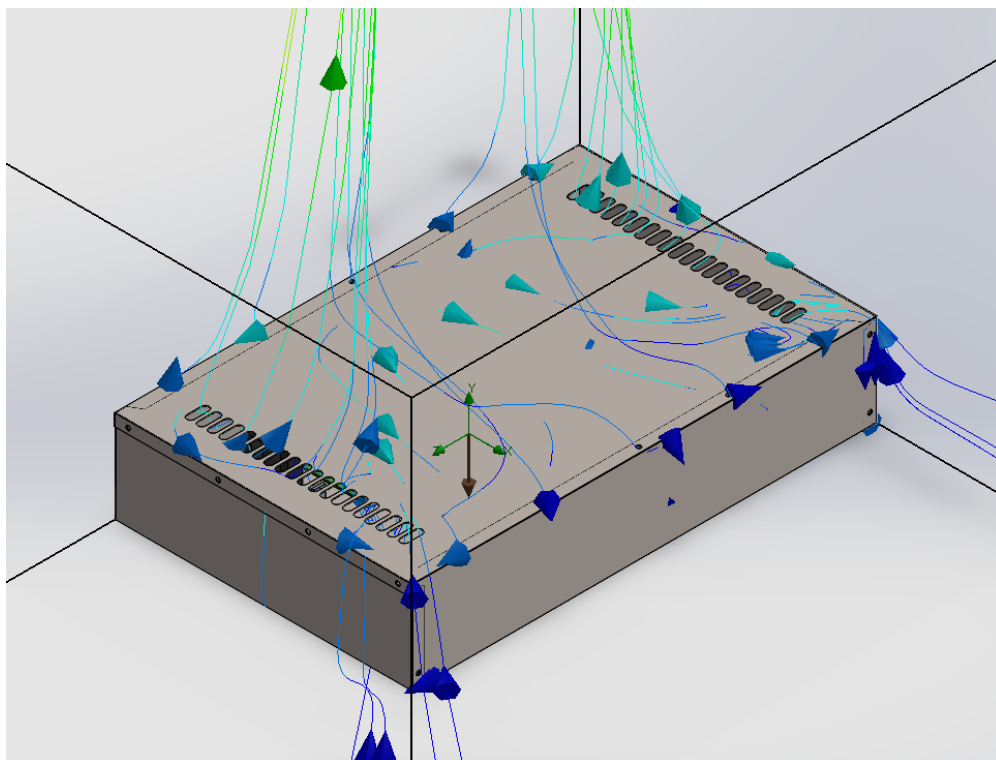


Рисунок 25 – Турбулентные потоки воздуха в корпусе ЛБП с закрытой крышкой

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы были получены параметры намотки силовых трансформаторов, обеспечивающих работу выходных каналов, и трансформатора дежурного питания, включенного в обратногоходовой схеме для обеспечения дополнительным питанием ключей ККМ и ПМ, а также блоков измерений и управления.

Дополнительно был проведен анализ и расчет необходимых параметров разводки печатной платы ККМ и ДП в соответствии с протекающими токами и приложенным напряжением.

Для обеспечения совмещения блока питания с другими устройствами был спроектирован корпус 19' по ГОСТ МЭК 60297-3-101-2007 и проведен тепловой анализ размещенных в нем плат.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Костиков В.Г., Парфенов Е.М., Шахнов В.А. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование: учебник. Москва : Горячая линия - Телеком, 2001. 344 с.
2. Ferrite Magnetic Design Tool [Электронный ресурс] // TDK. URL: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/180490/design-support/design-tools/ferrite-magnetic-design-tool> (дата обращения: 20.11.2021)
3. AllInOne [Электронный ресурс] // Schem.net : форум по электронике. URL: <https://forum.schem.net/index.php?/topic/70885-программы-расчета-трансформаторов-и-дросселей> (дата обращения: 05.12.2021)
4. UC3842Z [Электронный ресурс] // ST : High performance current mode PWM controller. URL: www.st.com/resource/en/datasheet/uc3842b.pdf (дата обращения: 07.12.2021)
5. TL431 [Электронный ресурс] // ST : Automotive adjustable voltage reference. URL: www.st.com/resource/en/datasheet/tl431.pdf (дата обращения: 07.12.2021)
6. STD3NK80Z [Электронный ресурс] // ST : N-channel 800 V, 3.8 Ω typ., 2.5 A SuperMESH™ Power MOSFETs in IPAK, DPAK, TO-220FP, TO-220 packages. URL: www.st.com/resource/en/datasheet/std3nk80z-1.pdf (дата обращения: 07.12.2021)
7. Майек Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению / пер. с англ. С.В. Пряничниковой. Москва : Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. 272 с.
8. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. Москва : Техносфера, 2005. 632 с.
9. KiCad 5.1.12 [Электронный ресурс] // KiCad EDA : A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite. URL: www.kicad.org (дата обращения: 15.12.2021)
10. ГОСТ Р 55693-2013. Платы печатные жёсткие. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2014.
11. ГОСТ МЭК 60297-3-101-2007. Конструкции несущие базовые радиоэлектронных средств. Блочные каркасы и связанные с ними

вставные блоки. Размеры конструкций серии 482,6 мм (19 дюймов). М.:
Стандартинформ, 2007.

