

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)  
Институт «Политехнический»  
Факультет «Заочный»  
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

Гл. энергетик ООО «Колос»

\_\_\_\_\_ В.Ф. Зимин  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующая кафедрой ЭССиСЭ

\_\_\_\_\_ И.М. Кирпичникова  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

Поиск интервала времени  $T_{им}$  с точки зрения целесообразности выбора сечений  
проводников в сетях до 1000В по экономической плотности тока

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ – 13.04.02. 2020.635.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР

доцент кафедры ЭССиСЭ, к.т.н.

\_\_\_\_\_ Г.С. Валеев  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор ВКР

студент группы ПЗ-385

\_\_\_\_\_ А.А. Ахметов  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

Нормоконтролер

старший преподаватель

\_\_\_\_\_ Н.Ю. Аверина  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(Национальный исследовательский университет)  
«Политехнический институт»  
Факультет «Заочный»  
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»  
Направление 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»  
Магистерская программа  
«Оптимизация развивающихся систем электроснабжения»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой «ЭССиСЭ»  
д.т.н., проф.

\_\_\_\_\_ И.М. Кирпичникова  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

### ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу магистра  
Ахметова Азамата Амангельдыевича  
Группа ПЗ-385

1 Тема работы: «Поиск интервала времени  $T_{им}$  с точки зрения целесообразности выбора сечений проводников в сетях до 1000В по экономической плотности тока»

Утверждена приказом ректора ЮУрГУ 25.12.2019 № 2882

Срок сдачи студентом законченной работы – 11.01.2020

2 Исходные данные к работе

2.1 Укрупнённые стоимостные показатели строительства кабельных линий

2.2 Изменение стоимости электроэнергии за 10 лет с 2015 по 2030 гг.

3 Перечень вопросов, подлежащих разработке вопросов:

1 Введение

2 Общая характеристика экономико-математических моделей по определению экономической плотности тока и обоснование актуальности работы

3 Разработка математической модели для определения экономической плотности тока в радиальной линии электропередачи

4 Расчеты экономической плотности тока для радиальных кабельных и воздушных линий

5 Определения интервала времени  $T_{им}$  с точки зрения целесообразности выбора сечений проводников в сетях до 1000 в по экономической плотности тока

6 Заключение

Дата выдачи задания: «24» сентября 2017 г.

Научный руководитель \_\_\_\_\_ / Г.С. Валеев /

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ / А.А. Ахметов /

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

№ п/п	Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметки руководителя о выполнении
1	Введение	10.10.2017	
2	Обоснование актуальности выбранной темы, определение целей и задач научных исследований, определение объекта и предмета исследований	19.10.2017	
3	Разработка 1-го раздела ВКР	18.03.2018	
4	Разработка 2-го раздела ВКР	05.07.2018	
5	Написание 3-го раздела ВКР	11.09.2019	
6	Написание 4-го раздела ВКР	15.11.2019	
7	Написание заключения	12.11.2019	
8	Библиографический список	10.12.2019	
9	Оформление пояснительной записки	16.12.2019	
10	Завершающий этап оформления работы, прохождение нормоконтроля	26.12.2019	
11	Сдача готовой работы на кафедру, представление работы на рецензию	11.01.2020	

Заведующая кафедрой ЭССиСЭ \_\_\_\_\_ / И.М. Кирпичникова/

Научный руководитель работы \_\_\_\_\_ /Г.С. Валеев /

Магистрант \_\_\_\_\_ / А.А. Ахметов/

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Правила устройства электроустановок: утв. Приказом Минэнерго России от 20 июня 2003 г. № 242 / М-во энергетики Российской Федерации. – 7-е изд. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2003. **Стр. 6**
- 2 Энергетическая стратегия России на период до 2035 года.– [http://www.energystrategy.ru/ab\\_ins/source/ES-2035\\_09\\_2015.pdf](http://www.energystrategy.ru/ab_ins/source/ES-2035_09_2015.pdf) **Стр. 7**
- 3 Макурова, Ю.А. Многокритериальная методика выбора кабелей для систем электроснабжения нефтяной и газовой промышленности: дис...канд.техн.наук: / Ю.А. Макурова.–Москва: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,2015.–167 с. **Стр 8**
- 4 Суворова, И.А. Выбор сечений проводников и рациональных напряжений распределительных электрических сетей в современных условиях.: дис....канд. тех. наук. / И.А. Суворова. – М., 2015. – 168 с. **Стр. 9**
- 5 Хужина, З. Б. Определение величин экономических плотностей тока в условиях современного рынка на электротехническое оборудование/ З. Б. Хужина, А.В. Варганова// Электротехнические системы и комплексы. 2017 №3(36).–[http://www.doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-23-28/](http://www.doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-23-28/).– С.23-28. **Стр.10**
- 6 Вестник ценообразования и сметного нормирования. Выпуск 10 Октябрь 2015 г. Москва. «Стройформиздат».2015г.- 72 с. **Стр. 14**
- 7 Минэконом развития 9 апреля 2018 г. «Прогноз долгосрочного экономико-социального развития РФ до 2030 года»,2015г. – 222с. **Стр 15**
- 8 Сборник укрупненных показателей стоимости строительства (реконструкции) подстанций и линий электропередачи для нужд ОАО «Холдинг МРСК» Москва, 2012 - 71 стр. **стр. 21**
- 9 Номенклатурный каталог: каталог продукции. – Пермь: ООО Камкабель, 2017. – 62 с. **Стр.21**
- 10 Тарифы на электроэнергию в разных регионах России.– <https://energybase.ru/tariff/electricity/2019> **стр. 29**
- 11 Нуждин А.В., К вопросу расчета экономической плотности тока с учетом времени наибольших нагрузок, срока эксплуатации и изменения стоимости электроэнергии в зависимости от региона расположения электрических сетей / А.В. Нуждин, Ю.Н. Кондрашова, А.Ю. Турищев // Технические науки от теории к практике:– Новосибирск: СибАК, 2016. – С. 188-196. **стр. 29**
- 12 О функционировании розничных рынков электроэнергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии: Постановление правительства Российской Федерации № 442 принято 04.05.2012.– [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_130498/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_130498/) **стр 49**

## АННОТАЦИЯ

Ахметов А.А Поиск интервала времени  $T_{им}$  с точки зрения целесообразности выбора сечений проводников в сетях до 1000 В по экономической плотности тока – Челябинск: ЮУрГУ, Энергетический, 2020.– 51 с., 30 рис., 32 табл., библиогр. список 12 – наим.

Ключевые слова: радиальная схема электроснабжения, экономическая плотность тока, число часов использования максимума нагрузки, дисконтированные затраты.

Объект исследования – сеть электрическая, распределительная.

Цель работы – разработка модели для расчета экономической плотности тока в современных экономических условиях для электрических сетей 0,4 кВ.

Особенность выпускной квалификационной работы состоит в разработке новой модели для расчета экономической плотности тока в сетях до 1 кВ, учитывающей изменения стоимости кабелей и проводов, рост нагрузки и рост тарифа на электроэнергию с течением времени.

Результаты исследования – работа направлена на решение актуальной проблемы оптимизации затрат на строительство и эксплуатацию линий электропередач.

Данная работа может представлять интерес для проектных, строительномонтажных организаций при строительстве новых электрических сетей и реконструкции существующих объектов.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА И ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ РАБОТЫ	
1.1 Изучение существующих методик определения экономической плотности тока различными авторами.....	7
2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА В РАДИАЛЬНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ	
2.1 Уточнение расчетных выражений для определения экономической плотности тока в сети с учетом долгосрочного прогноза изменения тарифов на электроэнергию .....	12
Выводы по разделу 2.....	20
3 РАСЧЕТЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА ДЛЯ РАДИАЛЬНЫХ КАБЕЛЬНЫХ И ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ.....	21
3.1 Исследование экономической плотности тока в различных регионах Российской Федерации .....	29
Выводы по разделу 3.....	33
4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛА ВРЕМЕНИ $T_{им}$ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ВЫБОРА СЕЧЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ В СЕТЯХ ДО 1000 В ПО ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА .....	34
Выводы по разделу 4.....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	50
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	51

## ВВЕДЕНИЕ

### *Актуальность работы.*

При современном строительстве линий электропередач стоит учитывать то, что при уменьшении сечения проводов возрастают потери при передаче электрической энергии, а при увеличении сечения наоборот – потери уменьшаются, но возрастают капитальные затраты на сооружение электросети. Один из методов учитывающий нагрузку на проводники, а так же капитальные вложения в сеть является выбор сечения проводников по экономической плотности тока. Данный метод разработанный в середине прошлого столетия был передовым так учитывал материал проводника, количество часов использования максимума нагрузки.

Но переход к рыночной экономике во всем мире показывает несоответствие данных значений в современных условиях, этому способствует увеличение цен на электроэнергию, инфляция, цены на цветной металл и многие другие факторы.

За это время произошли существенные изменения в экономике, вследствие чего можно утверждать о том, что приведенные в ПУЭ [1] численные значения экономической плотности тока могут приводить к ошибочным решениям.

В настоящее время в научно-технических журналах публикуются работы, посвященные решению по выбору экономической плотности тока в современных экономических условиях, что подчеркивает актуальность работы. В этих публикациях рассматриваются различные экономико-математические модели, в которых отмечается недостаточная обоснованность ранее существующих нормативов экономической плотности тока в современных условиях. Это объясняется неопределенностью экономических характеристик и малой достоверностью прогнозов их изменения. Кроме того, среди этих работ нет работы, в которой были бы учтены все обозримые факторы, влияющие на исход решения.

*Цель работы* – разработать технико-экономическую модель по определению экономической плотности тока для КЛ и ВЛ в современных условиях и на ее основе решить поставленную задачу по определению интервала времени  $T_{им}$  с точки зрения целесообразности выбора сечений проводников по экономической плотности тока.

*Практическая значимость работы* заключается в возможности применения результатов данной работы при проектировании сетей до 1000В. Так же можно утверждать, что рассматриваемая в данной выпускной квалификационной работе тема является своевременной и актуальной.

# 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА И ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ РАБОТЫ

## 1.1 Изучение существующих методик определения экономической плотности тока различными авторами

Для обоснования выбранного решения при проектировании систем электроснабжения напряжением выше 1кВ проводится технико-экономический расчет, в основе которого лежит величина дисконтированных затрат.

При проектировании же сетей низкого напряжения до 1000В согласно [1], проверке по экономической плотности тока не подлежат: сети промышленных предприятий до 1 кВ при числе часов использования максимума нагрузки предприятий до 4000–5000.

При числе часов использования максимума нагрузки больше 5000, на базе критерия минимума дисконтированных затрат в этих сетях определяется экономическая плотность тока  $J_{ЭК}$ .

Значения ( $J_{ЭК}$ ) применяющиеся в ПУЭ не соответствуют критерию минимума приведённых затрат, так как она прямо пропорциональна капитальным затратам и обратно пропорциональна стоимости потерь электроэнергии. Так же изменились цены на цветной металл, что в свою очередь говорит о том, что старые значения экономической плотности не отвечают современным экономическим условиям и не соответствует рекомендациям, по оценке эффективности инвестиционных проектов. Данные значения получены в середине прошлого столетия и не учитывают изменения сметной стоимости оборудования в условиях современной рыночной экономике. В ПУЭ так же отсутствуют значения экономической плотности для самонесущих изолированных проводов (СИП).

Так же увеличилось число параметров, влияющих на величину  $J_{ЭК}$ . Нормированные значения нельзя считать актуальными в настоящее время, а, следовательно, нельзя и положить их в основу нормирования  $J_{ЭК}$ . Это относится, прежде всего, к таким экономическим параметрам, как норма дисконта ( $E$ ), коэффициент дефляции ( $k_{деф}$ ) и цена электроэнергии, которые существенно зависят от текущей социально-экономической ситуации, курса национальной валюты по отношению к доллару, темпов инфляции и т.п.

Учитывая данные факторы можно сделать вывод, что разработка новой модели определения экономической плотности проводников актуальна в современности.

Происходящие изменения в современной электроэнергетике придают особую важность правильного выбора сечения проводников при строительстве новых, реконструкции существующих объектов.

Поставленные задачи министерством энергетики, изложенные в «Энергетической стратегии России на период до 2035 года» [2] включают в себя: техническое перевооружение и реконструкцию электросетевых объектов, а также модернизацию сетей.

Одним из таких решений является правильное определение экономической плотности тока в распределительных сетях до 1000В.



В сетях до 1 кВ мы будем рассматривать кабельные и воздушные линии. Рассмотрим модель расчета экономической плотности тока, представленной в работе [3].

Формула затрат на сооружении линии имеет следующий вид:

$$Z_{\text{л}} = K_{\text{л}} + \sum_{t=1}^{T_{\text{р}}} \frac{I_{\text{о.р}} + I_{\text{пот}}}{(1+E)^t}, \quad (1.1)$$

где  $K_{\text{л}}$  – капитальные вложения в сеть на 1 км, [руб.];

$T_{\text{р}}$  – расчетный период, на весь инвестиционный цикл, [год];

$I_{\text{о.р}}$  – издержки на обслуживание и ремонт на шаге  $t$ , [руб];

$I_{\text{пот}}$  – издержки на возмещение потерь на шаге  $t$ , [руб];

$E$  – норма дисконта или ставка сравнения, представляет собой норму прибыли на капитал, [о.е.].

Для определения  $J_{\text{эк}}$  на основе минимума приведенных затрат:

$$J_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{расч}}}{F_{\text{эк}}} = \sqrt{\frac{b \cdot (p_{\text{н}} + a_{\text{э}})}{3 \cdot \beta \cdot \rho \cdot \tau}}, \quad (1.2)$$

где  $I_{\text{расч}}$  – расчетный ток, А ;

$F_{\text{эк}}$  – экономическое сечение, мм<sup>2</sup>;

$b$  – часть удельных капитальных вложений, пропорциональная сечению провода, или цена погонного метра кабеля, руб/(км · мм<sup>2</sup>);

$p_{\text{н}}$  – нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений, 1/год;

$a_{\text{э}}$  – ежегодные отчисления на амортизацию и ремонт, 1/год;

$\beta$  – стоимость электроэнергии, руб./кВт · ч;

$\rho$  – удельное сопротивление материала провода, Ом · мм<sup>2</sup>/м;

$\tau$  – время наибольших потерь, ч.

После проведенных расчетов в работе [3] были получены значения экономической плотности тока  $J_{\text{эк}}$  для кабелей типа ААБл с алюминиевыми и типа СБл медными жилами, так же выполнен анализ полученных значений для данных 1980 и 2010 годов.

На основании этого в данной работе [3] сделаны выводы:

–  $J_{\text{эк}}$  для кабелей с алюминиевыми жилами в ценах 1980 и 2010 гг. практически не отличаются, что может свидетельствовать о пропорциональном росте цен на соответствующую кабельную продукцию и на электроэнергию;

–  $J_{\text{эк}}$  для кабелей с медными жилами в ценах 1980 и 2010 гг. отличаются более чем в 1,5 раза, что можно объяснить высокими темпами роста цен на медь за рассмотренный период, превышающими темпы роста цены на электроэнергию.

Таким образом, для четырех типов кабелей в данном примере были установлены максимальное и минимальное значения изменения  $J_{\text{эк}}$  для показателей 2010 года, представленные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Значения  $J_{\text{эк}}$  для КЛ 6–10 кВ в ценах 2010 года

Экономическая плотность тока	Экономическая плотность тока	
	$\tau = 5200$ ч	$\tau = 7500$ ч
ААБл	0,18	1,67
АСБл	0,62	3,35
АВВГ	0,19	1,28
ВВГ	0,45	4,73

При проведении анализа данных таблицы 1.1, полученные, значения  $J_{\text{эк}}$  отличаются, от указанных в ПУЭ, в меньшую сторону. Современная кривая зависимости  $J_{\text{эк}}$  от  $T_{\text{им}}$  имеет большую крутизну, чем по данным ПУЭ.

В данной модели не учтена возможность роста нагрузок с течением времени, что будет влиять на величину экономической плотности тока. Кроме того в целевой функции затрат не учитывается обслуживание процентов по кредитам.

В модели, описанной в кандидатской диссертации [4] один из вышеуказанных недостатков исключен.

$$j_{\text{эк}} = \frac{I_0}{F_{\text{экон}}} = I_0 \cdot \sqrt{\frac{\gamma \left( 1 + \sum_{t=t_0}^{T_p} \alpha_{\text{обсл}} (1+E)^{-t} \right)}{3 \cdot \rho \sum_{t=t_0}^{T_p} \tau (I_0 \cdot (1+qt))^2 \cdot (C_0 \cdot (1+zt)) (1+E)^{-t}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\gamma \left( 1 + \sum_{t=t_0}^{T_p} \alpha_{\text{обсл}} (1+E)^{-t} \right)}{3 \cdot \rho \sum_{t=t_0}^{T_p} \tau (I_0 \cdot (1+qt))^2 \cdot (C_0 \cdot (1+zt)) (1+E)^{-t}}}, \quad (1.3)$$

где  $I_0$  – начальный расчетный ток;

$\rho$  – удельное сопротивление проводника Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$\gamma$  – процентная ставка кредита, %;

$q$  – коэффициент, учитывающий динамику роста нагрузки;

$t$  – расчётный период, год;

$z$  – коэффициент, учитывающий динамику роста стоимости электроэнергии;

$C_0$  – стоимость электроэнергии, соответствующая начальному расчётному периоду, руб/кВт·ч;

$E$  – норма дисконта;

$\alpha_{\text{обсл}}$  – коэффициент отчислений от капитальных вложений на обслуживание и ремонт линии.

Однако в данной модели не учитывается обслуживание процентной ставки по кредитам.

Результаты расчётов экономической плотности тока из [4], приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Значения экономической плотности тока

Проводники	Экономическая плотность тока, А/мм <sup>2</sup> , при числе часов использования максимума нагрузки в год			
	более 1000 до 3000	более 3000 до 5000	более 5000	
Неизолированные провода и шины напряжением 10 - 35 кВ				
алюминиевые	ПУЭ	1,300	1,100	1,000
	Расчет без учета роста нагрузки	0,961	0,442	0,284
	Расчет с учетом роста нагрузки	0,816	0,484	0,383

Как видно из таблицы 1.2, экономическая плотность тока, рассчитанная с учетом динамики роста нагрузки, оказалась больше, чем без учета указанного фактора.

В рассмотренной работе [5] выполненной в Магнитогорском государственном техническом университете была создана модель, учитывающая многие параметры, такие как цены на проводники в различных регионах Российской Федерации, ущерб от перерывов электроснабжения, ежегодные эксплуатационные расходы. В данной модели автор рассматривал провода марки СИП.

Новая формула экономической плотности тока, определяется как отношение наибольшего протекающего тока в линии к экономическому сечению.

$$j_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{b \cdot (a_a + p_n)}{3 \cdot (\tau \cdot \beta + y_0 \cdot T_v \cdot \cos \varphi) \cdot \rho}}, \quad (1.5)$$

где  $b$  – часть удельных капитальных вложений;

$a_a$  – ежегодные отчисления на амортизацию и ремонт линии;

$p_n$  – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;

$\tau$  – время наибольших потерь электроэнергии;

$\beta$  – стоимость потерь электроэнергии;

$y_0$  – удельный ущерб от перерывов электроснабжения;

$T_v$  – среднее время восстановления электроснабжения;

$\rho$  – удельное сопротивление проводника Ом · мм<sup>2</sup>/м.

Результаты расчетов экономической плотности тока по данной модели приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Экономическая плотность тока для проводников типа СИП для Урала

Проводники	Экономическая плотность тока, А/мм <sup>2</sup> , при числе часов использования максимума нагрузки в год			
	1000-3000	3000-5000	более 5000	
Неизолированные провода и шины напряжением 10 - 35 кВ				
на металлических опорах	ПУЭ	1,3	1,1	1,0
	СИП	1,698	1,693	1,682
на железобетонных опорах	СИП	1,565	1,561	1,551

#### Формулировка цели и постановка задач исследования

1. Ни в одной из рассмотренных выше экономико-математических моделей определения экономической плотности тока в проводниках не учитываются все факторы, оказывающие влияние на исход решения.
2. Выше рассмотренные модели позволяют определить экономическую плотность тока только в радиальных линиях электропередач.
3. Требуется разработка новой экономико-математической модели определения экономической плотности тока в линиях электропередач в современных экономических условиях, обладающей большей универсальностью.

## 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА В РАДИАЛЬНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

При определении экономически выгодных сечений, а следовательно и экономической плотности тока, следует учитывать затраты на покупку и эксплуатацию кабелей и проводов за расчётный период службы.

Срок службы кабеля — календарная продолжительность его эксплуатации до момента возникновения предельного состояния, т. е. невозможности его дальнейшей эксплуатации. Учитывая современное состояние российской экономики, с целью снижения риска вложений расчётный срок следует принимать меньшим срока полезной службы объекта. В наших расчетах примем расчётный период равный 20 годам.

При определении сечения линий по экономической плотности стоит учитывать нагрузку на кабель в середине срока службы, но при условии минимума суммарных затрат за расчётный период  $T_p$ , в соблюдении указанного выше критерия нет необходимости.

### 2.1 Уточнение расчетных выражений для определения экономической плотности тока в сети с учетом долгосрочного прогноза изменения тарифов на электроэнергию

Экономическая плотность  $J_{эк}$  определяется при условии минимума дисконтированных затрат за расчётный период  $T_p$ . При нахождении экономической плотности тока с использованием критерия минимума дисконтированных затрат крутизна зависимости  $J_{эк}=F(T_{нб})$  значительно больше, чем при применении критерия минимума годовых приведённых затрат.

Исследования, проведенные различными авторами, в том числе и в нашем ВУЗе показывают, что величина экономической плотности тока отличается от значений, приведенных в ПУЭ. В ходе проведенных расчетов было выявлено, что существенное влияние на значение ЭПТ влияют такие параметры как: время максимальной нагрузки, расчётный срок эксплуатации и стоимость электроэнергии.

Рассмотрев результаты, полученные в ходе исследований можно утверждать, что при использовании значений  $J_{эк}$  указанных в ПУЭ может приводить к ошибочным решениям неактуальным в современных экономических условиях. Данное утверждение объясняется следующими причинами. ЭПТ зависит напрямую от экономической ситуации в стране: стоимость электроэнергии, стоимость ремонтов сети, обслуживание сети, нормы дисконта, а также от эксплуатационных параметров: времени максимальной нагрузки и расчетного срока эксплуатации.

Использование устаревших значений норматива дисконта на уровне  $E_n=0,12$ , установленного в 90-х годах, не соответствует современному экономическому положению. На величину дисконта влияют следующие факторы: банковский процент, рост инфляции, уровень доходности инвестиционных проектов,

дивидендная политика организации, размеры собственных средств инвестора, различные аспекты фактора времени.

Так же значения многих этих параметров нельзя считать установившимися на ближайшие 20 лет.

Укрупненные показатели стоимости строительства ЛЭП зависят от сечения выбранного проводника, а так же его марки. Диапазон сечения кабелей 0,4 кВ от 10 до 240 мм<sup>2</sup>.