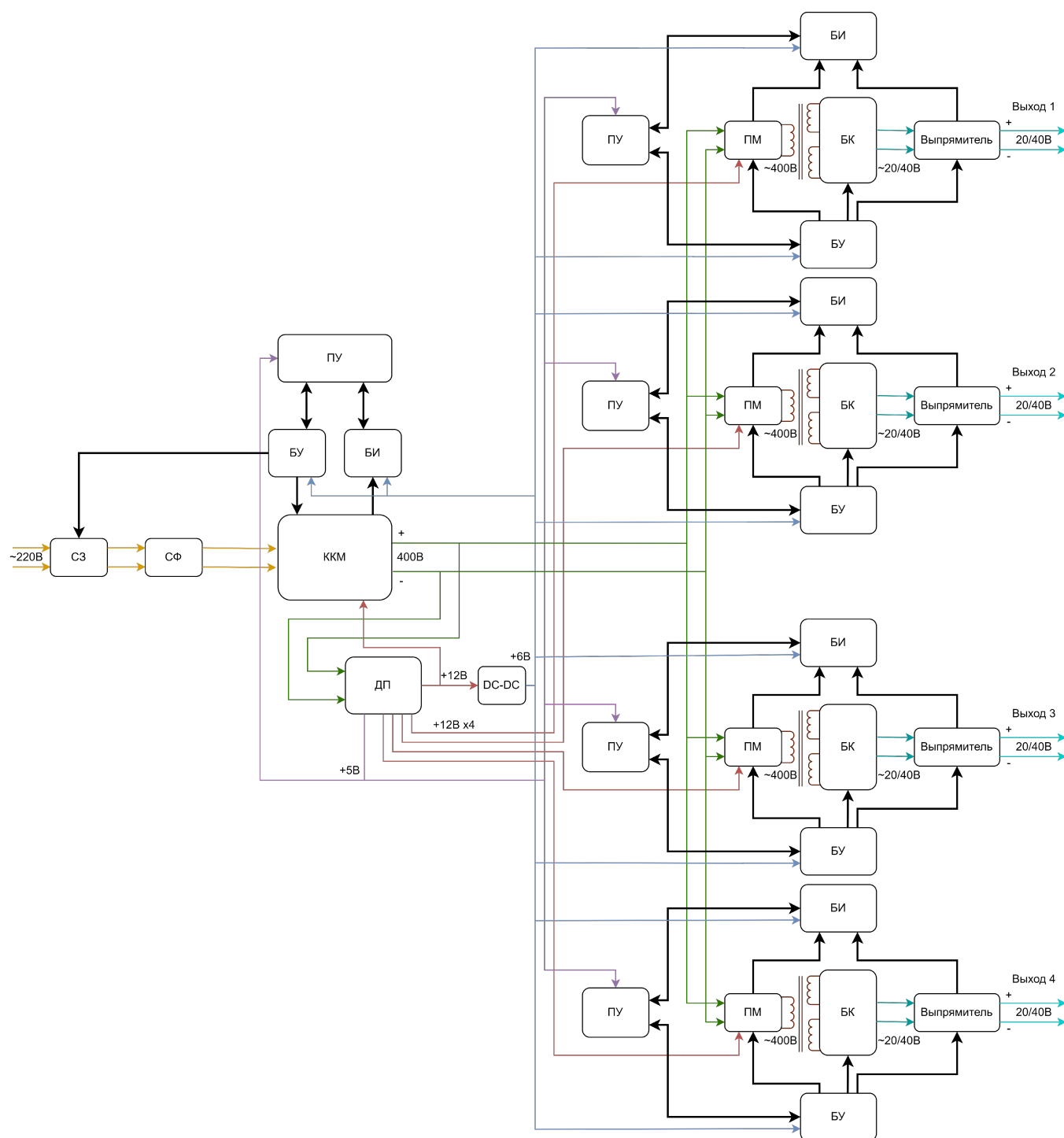
ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)
Техническое задание

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Структурная схема лабораторного блока питания

MTY.436717.001



МГТУ.436717.001 Э1

*Блок питания
Схема электрическая
структурная*

Лит.

Macca

Масштаб

Лист 1

Листов 1

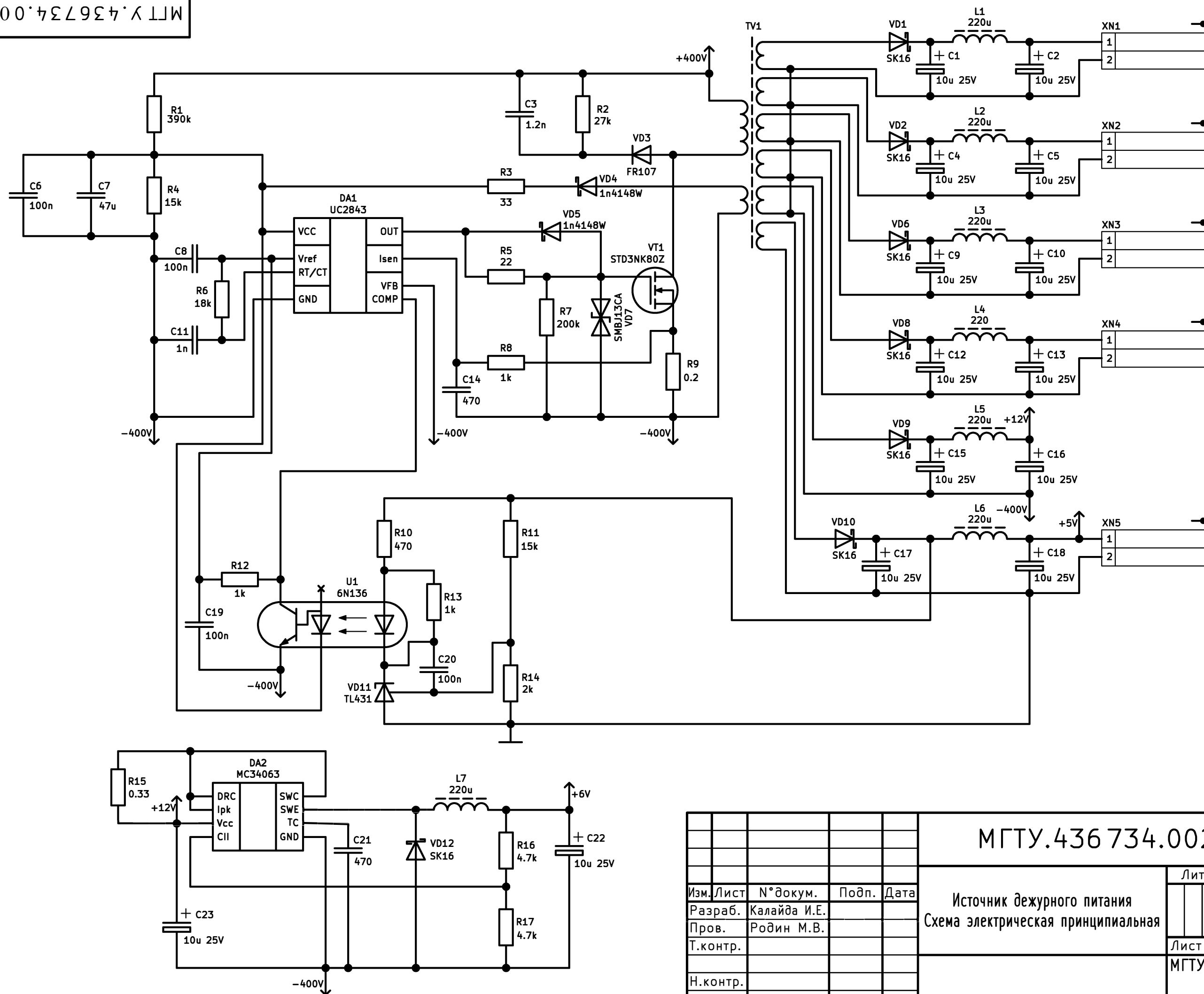
МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра РЛ1
группа РЛ1-74