Удельная стоимость линии определяется по следующей формуле (2.1):

$$\begin{aligned} K_{\text{уд.ЛЭП}} &= K_{\text{уд.ЛЭП}(F=10)} + \frac{K_{\text{уд.ЛЭП}(F=240)} - K_{\text{уд.ЛЭП}(F=10)}}{240 - 10} \cdot (F - 10) = \\ &= K_{\text{уд.ЛЭП}(F=10)} + \frac{\Delta K_{\text{уд.ЛЭП}}}{\Delta F} \cdot (F - 10). \end{aligned} \quad (2.1)$$

Для упрощения расчета, в данном выражении выполним замену:

$$C = \frac{\Delta K_{\text{уд.ЛЭП.справ}}}{\Delta F}. \quad (2.2)$$

$$D = K_{\text{уд.ЛЭП}(F=10)} - 10 \cdot C. \quad (2.3)$$

Подставив (2.2) в (2.1) получим:

$$K_{\text{уд.ЛЭП}} = D + C \cdot F. \quad (2.4)$$

В наших расчетах примем допущение, что зависимость удельной стоимости строительства линии от сечения проводника изменяется по линейному закону. Данная зависимость приведена на рисунке 2.1.

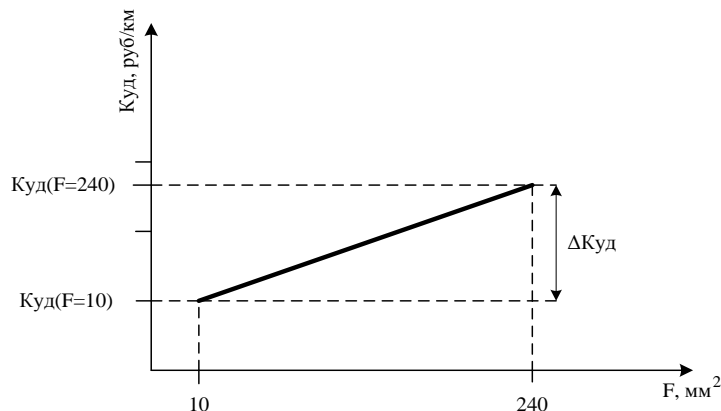


Рисунок 2.1 – Закон изменения укрупненных стоимостных показателей от сечения линий напряжением до 1 кВ

Полученное выражение (2.4) подставим в (2.1) и получим:

$$K_0 = (D + CF) \cdot K_{\text{прив.б.г}} \cdot L_{\text{ЛЭП}} \cdot I_{\text{ц.2019/2000}} \quad (2.5)$$

Издержки – это вид затрат за расчетный период времени, в которые входят затраты на ремонт и обслуживание оборудования, стоимость потерь электроэнергии, а также ежегодная плата по банковскому кредиту.

Издержки в текущем году  $T$  находятся по следующей формуле (2.6):

$$I_T = I_{\text{рем.}T} + I_{\text{обсл.}T} + I_{\delta T} + I_{\text{п.ээ.}T}, \quad (2.6)$$

где  $I_{\text{рем.}T}$  – издержки в году  $T$  на ремонт оборудования;

$I_{\text{обслуж.}T}$  – издержки в году  $T$  на обслуживание оборудования;

$I_{\delta T}$  – финансовые затраты на обслуживание процентной ставки банковского кредита в году  $T$ ;

$I_{\text{п.ээ.}T}$  – стоимость потерь электроэнергии в элементах схемы электроснабжения, т.е. в ЛЭП и трансформаторах, в году  $T$  при условии постоянства тарифа в течении года.

Издержки на ремонт оборудования находятся по следующему выражению

$$I_{\text{рем.}T} = (E_{\text{н.рем.}i} + E_{\text{н.обсл}}) \cdot K_{\text{пр.}T} = (E_{\text{н.рем.}i} + E_{\text{н.обсл}}) \cdot K_0 \cdot I_{\text{ц.т/тбаз}}, \quad (2.7)$$

где  $E_{\text{н.рем.}}$ ,  $E_{\text{н.обсл}}$  – процент отчисления на ремонт и обслуживание;

$I_T$  – индекс стоимости, приведенный к текущему году  $T$ .

Издержки на обслуживание оборудования находятся по формуле (2.8):

$$I_{\text{обсл.}T} = \sum_{i=1}^n E_{\text{обсл.}i} \cdot K_0 = E_{\text{обсл.лэп}} \cdot K_0 \cdot I_T + E_{\text{обсл.п/с}} \cdot K_0 \cdot I_T, \quad (2.8)$$

где  $E_{\text{обслуж.лэп}}$ ,  $E_{\text{обслуж.п/с}}$  – процент отчисления на обслуживание сети.

Изучив данные [6] с 2000-2019 года, сделаем вывод о том, что индекс сметной стоимости изменяется по линейному закону. Данная зависимость представлена на рисунке 2.2.

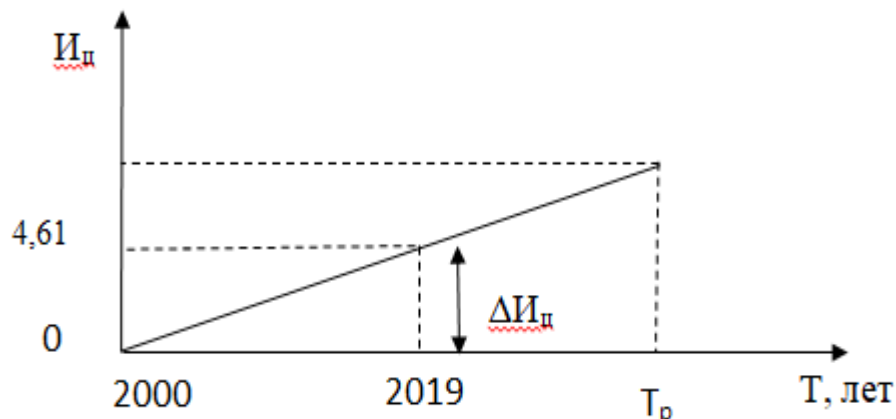


Рисунок 2.2 – Закон изменения сметной стоимости оборудования в году  $T$

$$I_{ц,Т} = 1 + \frac{I_{ц(Т=2019)} - I_{ц(Т=2000)}}{2019-2000} \cdot (Т - 1), \quad (2.9)$$

где  $I_{ц,Т=2000}$  – индекс цен на 2000 год;  
 $I_{ц,Т=2019}$  – индекс цен на 2019 год [6].

Расчетное выражение для определения издержек в году  $T$  на обслуживание процентной ставки банковского кредита, при условии равномерного ежемесячного погашения, определяется по формуле 2.10:

$$I_{\delta T} = K_0 \cdot \gamma_{\text{мес.}} \cdot \sum_{i=12 \cdot T-11}^{12 \cdot T} \left( 1 - \frac{i-1}{12 \cdot T_{\text{кр}}} \right), \quad (2.10)$$

где  $\gamma_{\text{мес.}}$  – процентная ставка по кредиту;  
 $T_{\text{кр}}$  – срок кредитования;  
 $i$  – текущий месяц год выплаты по кредиту.

Стоимость потерь электроэнергии в элементах схемы электроснабжения в году  $T$ , при условии изменения тарифов на электроэнергию и роста нагрузки, в течении расчетного периода, определяется по следующей формуле (2.11):

$$I_{п.э.т} = \int_0^{T_{\text{р}}} C_{0,\text{ср.т}} \cdot \Delta P_T(t) \cdot dt = C_{0,\text{ср.т}} \cdot \int_0^{T_{\text{р}}} \Delta P_T(t) \cdot dt. \quad (2.11)$$

где  $C_{0,\text{ср.т}}$  – среднегодовое значение тарифа электроэнергию в году  $T$ ;  
 $\Delta P_T$  – потери электроэнергии в текущем году  $T$ .

Для определения стоимости электроэнергии в году  $T$  воспользуемся, данными из прогноза долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года [7], представленными на рисунке 2.3.

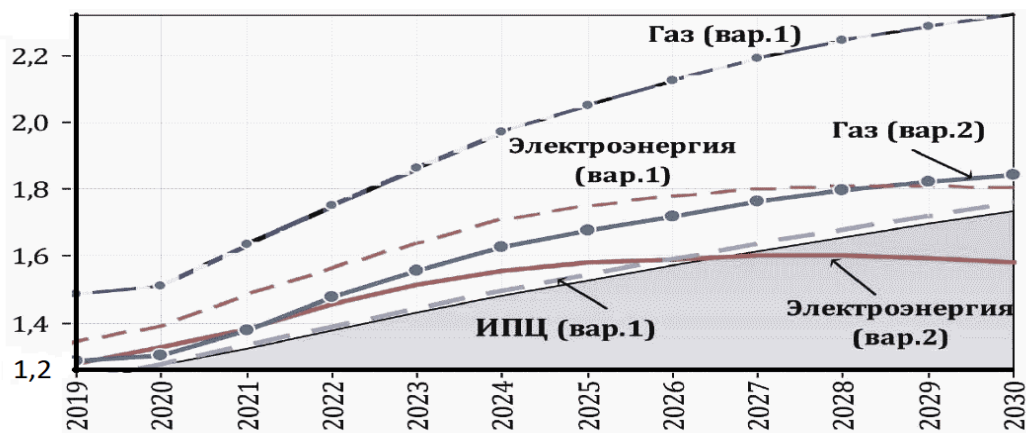


Рисунок 2.3 – Динамика изменения цен на газ и электроэнергию для потребителей



По графику видно, что к 2030 году наблюдается замедление роста тарифа на электроэнергию, а так же устанавливается его постоянное значение. Влияние на рост тарифов оказывает государство, так же тарифы связаны с ростом инфляции в стране.

Проанализировав данные прогноза, представленная на рисунке 2.3 зависимость изменения тарифов на электроэнергию, была аппроксимирована, методом наименьших квадратов. График аппроксимированной кривой представлен на рисунке 2.4.

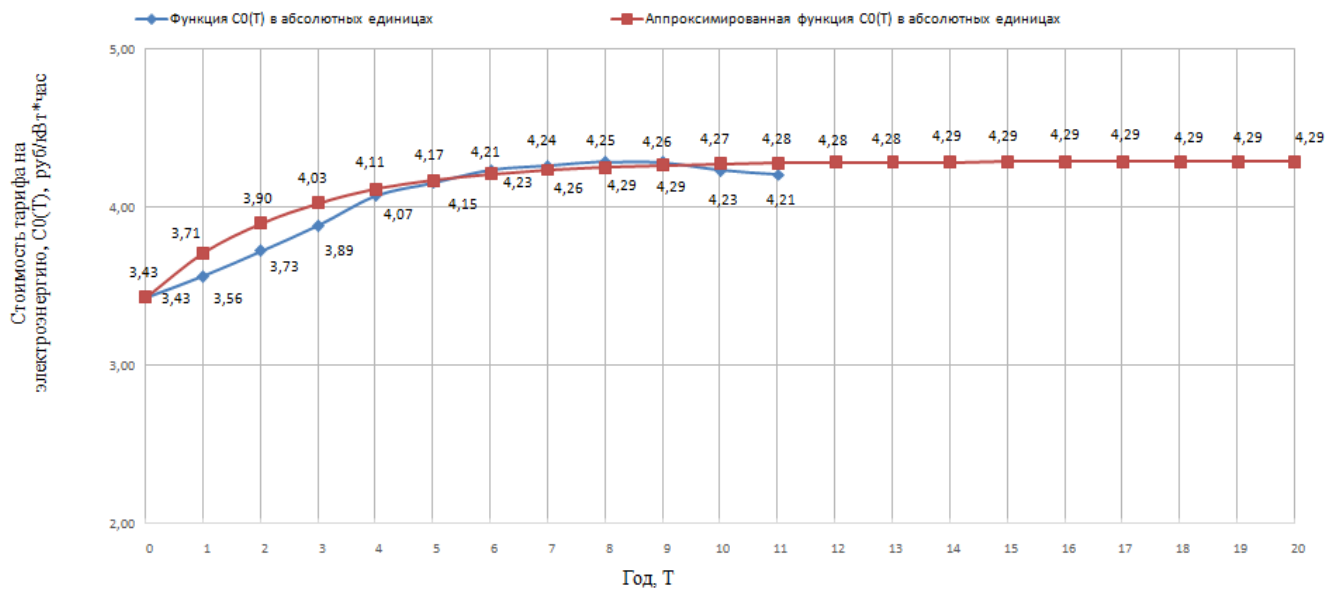


Рисунок 2.4 – Реальная и аппроксимированная кривая изменения тарифов на электроэнергию (за точку отсчета приняли 2019 год)

Функция, описывающая форму кривой:

$$C_0(T) = C_{0.\text{нач}} + (C_{0.\text{max}} - C_{0.\text{нач}})(1 - e^{-\frac{T}{T_0}}). \quad (2.12)$$

По формуле (2.12) найдем значение среднегодового значения тарифа:

$$C_{0.\text{ср.т}} = \frac{C_{0.(T-1)} + C_{0.т}}{2}. \quad (2.13)$$

Помимо роста тарифов в тоже время может увеличиваться и нагрузка. Примем допущение, что нагрузка в сети будет увеличиваться по линейному закону, на одинаковый прирост в каждый год T. График изменения нагрузки показан на рисунке 2.5.

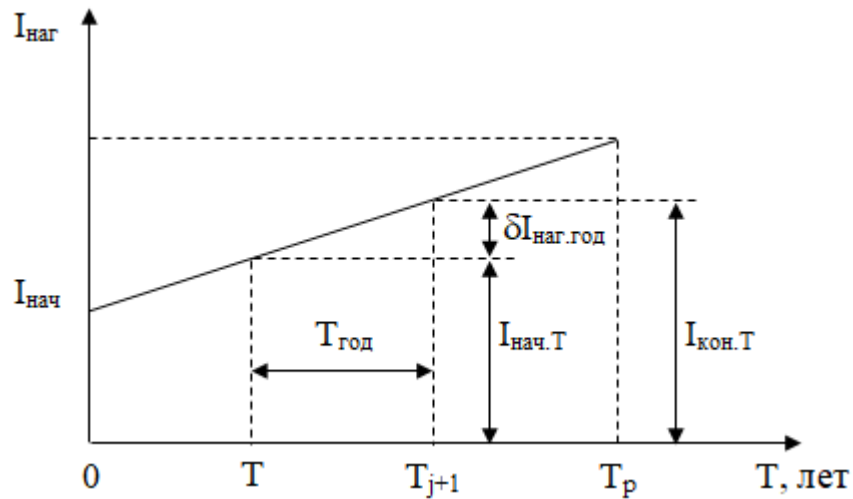


Рисунок 2.5 – Закон изменения нагрузки в году T

В первый год эксплуатации:

$$I_{\text{ср.кв.1}} = I_{\text{нач}} \quad (2.15)$$

Во второй год:

$$I_{\text{ср.кв.2}} = I_{\text{нач}} \cdot [1 + \Delta I_*] \quad (2.16)$$

В третий год:

$$I_{\text{ср.кв.3}} = I_{\text{нач}} \cdot [1 + 2 \cdot \Delta I_*] \quad (2.17)$$

Проанализировав формулы (2.12) и (2.13) получим:

$$I_{\text{ср.кв.T}} = I_{\text{нач}} \cdot [1 + (T - 1) \cdot \Delta I_*] \quad (2.18)$$

Потери электроэнергии за текущий год в нормальном режиме работы определим по формуле (2.19):

$$\Delta P_T(t) = 3 \cdot I_{\text{ср.кв.}}^2 \cdot \frac{\rho \cdot L_{\text{ЛЭП}}}{F} \cdot 10^{-3}, \quad (2.19)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление ЛЭП.

Закон изменения среднеквадратичного за год значения тока во времени, при изменении его по линейному закону:

$$I_T(t) = I_{\text{ср.кв.нач.T}} + \frac{\Delta I_* \cdot I_{\text{нач}}}{T_T} \cdot t. \quad (2.20)$$

$$I_T(t) = I_{\text{нач}} \left[ 1 + (T-1) \cdot \Delta I_* \right] + \frac{I_{\text{нач}} \cdot \Delta I_{\Gamma^*}}{T_{\Gamma}} \cdot t = I_{\text{нач}} \cdot \left[ 1 + (T-1) \cdot \Delta I_* + \frac{\Delta I_{\Gamma^*}}{8760} \cdot t \right]. \quad (2.21)$$

Для упрощения примем обозначение:

$$\alpha(t) = 1 + (T-1) \cdot \Delta I_*. \quad (2.22)$$

Следовательно, выражение примет вид:

$$I_T(t) = I_{\text{нач}} \cdot \left[ \alpha(t) + \frac{\Delta I_{\Gamma^*}}{8760} \cdot t \right]. \quad (2.23)$$

$$I_T^2(t) = I_{\text{нач}}^2 \cdot \left[ \alpha^2(t) + 2 \cdot \alpha(t) \cdot \frac{\Delta I_{\Gamma^*}}{8760} \cdot t + \left( \frac{\Delta I_{\Gamma^*}}{8760} \right)^2 \cdot t^2 \right]. \quad (2.24)$$

С учетом (2.12) (2.14) (2.15) выражение примет вид:

$$\begin{aligned} I_{\text{П.ЭЭ.Т}} &= C_{0,\text{ср.т}} \cdot 3 \cdot I_{\text{нач}}^2 \cdot \frac{\rho \cdot L_{\text{ЛЭП}}}{F} \cdot 10^{-3} \cdot \int_0^{8760} \left[ \alpha^2(T)+2 \cdot \alpha(T) \cdot \frac{\Delta I_{\Gamma^*}}{8760} \cdot t + \frac{\Delta I_{\Gamma^*}^2}{8760^2} \cdot t^2 \right] \cdot dt = \\ &= C_{0,\text{ср.т}} \cdot 3 \cdot I_{\text{нач}}^2 \cdot \frac{\rho \cdot L_{\text{ЛЭП}}}{F} \cdot 10^{-3} \cdot \left[ \alpha^2(T) \cdot t \Big|_0^{8760} + 2 \cdot \alpha(T) \cdot \frac{\Delta I_{\Gamma^*}}{8760} \cdot \frac{t^2}{2} \Big|_0^{8760} + \frac{\Delta I_{\Gamma^*}^2}{8760^2} \cdot \frac{t^3}{3} \Big|_0^{8760} \right] = \\ &= 3 \cdot C_{0,\text{ср.т}} \cdot I_{\text{нач}}^2 \cdot \frac{\rho \cdot L_{\text{ЛЭП}}}{F} \cdot 10^{-3} \cdot \left[ \alpha^2(T) + \alpha(T) \cdot \Delta I_{\Gamma^*} + \frac{\Delta I_{\Gamma^*}^2}{3} \right] \cdot 8760. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Для упрощения выражения выполним замену:

$$\beta(T) = \left[ \alpha^2(T) + \alpha(T) \cdot \Delta I_{\Gamma^*} + \frac{\Delta I_{\Gamma^*}^2}{3} \right]. \quad (2.26)$$

Выражение примет вид:

$$I_{\text{П.ЭЭ.Т}} = 3 \cdot C_{0,\text{ср.т}} \cdot I_{\text{нач}}^2 \cdot \frac{\rho \cdot L_{\text{ЛЭП}}}{F} \cdot 10^{-3} \cdot \beta(t) \cdot 8760. \quad (2.27)$$

Выразим входящее в (2.17) начальное значение квадрата среднеквадратичного за год тока  $I_{\text{нач}}^2$  через квадрат начального значения расчетного тока воспользовавшись равенством потерь за год:

$$\Delta W_{\Gamma} = 3 \cdot I_{\text{ср.кв.наг}}^2 \cdot R \cdot T_{\text{год}} = 3 \cdot I_{\text{ср.кв.наг}}^2 \cdot R \cdot 8760. \quad (2.28)$$

$$\Delta W_{\Gamma} = 3 \cdot I_{\text{наг}}^2 \cdot R \cdot \tau. \quad (2.29)$$

Эту связь получим из равенства потерь энергии за год, определенных через среднеквадратичное и максимальное значение токов.

Приравняв правые части двух выражений получим:

$$I_{\text{наг}}^2 = I_{\text{ср.кв.наг}}^2 = I_{\text{р.наг}}^2 \cdot \frac{\tau}{8760}. \quad (2.30)$$

Подставив (2.20) в (2.17) получим:

$$I_{\text{П.ЭЭ.Т}}^2 = 3 \cdot I_{\text{р.наг}}^2 \cdot \frac{t}{8760} \cdot \beta(t) \cdot \frac{\rho \cdot L_{\text{лэп}}}{F} \cdot 10^{-3} \cdot 8760. \quad (2.31)$$

$$3_{\Sigma} = K_0 \cdot \left[ 1 + (E_{\text{н.обсл}} + E_{\text{н.рем}}) \cdot \sum_{T=1}^{T_p} \frac{I_{\text{ЦТ/Тбаз}}(T)}{(1+E_{\text{н.д}})^T} \right] + \gamma_{\text{мес}*} \cdot \sum_{i=1}^{12 \cdot T_{\text{кр}}} \left( 1 - \frac{i-1}{12 \cdot T_{\text{кр}}} \right) + 3 \cdot I_{\text{р.наг}}^2 \cdot \tau \cdot \frac{\rho \cdot L_{\text{лэп}}}{F} \cdot 10^{-3} \cdot \sum_{T=1}^{T_p} \frac{\beta(T) \cdot C_{0,\text{ср}}}{(1+E_{\text{н.д}})^T}. \quad (2.32)$$

Для упрощения дальнейших записей расчетных выражений примем обозначения:

$$B = \left[ 1 + (E_{\text{н.обсл}} + E_{\text{н.рем}}) \cdot \sum_{T=1}^{T_p} \frac{I_{\text{ЦТ/Тбаз}}(T)}{(1+E_{\text{н.д}})^T} \right] + \gamma_{\text{мес}*} \cdot \sum_{i=1}^{12 \cdot T_{\text{кр}}} \left( 1 - \frac{i-1}{12 \cdot T_{\text{кр}}} \right), \quad (2.33)$$

$$M = \sum_{T=1}^{T_p} \frac{\beta(T) \cdot C_{0,\text{ср}}}{(1+E_{\text{н.д}})^T}, \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} 3_{\Sigma} &= (D+C \cdot F) \cdot L_{\text{лэп}} \cdot B + 3 \cdot C_{0,\text{ср}} \cdot I_{\text{р.наг}}^2 \cdot \frac{\rho \cdot L_{\text{лэп}} \cdot \tau}{F} \cdot M \cdot 10^{-3} = \\ &= D \cdot B \cdot L_{\text{лэп}} + C \cdot F \cdot B \cdot L_{\text{лэп}} + 3 \cdot I_{\text{р.наг}}^2 \cdot \frac{\rho \cdot L_{\text{лэп}} \cdot \tau}{F} \cdot M \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Найдем удельное значение затрат за расчетный период, приходящихся на единицу длины проводника и единицу расчетного тока  $I_{\text{р.наг}}$ :

$$\begin{aligned}
z_{\Sigma, \text{уд}} &= \frac{z_{\Sigma}}{I_{\text{р.наг}} \cdot L_{\text{лэп}}} = \frac{D \cdot B}{I_{\text{р.наг}}} + \frac{C \cdot B \cdot F}{I_{\text{р.наг}}} + 3 \cdot \frac{I_{\text{р.наг}}}{F} \cdot \rho \cdot M \cdot \tau \cdot 10^{-3} = \\
&= \frac{D \cdot B}{I_{\text{р.наг}}} + C \cdot B \cdot \frac{1}{j} + 3 \cdot \rho \cdot M \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot j.
\end{aligned} \tag{2.36}$$