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Принципиальная схема блока дежурного питания

MTTY.436734.00293



					МГТУ.436 734.002 Э3				
					Источник дежурного питания Схема электрическая принципиальная	Лит.	Масса	Масштаб	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
Разраб.	Калайда И.Е.								
Пров.	Родин М.В.								
Т.контр.									
						Лист 1	Листов 1		
Н.контр.					МГТУ им. Н.Э. Баумана Кафедра РЛ1 группа РЛ1-74				
Утв.									

Копировал

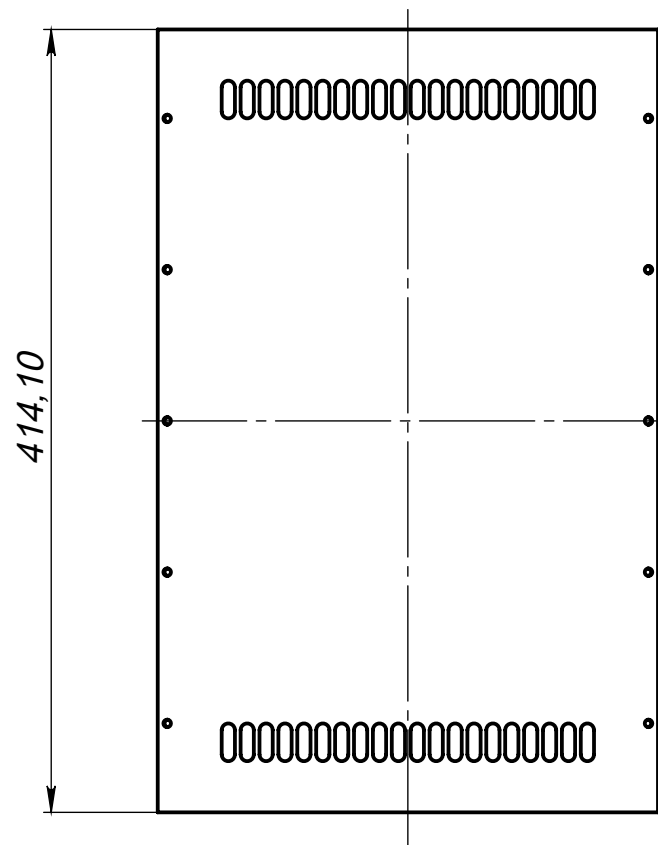
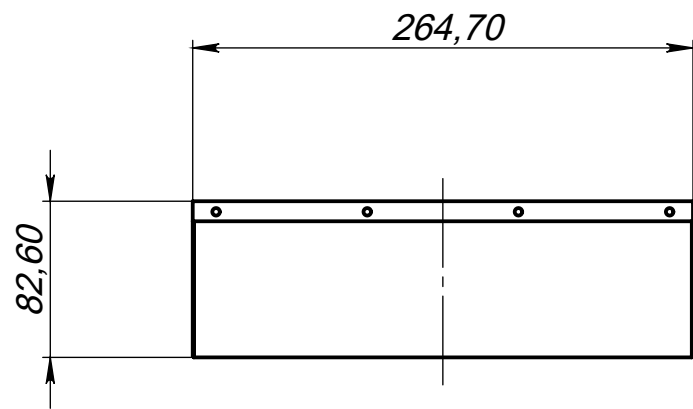
Формат А3