Возьмем производную по плотности тока  $j$  :

$$\frac{dz_{\Sigma, \text{уд}}}{dj} = 0 - \frac{C \cdot B}{j^2} + 3 \cdot \rho \cdot M \cdot \tau \cdot 10^{-3} = 0 \tag{2.37}$$

Из выражения (2.37) получим:

$$j^2 \cdot 3 \cdot \rho \cdot M \cdot \tau \cdot 10^{-3} = C \cdot B. \tag{2.38}$$

$$j = j_0 = \sqrt{\frac{C \cdot B \cdot 10^3}{3 \cdot \rho \cdot M \cdot \tau}} \cdot 10^{-3}. \tag{2.39}$$

Учитывая:

$$\tau = (0,124 + \frac{T_{\text{им}}}{10^4})^2 \cdot T_{\text{год}} = (0,124 + \frac{T_{\text{им}}}{10^4})^2 \cdot 8760. \tag{2.40}$$

Получим формулу экономической плотности тока:

$$j_0 = \sqrt{\frac{C \cdot B \cdot 10^3}{3 \cdot \rho \cdot M \cdot (0,124 + \frac{T_{\text{им}}}{10^4})^2 \cdot 8760}}. \tag{2.41}$$

## Выводы по разделу 2

В данной главе магистерской диссертации выполнена разработка новой модели по расчету экономической плотности тока, учитывающая недостающие параметры существующих моделей. Приняты следующие допущения: рост нагрузки на сеть изменяется по линейному закону, тариф на электроэнергию после 2030 года приняли постоянным, удельные стоимости электрооборудования изменяются линейно, так же в нашей модели в затраты включили обслуживание банковского кредита.

### 3 РАСЧЕТЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА ДЛЯ РАДИАЛЬНЫХ КАБЕЛЬНЫХ И ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ

В нашей работе мы воспользовались укрупнёнными стоимостными показателями сооружения линий электропередач 0,4 кВ из «Сборника укрупненных показателей стоимости строительства (реконструкции) подстанций и линий электропередачи для нужд ОАО «Холдинг МРСК»» [8].

В нашей модели рассматривались четыре марки кабелей: с алюминиевыми жилами АСБл, АВВГ, АВБШв, а так же кабели с медными жилами ВВГ. Воздушные линии рассматривали выполненные проводами СИП, АС и А.[9].

Кабель марки АСБл 0,4 кВ - это силовой бронированный лентами кабель, с алюминиевой жилой, с бумажной пропитанной изоляцией, свинцовой оболочкой, наружный покров из битума и пряжи. Конструкция кабеля представлена на рисунке 3.1.

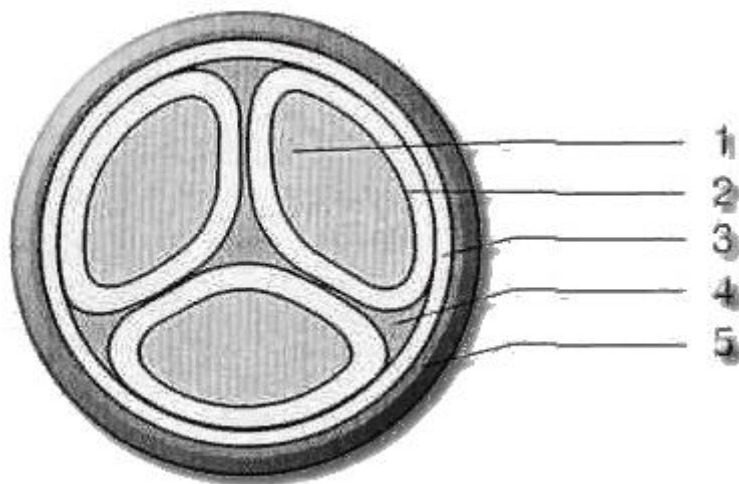


Рисунок 3.1 – Конструкция кабеля АСБл с секторными жилами  
1 – Токопроводящая жила; 2 – Изоляция на жиле; 3 – Поясная изоляция;  
4 – Заполнение из бумажных жгутов; 5– Оболочка.

Кабель марки АВВГ: А–алюминиевая жила, В–изоляция из поливинилхлоридного пластиката, В–оболочка из поливинилхлоридного пластиката, Г-небронированный. Среди прочего АВВГ применяются при переменном напряжении до 1 кВ и частоте 50 Гц в стационарных установках.

АВВГ (рисунок 3.2) применяются в районах с разного типа климатом. Возможно использование данного типа кабеля не только на суше, но и под водой и на высоте. Силовой кабель АВВГ применяется в электроснабжении, осуществляет питание приемников от источников тока. Прокладку кабеля, возможно, осуществлять в земле, также возможны открытые территории и в кабельные каналы. Данный тип кабеля нашел широкое применение в деятельности человека. Монтаж кабелей АВВГ можно осуществлять в помещении любого уровня влажности. Сфера применения как промышленные объекты, так и бытовые, включает в себя вертикальные и горизонтальные магистральные сети, кабельные

эстакады, тоннели, шахты, лаборатории, жилые помещения, блочные сооружения и т.д.



Рисунок 3.2 – Кабель АВВГ с секторными жилами

Электромеханическое изделие с маркировкой АВБШв (рисунок 3.3) – это силовой бронированный кабель с алюминиевой жилой, заключенной в пластиковую оболочку ПВХ. Его маркировка обозначает материалы, применяемые при изготовлении и конструктивные особенности изделия.

Электромеханическое изделие предназначено для передачи электроэнергии в установках стационарного типа на номинальное переменное напряжение в один киловольт с частотой в пятьдесят герц, или на постоянное напряжение, которое больше переменного в два целых четыре десятых раза.



Рисунок 3.3 – Кабель марки АВБШв

Провод СИП (рисунок 3.4) – самонесущий изолированный провод 2 типа используется для воздушных магистралей линий электропередач, имеющих номинальное напряжение не более 0,6/1 кВ и частоту до 50 Гц.

Провод СИП представляет собой жгут из изолированных фазных жил, скрученный несущей нулевой. В качестве изолирующего материала применяется полиэтилен, устойчивый к ультрафиолетовому излучению и атмосферным

воздействиям. Проводник сделан из алюминия или его сплава. В центральной части сечения нулевой жилы проходит стальной сердечник, а вокруг него закручены витки алюминиевой проволоки.

Самонесущие изолированные провода (СИП) предназначены для применения в воздушных линиях электропередачи (ЛЭП) с подвеской на опорах или фасадах зданий и сооружений.

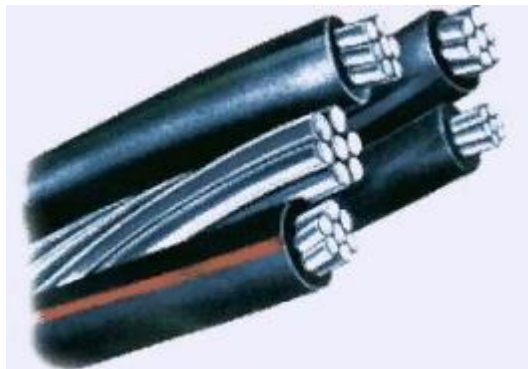


Рисунок 3.4 – Самонесущий изолированный провод СИП

Неизолированные провода марки АС (рисунок 3.5) изготовлен из алюминиевой проволоки и стального сердечника. Конструкция провода состоит из скрученных правильной скруткой, при которой направление скрутки соседних повивов направлено в противоположные стороны, а наружный повив скрутки направлен в правую сторону, алюминиевых проволок и стального сердечника.



Рисунок 3.5 – Провод марки АС

Неизолированные провода марки А (рисунок 3.6) используется для монтажа воздушных линий передач электрической энергии. В состав входят проволоки, изготовленные из алюминия. Алюминиевая проволочная конструкция является основой провода А. Проволока получена методом скручивания особой скруткой в направлении, которое обеспечивает противоположное размещение соседних витков, причем для наружных витков - правая скрутка.





Рисунок 3.6 – Провод марки А

Кабель ВВГ (рисунок 3.7) – медный силовой кабель, который используется в стационарных установках для передачи и последующего распределения электрической энергии. Медный силовой кабель ВВГ рассчитан на номинальное напряжение до 1000В. Универсальный тип кабеля, применяется в разных промышленных и осветительных устройствах, местных сетях.

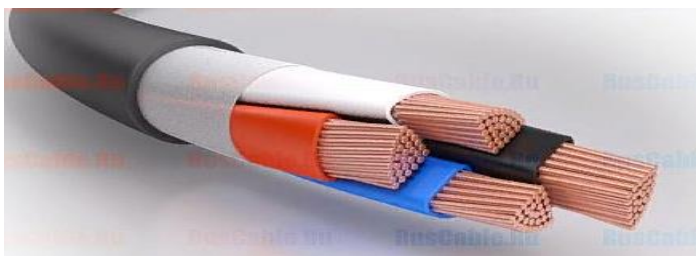


Рисунок 3.7 – Кабель марки ВВГ

Стоимости приведенные в таблицах 3.1–3.2, для КЛ и ВЛ переменного тока напряжением 1000В, учитывают затраты на кабель, оборудование, монтажные работы, специальные переходы разборку и восстановление благоустройства после их прокладки.

Таблица 3.1 – Укрупненные стоимости КЛ 0,4 кВ, тыс. руб./км (цены 2000 г.)

Сечение, мм <sup>2</sup>	АСБл ААБл	АВВГ	АВБШв	ВВГ
10	121	141	124	226
16	124	144	127	230
25	127	149	133	238
35	137	160	143	256
50	151	174	157	278
70	168	191	174	305
95	190	212	196	339
120	219	243	208	388
150	242	267	214	427
185	246	275	219	440
240	250	283	226	452

Таблица 3.2 – Укрупненные показатели стоимости ВЛ 0,4 кВ, тыс. руб./км (цены 2000 г.)

Сечение, мм <sup>2</sup>	СИП-2	АС	А
16	79	154	132
25	93	163	155
35	97	202	168
50	100	224	180
70	112	243	199
95	124	465	242
120	138	489	263
150	149	503	281
185	167	523	296
240	184	540	310

Для расчета приняты следующие значения экономических параметров:

норматив дисконтирования  $E_{\text{баз}} = 0,1$ ; коэффициент дефляции на уровне 2019г  $K_{\text{деф.баз}} = 84,46$  [7]. В соответствии для КЛ, проложенных в земле, отчисления от капиталовложений:  $a_{\text{обсл}}$  – на обслуживание и ремонт равный 0,045.

Используя программные средства Mathcad, используя выражения указанные выше, составим математическую модель по определению экономической плотности тока.

Для получения расчётного выражения, отражающего зависимость изменения стоимости одного кВт·ч электроэнергии в функции времени воспользуемся данными, приведенными в [7].

Рассмотрим изменение стоимости электрической энергии за 10 лет, для чего воспользуемся данными, заимствованными из [7] рисунок 2.5.

После перехода к рыночной экономике и возникшей задачи повышения эффективности функционирования энергетической отрасли была проведена реформа электроэнергетики. Она заключалась в создании рыночных механизмов регулирования, обеспечивающих как привлечение инвестиций, так и поддержание надежности работы отрасли в целом. Для решения указанных задач и был создан рынок электроэнергии и мощности [11].

В современных экономических условиях в передаче электроэнергии участвуют различные субъекты, такие как потребители, исполнители коммунальной услуги. В распределении и передаче электроэнергии задействованы гарантирующие поставщики и электросетевые компании [12]

Индекс цен перевода цен из 2000 г. в 2019 равен 4,61 [7]. В расчете были приняты: срок эксплуатации – 20 лет, цена за кВт электроэнергии – 3,71 руб.