Поз. обозначение		Наименование			Кол.	Примечание		
		<u>Конденсаторы</u>						
C1, C2		JCK1E010M05			2	10μ 25V		
C3		GRM188R71E122KA01D			1	1,2нФ		
C4, C5		JCK1E010M05			2	10μ 25V		
C6		GRM188R71E104KA01D			1	100нФ		
C7		GRM188R71E476KA01D			1	47мкФ		
C8		GRM188R71E104KA01D			1	100нФ		
C9, C10		JCK1E010M05			2	10μ 25V		
C11		GRM188R71E102KA01D			1	1нФ		
C12, C13		JCK1E010M05			2	10μ 25V		
C14		GRM188R71E471KA01D			1	470нФ		
C15–C18		JCK1E010M05			4	10μ 25V		
C19, C20		GRM188R71E104KA01D			2	100нФ		
C21		GRM188R71E471KA01D			1	470нФ		
C22, C23		JCK1E010M05			2	10μ 25V		
		<u>Микросхемы</u>						
DA1		UC2843			1	SOIC–8		
DA2		MC34063			1	SOIC–8		
VD11		TL431			1	TO–92		
		<u>Индуктивности</u>						
L1–L7		LNF1212J224			7	220мкГн		
		<u>Резисторы</u>						
R1		RC0603J394			1	390кОм		
R2		RC0603J273			1	27кОм		
R3		RC0603J330			1	330м		

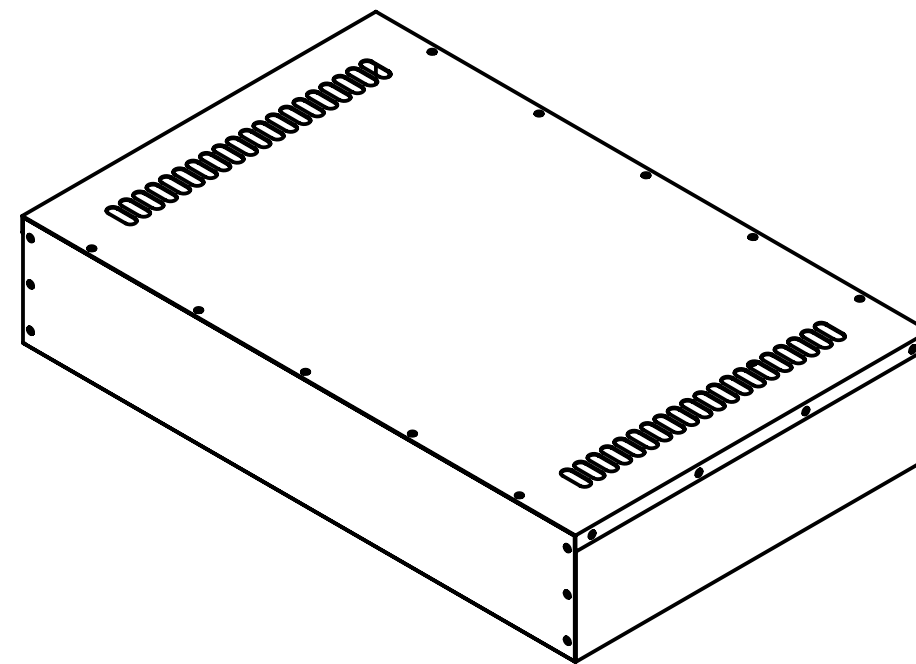
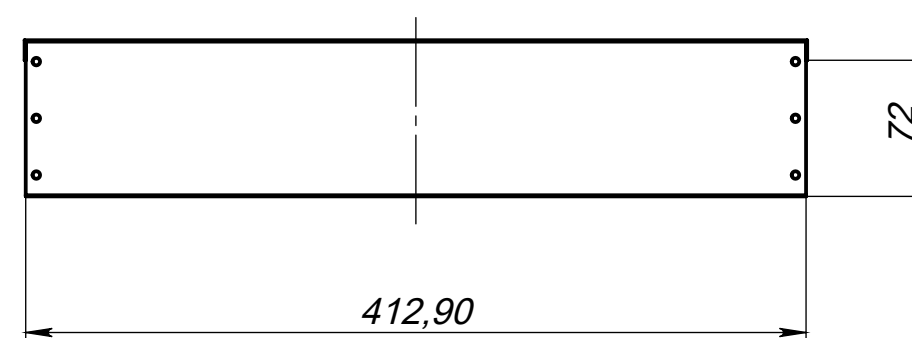
ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(справочное)
Чертежи корпуса 19'

Перв. примен.		Справ. №		Подп. и дата		Инв. № дубл.		Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.	

МГТУ.565242.003



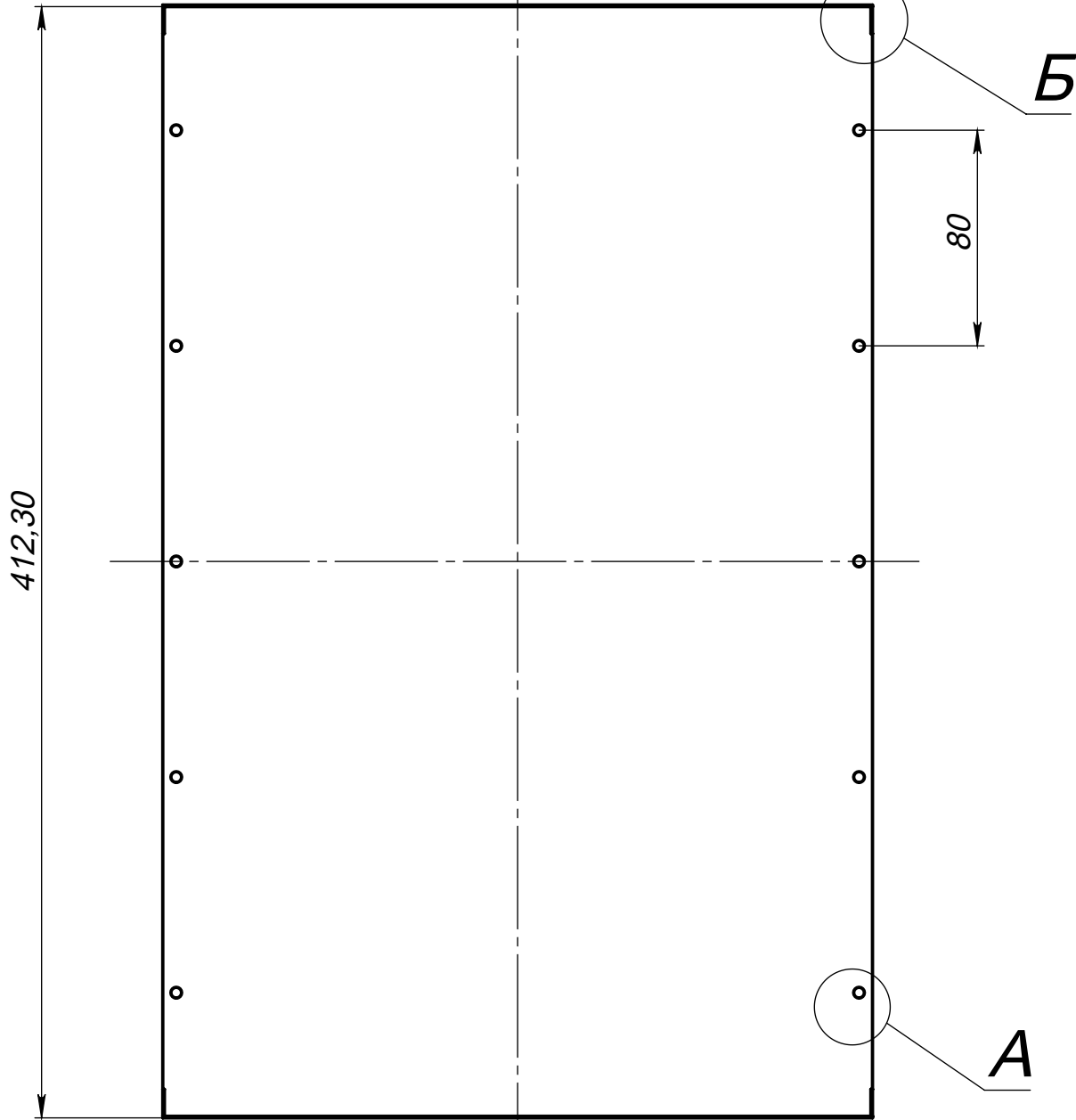
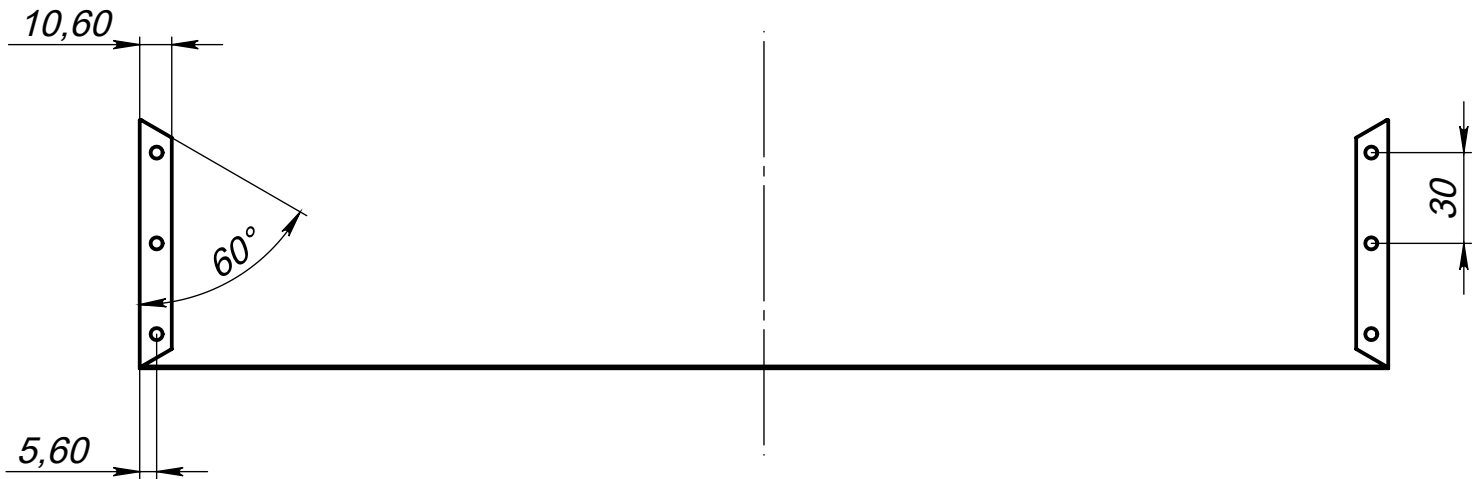
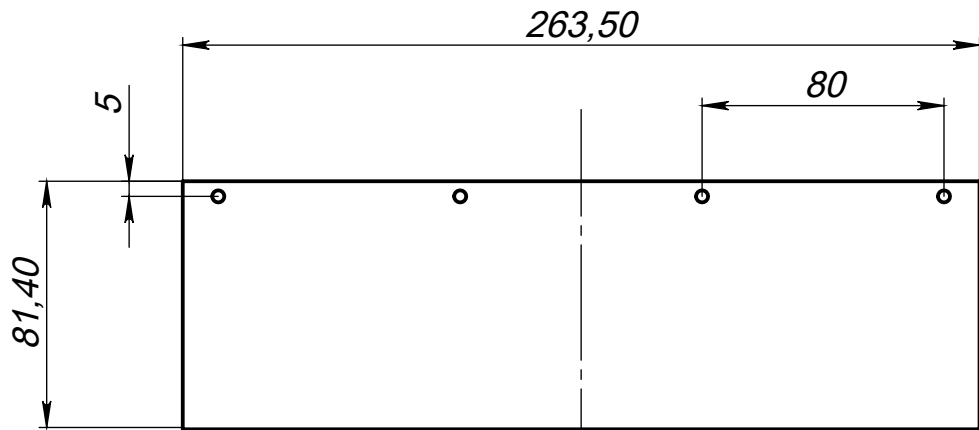
Условия эксплуатации:
Рабочие температуры - от 0°C до +55°C;
Влажность - до 80% при 25°C;
Давление - от 90 до 110 кПа;
Вибрации - от 5 до 2000 Гц;
Акустические шумы - от 100 до 10000 Гц при
звуковом давлении до 130 дБ.