Тогда для кабеля АСБл при числе  $T_{им}=1000$  ч число часов максимальных потерь будет равно:

$$\tau = \left( 0,124 + \frac{1000}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = 439 \text{ ч.} \quad (2.47)$$

Тогда экономическая плотность тока будет равна:

$$\begin{aligned} j_3 &= \sqrt{\frac{C \cdot B \cdot 10^3}{3 \cdot \rho \cdot M \cdot \left( 0,124 + \frac{T_{им}}{10^4} \right)^2 \cdot 8760}} = \\ &= \sqrt{\frac{1,922 \cdot 3,941 \cdot 10^3}{3 \cdot 0,027 \cdot 45,105 \cdot \left( 0,124 + \frac{1000}{10^4} \right)^2 \cdot 8760}} = 2,133 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Данным методом проведем расчеты для остальных проводников, без учета нагрузки, результаты занесем в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Значения экономической плотности тока без учёта роста нагрузки

Тим, час	АСБл	АВВГ	АВБШв	СИП	ВВГ	АС	А
500,00	2,95	3,15	2,86	2,41	3,99	4,04	3,22
1000,00	2,29	2,45	2,22	1,93	3,10	3,13	2,50
1500,00	1,87	2,00	1,82	1,58	2,53	2,54	2,04
2000,00	1,58	1,69	1,54	1,33	2,14	2,16	1,73
2500,00	1,37	1,46	1,33	1,15	1,86	1,87	1,52
3000,00	1,21	1,29	1,17	1,02	1,64	1,65	1,32
3500,00	1,08	1,15	1,05	0,914	1,467	1,48	1,18
4000,00	0,98	1,04	0,95	0,82	1,32	1,34	1,07
4500,00	0,89	0,95	0,87	0,75	1,21	1,22	0,97
5000,00	0,82	0,88	0,81	0,69	1,11	1,12	0,89
5500,00	0,76	0,81	0,74	0,64	1,03	1,04	0,83
6000,00	0,71	0,75	0,68	0,59	0,96	0,97	0,77
6500,00	0,66	0,71	0,64	0,56	0,89	0,90	0,72
7000,00	0,62	0,66	0,60	0,52	0,85	0,85	0,68
7500,00	0,58	0,62	0,57	0,49	0,79	0,80	0,64
8000,00	0,55	0,59	0,54	0,46	0,75	0,76	0,60
8760,00	0,51	0,54	0,49	0,43	0,69	0,70	0,56

Полученные результаты экономической плотности для воздушных и кабельных линий отображены на рисунках 3.8 и 3.9.

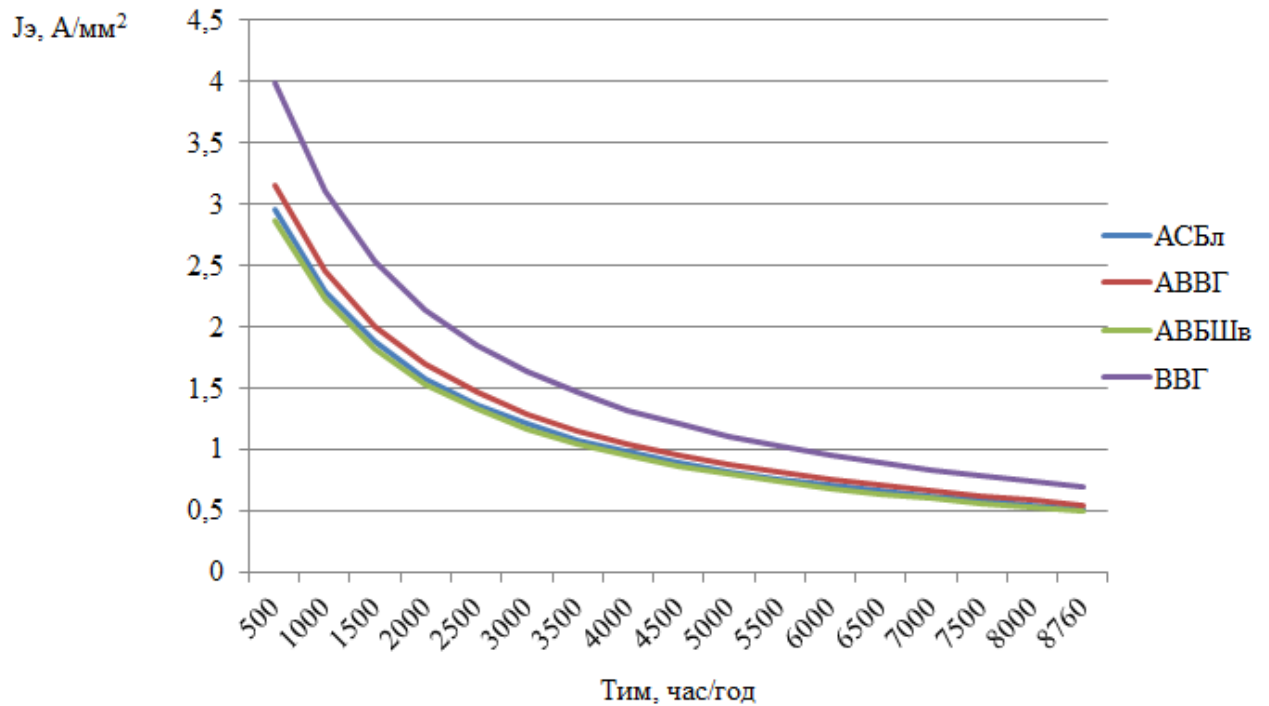


Рисунок 3.8 – Зависимость  $J_{эк}$  от числа использования максимума нагрузки для КЛ выполненных кабелями марки АСБл, АВВГ, АВБШв, ВВГ

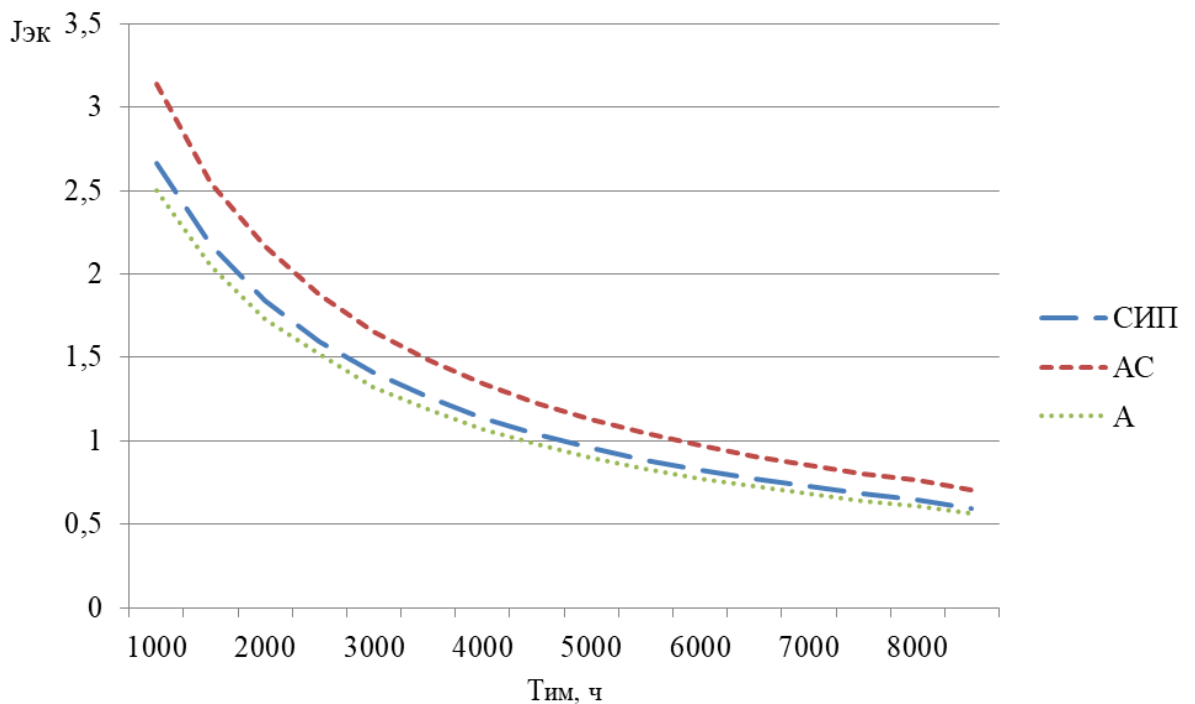


Рисунок 3.9 – Зависимость  $J_{эк}$  от числа использования максимума нагрузки для ВЛ выполненных проводами марки СИП, АС, А

Для расчетов приняли, что нагрузка на сеть возрастает по 5% в год. Результаты расчета  $J_{эк}$  в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Значения экономической плотности тока  $A/mm^2$ , с учётом увеличения нагрузки на 5%

Тим, час	АСБл	АВВГ	АВБШв	СИП	ВВГ	АС	А
500,00	1,49	1,59	1,45	1,25	2,02	2,04	1,63
1000,00	1,16	1,24	1,12	0,97	1,57	1,35	1,08
1500,00	0,95	1,01	0,92	0,81	1,28	1,11	0,88
2000,00	0,80	0,85	0,78	0,67	1,08	0,93	0,74
2500,00	0,69	0,74	0,67	0,58	0,94	0,81	0,64
3000,00	0,61	0,65	0,59	0,51	0,831	0,71	0,57
3500,00	0,54	0,58	0,53	0,46	0,74	0,64	0,51
4000,00	0,49	0,53	0,48	0,41	0,67	0,58	0,46
4500,00	0,45	0,48	0,44	0,38	0,61	0,53	0,42
5000,00	0,41	0,44	0,40	0,35	0,56	0,48	0,38
5500,00	0,38	0,41	0,37	0,32	0,52	0,45	0,36
6000,00	0,35	0,38	0,34	0,303	0,48	0,42	0,33
6500,00	0,33	0,35	0,32	0,28	0,45	0,39	0,31
7000,00	0,31	0,33	0,30	0,26	0,42	0,36	0,29
7500,00	0,29	0,31	0,28	0,25	0,40	0,34	0,27
8000,00	0,28	0,30	0,27	0,23	0,381	0,32	0,26
8760,00	0,26	0,27	0,25	0,21	0,35	0,30	0,24

Для расчетов приняли, что нагрузка на сеть возрастает на 15%. Результаты расчета  $J_{эк}$  сведены в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – Значения экономической плотности тока  $A/mm^2$ , с учётом увеличения нагрузки на 15%

Тим, час	АСБл	АВВГ	АВБШв	СИП-2	ВВГ	АС	А
500,00	0,75	0,80	0,73	0,63	1,01	1,02	0,82
1000,00	0,58	0,62	0,56	0,49	0,79	0,79	0,63
1500,00	0,47	0,51	0,46	0,40	0,64	0,65	0,52
2000,00	0,40	0,43	0,39	0,34	0,54	0,533	0,44
2500,00	0,35	0,37	0,34	0,29	0,47	0,47	0,38
3000,00	0,30	0,33	0,31	0,26	0,41	0,42	0,33
3500,00	0,27	0,29	0,26	0,23	0,37	0,37	0,30
4000,00	0,25	0,26	0,24	0,21	0,33	0,34	0,27
4500,00	0,22	0,24	0,22	0,19	0,30	0,31	0,24
5000,00	0,21	0,22	0,20	0,17	0,28	0,28	0,22

Продолжение таблицы 3.5

Тим, час	АСБл	АВВГ	АВБШв	СИП-2	ВВГ	АС	А
5500,00	0,19	0,20	0,18	0,16	0,26	0,26	0,21
6000,00	0,18	0,19	0,17	0,15	0,24	0,24	0,19
6500,00	0,16	0,18	0,16	0,143	0,22	0,23	0,18
7000,00	0,15	0,17	0,15	0,13	0,21	0,21	0,17
7500,00	0,15	0,16	0,14	0,12	0,20	0,20	0,16
8000,00	0,14	0,11	0,13	0,11	0,19	0,19	0,15
8760,00	0,13	0,11	0,12	0,11	0,17	0,17	0,14

### 3.1 Исследование экономической плотности тока в различных регионах Российской Федерации

Цены на электроэнергию в разных регионах России существенно отличаются. Тарифы на электроэнергию показаны в таблице 3.6. Разница в тарифах очень ощутима и составляет широкий диапазон значений от 1,1 руб./кВт·ч в Иркутской области, до 8,42 руб./кВт·ч в Чукотском АО [10].