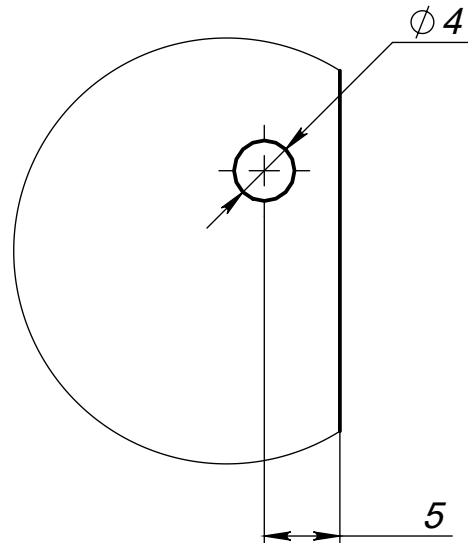
					МГТУ.565242.003 ГЧ					
					Корпус блока питания	Лит.			Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						1:4
Разраб.		Калайда И. Е.								
Пров.		Родин М. В.								
Т. контр.										
						Лист 1			Листов 1	
Н. контр.						МГТУ им. Н. Э. Баумана кафедра РЛ1 группа РЛ1-74				
Утв.										

Перв. примен.		Справ. №		Подп. и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подп. и дата		Инв. № подл.	

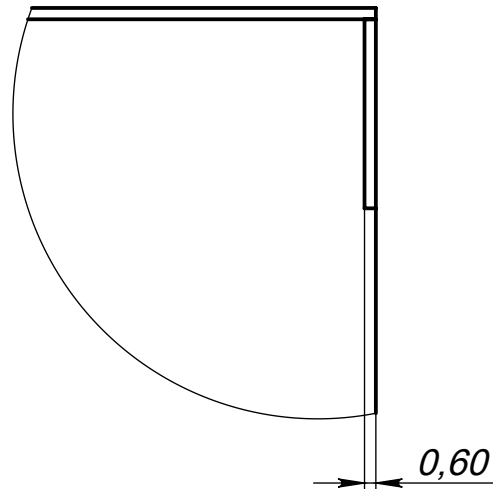
МГТУ.732188.004



А (2 : 1)