Таблица 3.6 – Средние цены на электроэнергию в России 2019 года

Москва	Санкт-Петербург	Республика Башкортостан	Челябинск	Краснодар	Иркутск	Чукотский АО
5,47	4,75	3,17	3,25	4,81	1,12	8,42

В работе [11] так же учитывались цены на проводники в разных регионах России, на рисунках 3.10–3.11 показаны зависимости стоимости проводов АС-120 и СИП от региона строительства.

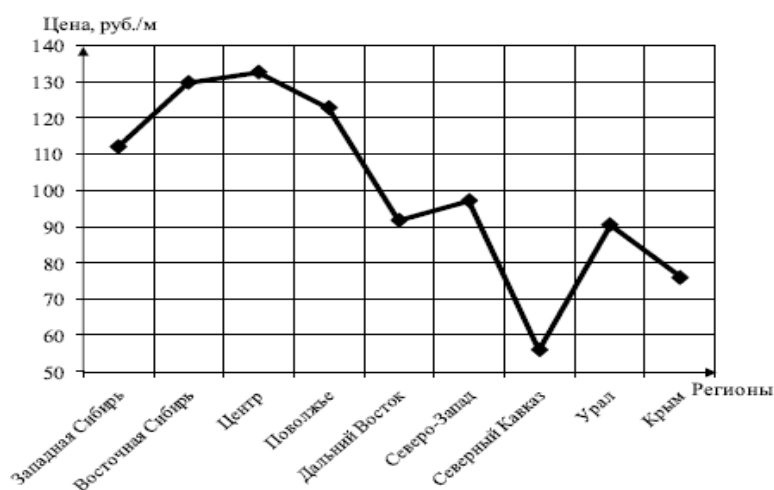


Рисунок 3.10– Зависимость стоимости 1 метра провода марки АС-120 в зависимости от региона

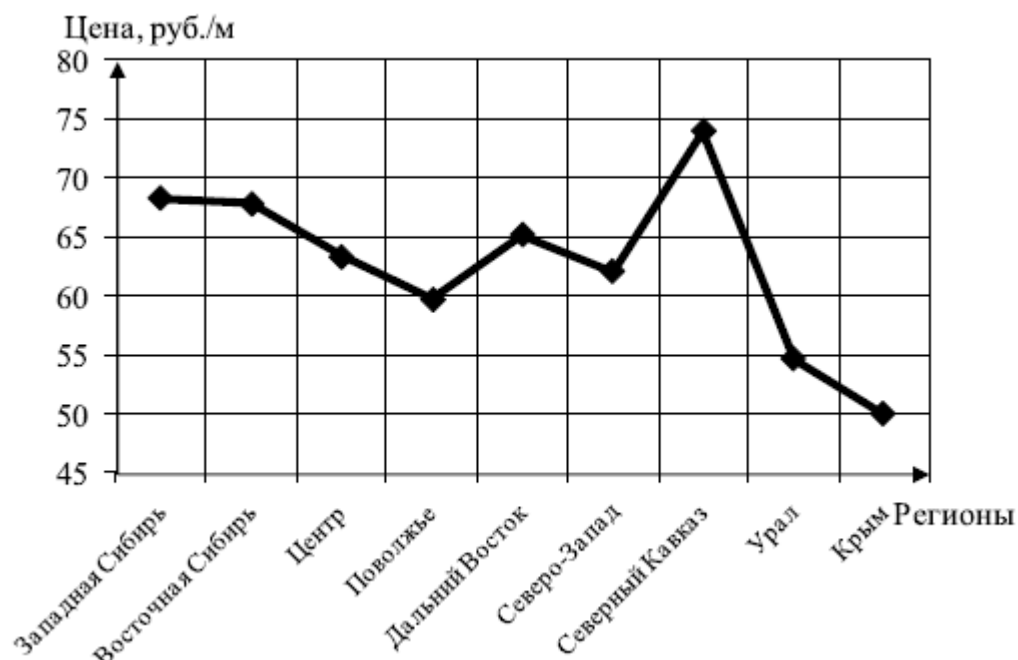


Рисунок 3.11– Зависимость стоимости 1 метра провода марки СИП-3 1x70 в зависимости от региона

Удельная стоимость провода марки АС в разных регионах России представлена в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты статистического анализа стоимостных показателей проводников марки АС в разных регионах России

Регион	Среднее значение стоимости 1 км, тыс.руб/км проводника марки АС по регионам России сечением, мм <sup>2</sup>					
	70,00	95,00	120,00	150,00	185,00	240,00
Западная Сибирь	63,03	86,91	119,13	155,52	200,56	235,61
Восточная Сибирь	99,85	106,56	129,84	144,96	158,50	206,87
Центр	79,40	103,81	132,71	187,88	244,46	282,37
Поволжье	121,91	129,11	122,93	151,05	152,70	184,01
Дальний Восток	96,01	81,03	91,94	110,88	131,46	118,95
Северо-Запад	55,46	77,13	97,22	128,92	154,91	192,46
Северный Кавказ	39,55	77,86	56,12	91,63	134,27	139,89
Урал	61,67	72,18	90,61	119,93	118,44	150,96
Крым	41,68	58,82	76,23	89,14	114,86	152,47

Удельная стоимость провода марки СИП в разных регионах России представлена в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты статистического анализа стоимостных показателей проводников марки СИП в разных регионах России

Регион	Среднее значение стоимости 1 км, тыс.руб/км проводника марки СИП по регионам России сечением, мм <sup>2</sup>			
	50,00	70,00	95,00	120,00
Западная Сибирь	51,53	68,23	98,79	134,54
Восточная Сибирь	50,76	67,86	90,42	116,01
Центр	49,86	63,31	84,28	108,55
Поволжье	44,12	59,71	76,04	102,61
Дальний Восток	46,91	65,12	76,69	98,38
Северо-Запад	46,32	62,13	84,92	106,79
Северный Кавказ	49,18	74,52	96,51	124,54
Урал	42,08	54,63	76,07	95,36
Крым	38,51	50,13	66,42	78,06

Значение  $J_{эк}$  в соответствии с тарифом на электроэнергию и стоимости проводников приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Значения экономической плотности тока в разных регионах России в соответствии с тарифами на электроэнергию и стоимостными показателями на провод марки АС–70  $J_{эк}$ , А/мм<sup>2</sup>

$T_{им}$ , час	Москва	Санкт-Петербург	Республика Башкортостан	Челябинск	Краснодар	Иркутск	Чукотский АО
500,000	2,19	1,87	2,53	1,97	1,65	3,43	2,37
1000,00	1,70	1,45	1,97	1,53	1,27	2,66	1,84
1500,00	1,39	1,19	1,61	1,25	1,04	2,18	1,51
2000,00	1,17	1,06	1,36	1,062	0,88	1,84	1,27
2500,00	1,01	0,87	1,18	0,92	0,76	1,59	1,10
3000,00	0,89	0,76	1,04	0,81	0,67	1,40	0,97
3500,00	0,80	0,68	0,93	0,72	0,60	1,261	0,87
4000,00	0,72	0,62	0,84	0,65	0,54	1,14	0,79
4500,00	0,66	0,56	0,76	0,59	0,49	1,04	0,72
5000,00	0,61	0,52	0,70	0,55	0,45	0,95	0,66
5500,00	0,56	0,48	0,65	0,51	0,42	0,88	0,61
6000,00	0,52	0,45	0,61	0,47	0,39	0,82	0,57
6500,00	0,49	0,42	0,57	0,44	0,37	0,77	0,54
7000,00	0,46	0,39	0,53	0,41	0,34	0,72	0,50
7500,00	0,43	0,37	0,50	0,39	0,32	0,68	0,47
8000,00	0,41	0,35	0,47	0,37	0,31	0,64	0,44
8760,00	0,38	0,32	0,44	0,34	0,28	0,59	0,41



На рисунке 3.12 приведены значения ЭПТ для характерных регионов, расположенных на юге, севере и в центральной части России.

Наглядные результаты расчетов экономической плотности сети при  $T_{им} = 500$  часов, выполненной проводом марки АС–70 в разных регионах России, с учетом тарифа на электроэнергию, а так же удельной стоимости самого провода, приведены на рисунке 3.13. Зависимость ЭПТ от стоимости обратно пропорциональная, чем выше цена на электроэнергию, тем меньше значение ЭПТ, что наблюдается в Чукотском АО. В Иркутске же обратная ситуация, значение ЭПТ завышена по сравнению со значениями в ПУЭ.

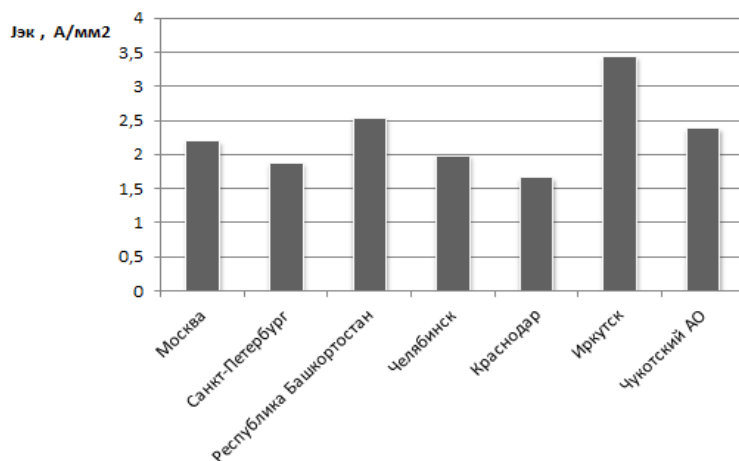


Рисунок 3.12 – Зависимость экономической плотности тока сети выполненной проводом АС-70, от тарифа на электроэнергию в разных регионах России

Таблица 3.10 – Значения экономической плотности тока в разных регионах России в соответствии с тарифами на электроэнергию и стоимостными показателями на провод марки СИП сечением 50 мм<sup>2</sup>.

$T_{им},$ час	Москва	Санкт-Петербург	Республика Башкортостан	Челябинск	Краснодар	Иркутск	Чукотский АО
500,00	2,69	2,47	2,39	2,26	2,16	4,24	2,40
1000,00	2,09	1,91	1,86	1,76	1,67	3,29	1,86
1500,00	1,71	1,56	1,52	1,44	1,37	2,69	1,52
2000,00	1,44	1,32	1,28	1,21	1,16	2,27	1,29
2500,00	1,25	1,14	1,11	1,05	1,00	1,94	1,11
3000,00	1,10	1,01	0,98	0,93	0,88	1,7	0,98
3500,00	0,98	0,90	0,88	0,83	0,79	1,55	0,88
4000,00	0,89	0,82	0,79	0,75	0,71	1,48	0,79
4500,00	0,81	0,74	0,72	0,68	0,65	1,26	0,72
5000,00	0,75	0,68	0,66	0,63	0,60	1,13	0,67
5500,00	0,69	0,63	0,61	0,58	0,55	1,05	0,62
6000,00	0,64	0,59	0,57	0,54	0,52	1,09	0,57
6500,00	0,60	0,55	0,53	0,51	0,48	0,93	0,54
7000,00	0,56	0,52	0,50	0,47	0,44	0,86	0,50
7500,00	0,53	0,49	0,47	0,452	0,43	0,84	0,47
8000,00	0,50	0,46	0,45	0,42	0,40	0,79	0,45
8760,00	0,46	0,43	0,41	0,39	0,37	0,78	0,41

Для наглядности результаты исследования экономической плотности тока, в разных регионах России приведены на рисунке 3.13.