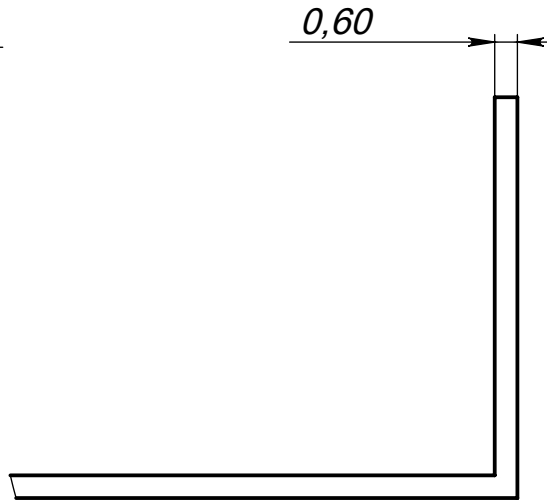
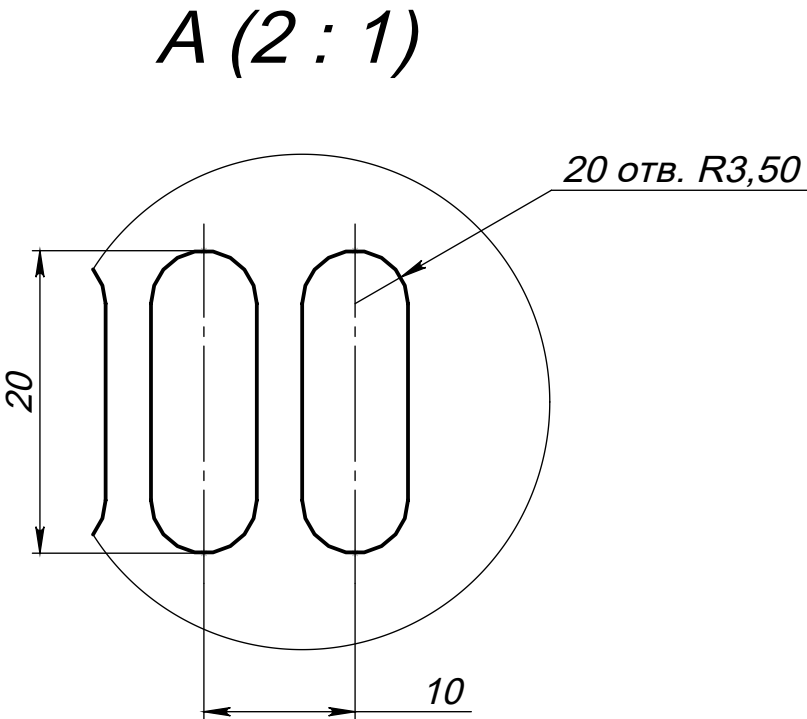
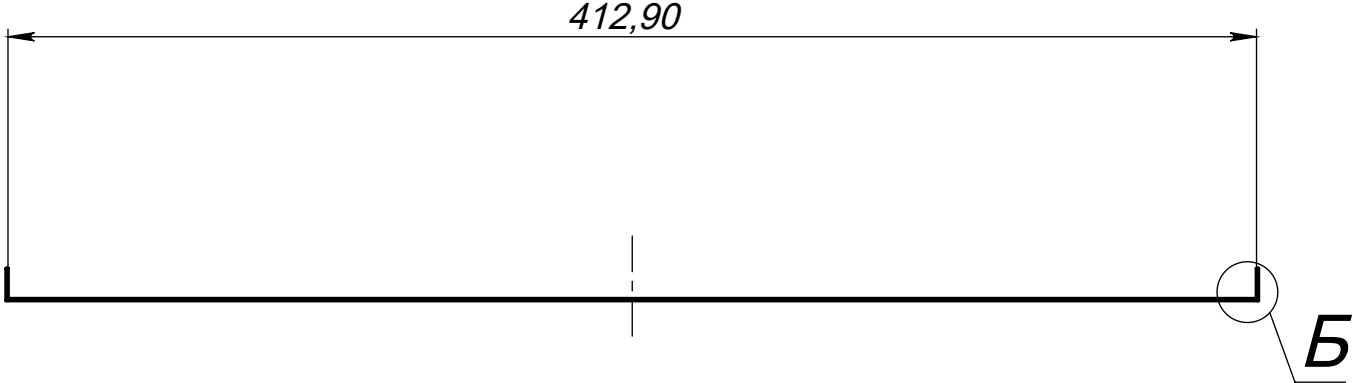
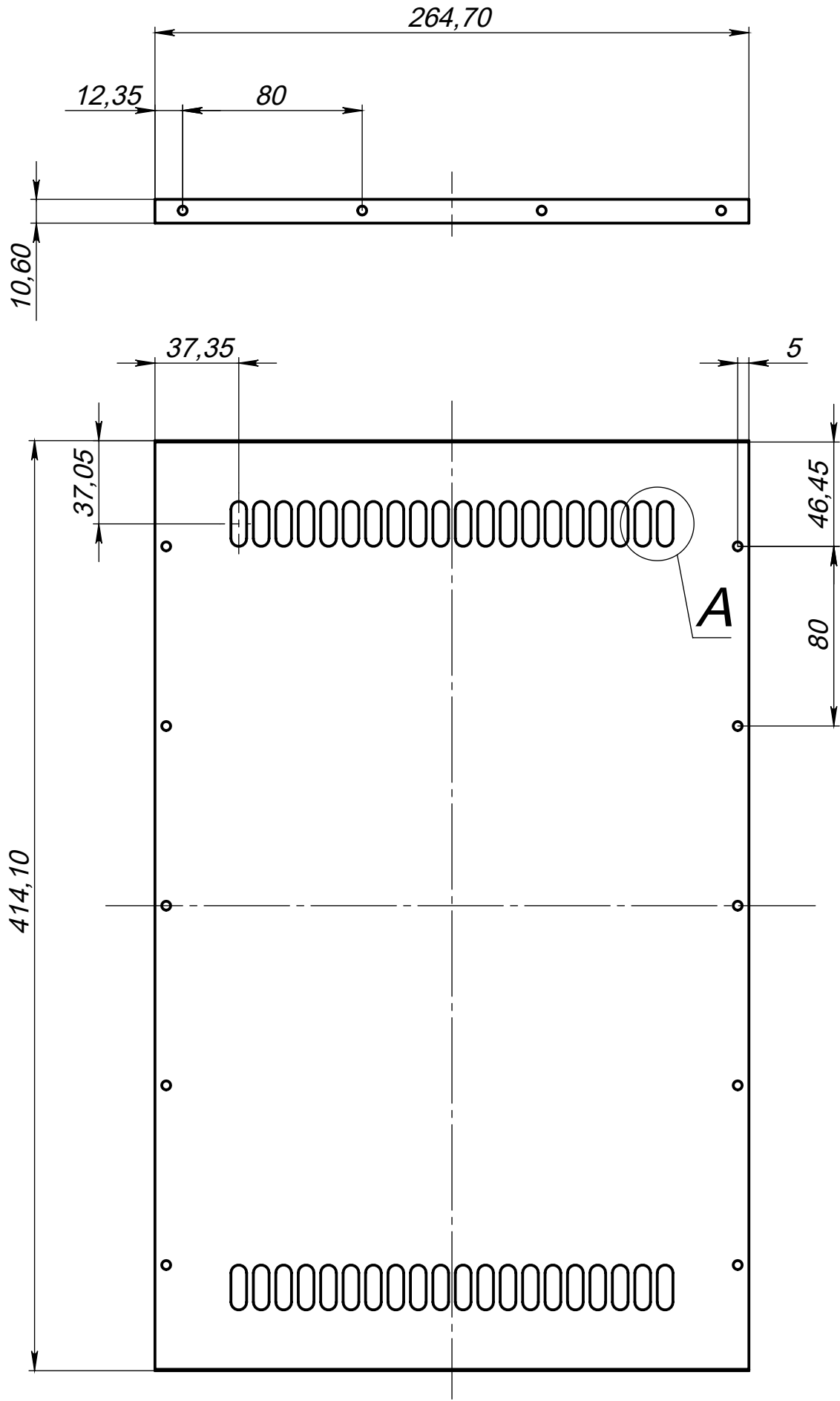
Б (2.5 : 1)



					МГТУ.732188.004						
					Дно корпуса блока питания	Лит.			Масса	Масштаб	
									740.98	1:2.5	
						Лист 1			Листов 1		
						Нержавеющая сталь			МГТУ им. Н.Э.Баумана кафедра РЛ1 группа РЛ1-74		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата							
Разраб.		Калайда И.Е.									
Пров.		Родин М.В.									
Т. контр.											
Н. контр.											
Утв.											

Перв. примен.		Справ. №		Подп. и дата		Инв. № дубл.		Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.	

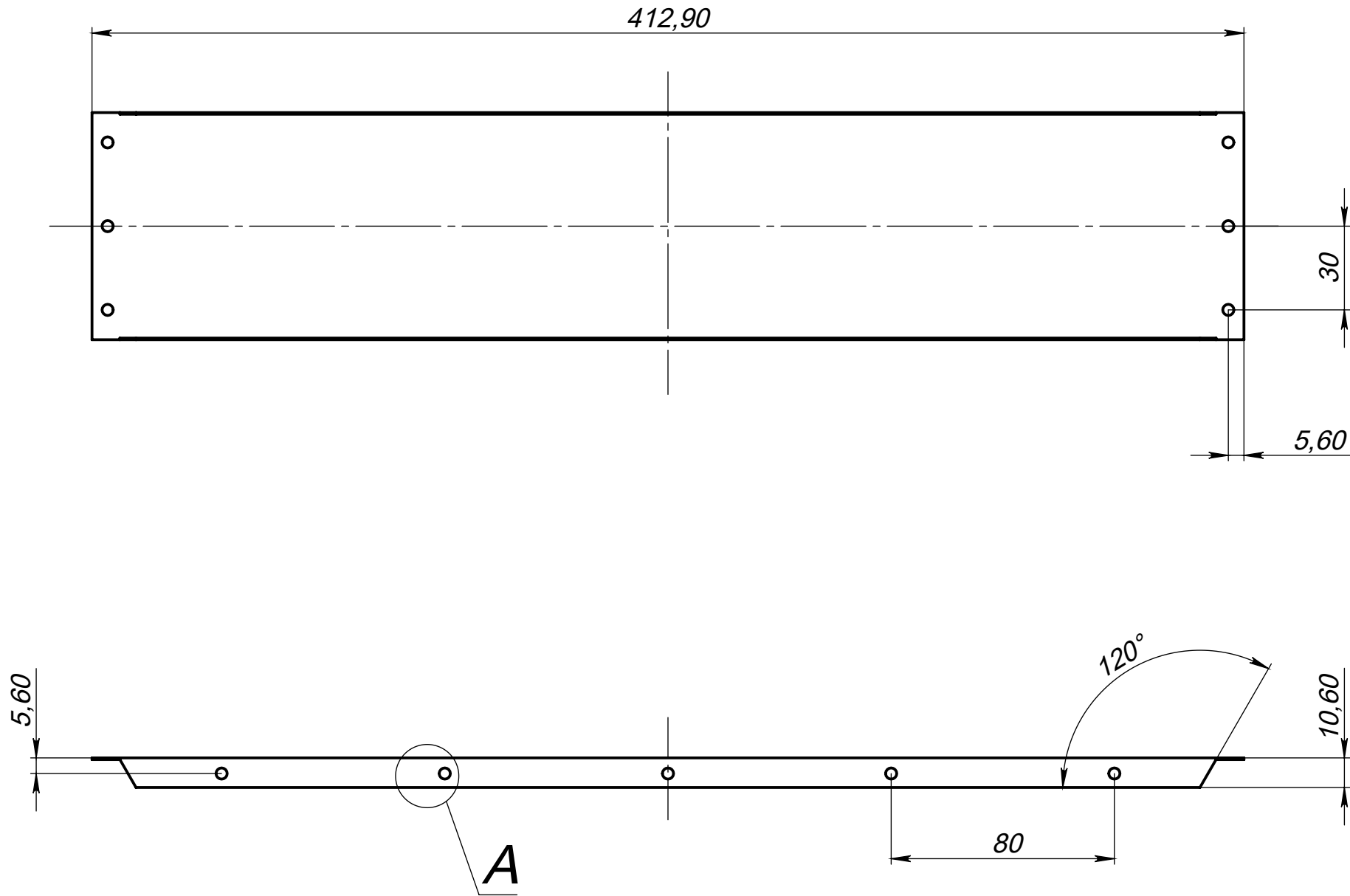
МГТУ.732188.005



						МГТУ.732188.005					
						Крышка корпуса блока питания	Лит.		Масса	Масштаб	
									525.60	1:2.5	
							Лист 1		Листов 1		
							МГТУ им. Н. Э. Баумана кафедра РЛ1 группа РЛ1-74				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Нержавеющая сталь					
Разраб.		Калайда И. Е.									
Пров.		Родин М. В.									
Т. контр.											
Н. контр.											
Утв.											

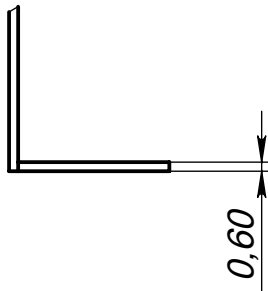
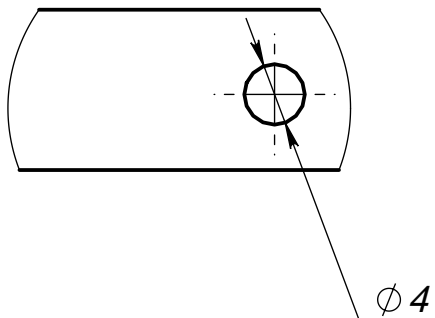
Перв. примен.		Справ. №		Подп. и дата		Инв. № дубл.		Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.	

МГТУ.732188.006



А (2 : 1)

Б (2 : 1)



					МГТУ.732188.006				
					Торцевая панель корпуса блока питания	Лит.		Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				197.53	1:2
Разраб.	Калайда И.Е.								
Пров.	Родин М.В.								
Т. контр.									
						Лист 1		Листов 1	
Н. контр.					Нержавеющая сталь	МГТУ им. Н.Э. Баумана кафедра РЛ1 группа РЛ1-74			
Утв.									