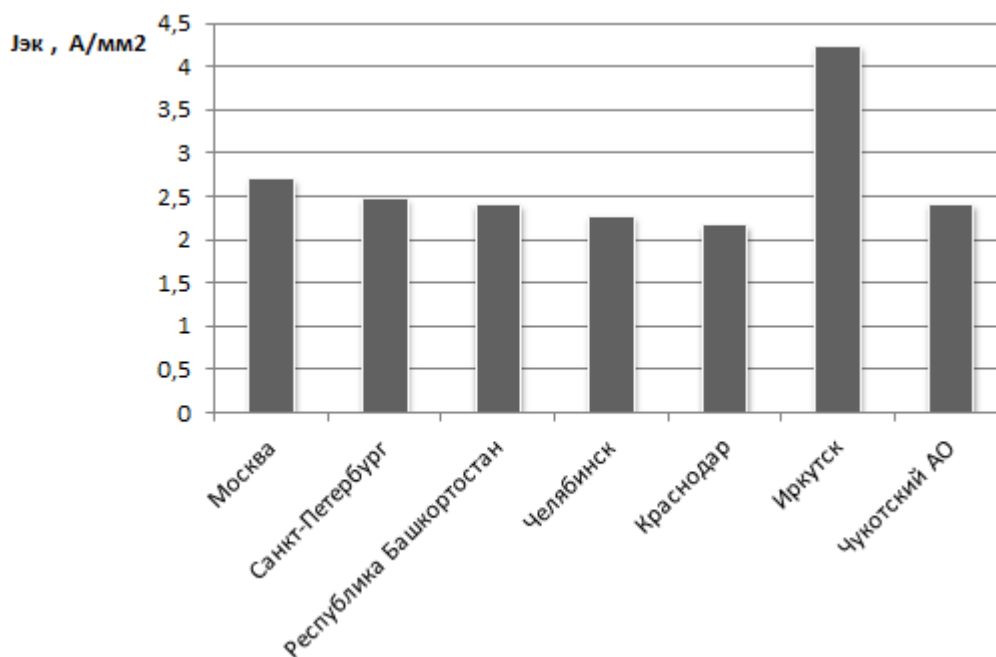


Рисунок 3.13 – Зависимость экономической плотности тока сети выполненной проводом СИП-50, от тарифа на электроэнергию в разных регионах России

### Выводы по разделу 3

1. При определении экономической плотности тока КЛ значение имеет не только тип изоляции и материал жилы, но и материал оболочки кабеля.

2. Для КЛ 0,4 кВ число кабелей в траншее и номинальное напряжение практически не влияют на значения экономической плотности тока.

3. Результаты расчетов  $J_{эк}$  для базового варианта исходных данных отличаются от приведенных в ПУЭ в меньшую сторону на 7-60%. Это свидетельствует о том, что использование нормированных в ПУЭ значений экономической плотности тока в современных условиях может приводить к ошибочным решениям при выборе сечений жил кабелей в распределительных и радиальных сетях.

#### 4 ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛА ВРЕМЕНИ $T_{им}$ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ВЫБОРА СЕЧЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ В СЕТЯХ ДО 1000 В ПО ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА

Согласно [1] проверке по экономической плотности не подлежат:

- сети промышленных предприятий и сооружений напряжением до 1 кВ при  $T_m$  до 4000 часов;
- ответвления к отдельным электроустановкам напряжением до 1 кВ, а также осветительные сети промышленных предприятий, жилых и общественных зданий;
- сборные шины электроустановок и ошиновка в пределах открытых (ОРУ) и закрытых (ЗРУ) РУ всех напряжений;
- сети временных сооружений, а также устройства со сроком службы три-пять лет.

Если сечение жил кабеля  $F_{эк}$ , выбранное по методу экономической плотности тока, не удовлетворяет какому-либо из технических требований, в том числе проверке по допустимому нагреву, выбирается наибольшее сечение по этим требованиям.

В таблицах 4.1–4.7 приведены допустимые токи для кабелей марки: АСБл, ААБл, АВВГ, АВБШв, ВВГ и проводов марки: СИП, АС, А.

Таблица 4.1– Длительно-допустимый ток для кабелей АСБл, ААБл

Сечение, мм <sup>2</sup>	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
$I_{дл. доп. земля}$ , А	65	90	115	135	165	200	240	272	305	345	402
$I_{дл. доп. воздух}$ , А	45	60	75	95	110	140	165	200	230	260	359

Таблица 4.2– Длительно-допустимый ток для кабелей АВВГ

Сечение, мм <sup>2</sup>	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
$I_{дл. доп. земля}$ , А	64	82	105	128	161	193	234	271	308	354	363
$I_{дл. доп. воздух}$ , А	38	55	69	82	101	128	156	184	216	248	359

Таблица 4.3– Длительно-допустимый ток для кабелей АВБШв

Сечение, мм <sup>2</sup>	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
$I_{дл. доп. земля}$ , А	59	77	100	121	147	178	212	241	274	305	368
$I_{дл. доп. воздух}$ , А	50	67	88	109	136	167	204	236	273	289	342

Таблица 4.4 – Длительно-допустимый ток для кабелей ВВГ

Сечение, мм <sup>2</sup>	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
$I_{дл. доп. земля}$ , А	90	120	150	180	225	275	330	385	435	473	500
$I_{дл. доп. воздух}$ , А	55	75	95	120	145	180	220	260	305	366	430

Таблица 4.5– Длительно-допустимый ток для проводов СИП

Сечение, мм <sup>2</sup>	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
I <sub>дл.доп.</sub> , А	50	75	95	160	245	290	315	340	385	495	515

Таблица 4.6 – Длительно-допустимый ток для проводов АС

Сечение, мм <sup>2</sup>	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
I <sub>дл.доп.</sub> , А	84	111	142	175	210	265	330	390	450	520	605

Таблица 4.7 – Длительно-допустимый ток для проводов марки А

Сечение, мм <sup>2</sup>	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
I <sub>дл.доп.</sub> , А	76	105	136	170	215	265	320	375	440	500	590

Проведем расчеты по данным полученным в предыдущем разделе нашей работы, для этого примем 4 варианта нагрузки : 50А, 100А, 200А, 300А.

Например при нагрузке  $I_p=200A$  для кабеля марки АВБШв при  $T_{им}=500$  ч/год,  $J_3= 2,954A/мм^2$ , следовательно по формуле (4.1):

$$F_{ЭК} = \frac{I_{расч}}{J_{ЭК}}. \quad (4.1)$$

Получим сечение:

$$F_{ЭК} = \frac{200}{2,869} = 69,71мм^2.$$

Согласно таблице (4.1) допустимый длительный ток для АВБШв до 1 кВ сечение 70 мм<sup>2</sup>, равен  $I_{дл.доп.} = 178A$  при прокладке в траншее и  $I_{дл.доп.} = 168A$  при прокладке в воздухе.

Введем обозначение  $I_{N(F_3)}$  – длительно допустимый ток, соответствующий экономически обоснованному на  $i$ -м на интервале изменения  $T_{им}$ . По данной методике построим зависимость выбора проводника по экономической плотности тока либо по длительно-допустимому току, данная методика приведена на рисунке 4.1.

На данном графике изображена ступенчатая зависимость длительно-допустимого тока для кабеля АВБШв от числа использования максима нагрузки, сплошной линией обозначили расчетный ток равный  $I_p=200A$ . Можно утверждать, что при  $I_{дл.доп.} < I_p$  необходимо сечение жил кабеля выбирать по допустимому току, при значении же  $I_{дл.доп.} > I_p$ , целесообразно выбирать по экономической плотности тока.

Для того чтобы найти точку пересечения ступенчатого изменения длительно-допустимого тока и расчетного тока аппроксимируем кривую с помощью полиномиальной функции второй степени.

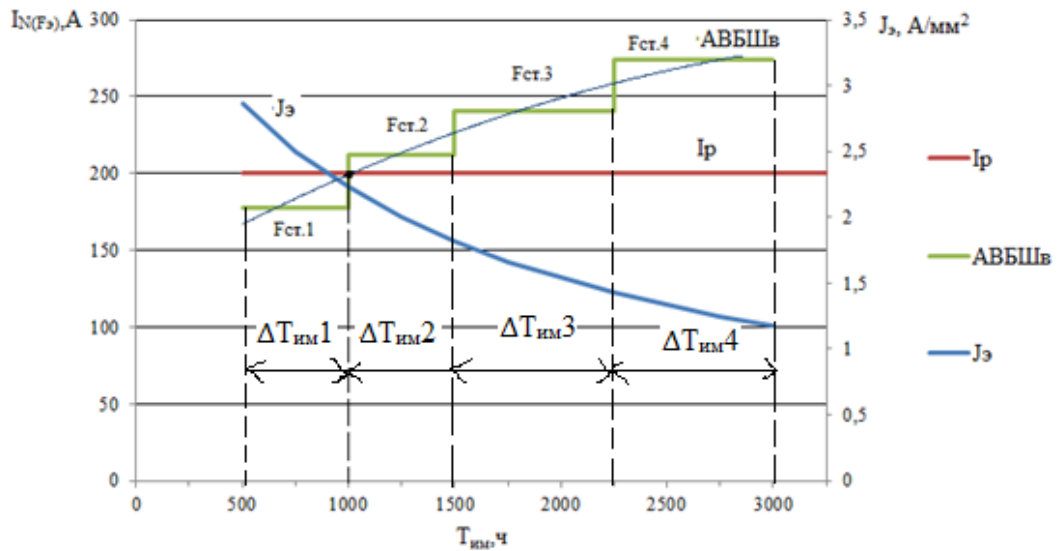


Рисунок 4.1 – Пример выбора сечения кабеля марки АВБШв

По рисунку 4.1, можно сделать вывод при  $T_{им} < 1000$  часов и нагрузке 200А, целесообразно кабель марки АВБШв выбирать по длительно-допустимому току, при числе же часов  $T_{им} > 1000$  часов целесообразно выбирать по экономической плотности тока. Данным способом определим интервал времени  $T_{им}$ , с точки зрения целесообразности выбора сечений проводников в сетях до 1000В по экономической плотности тока.

Сечения кабелей и проводов, выбранных по экономической плотности тока и ближайшие стандартные при нагрузке 50А, приведены в таблицах 4.1–4.3.

Таблица 4.1 – Сечения кабелей АСБл, АВВГ при нагрузке 50А по экономической плотности тока

Тим, час	Расчетные сечения проводников, мм <sup>2</sup>							
	АСБл	Фст.	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>	АВВГ	Фст.	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>
500	17	16	90	60	16	16	82	55
750	19	16	90	60	18	16	82	55
1000	22	25	115	75	20	16	82	55
1250	24	25	115	75	23	25	105	69
1500	27	25	115	75	25	25	105	69
1750	29	25	115	75	27	25	105	69
2000	32	35	135	95	29	25	105	69
2250	34	35	135	95	32	35	128	82
2500	36	35	135	95	34	35	128	82
2750	39	35	135	95	37	35	128	82
3000	41	35	135	95	39	35	128	82
4000	51	50	165	110	48	50	161	101
5000	61	70	200	140	57	50	161	101
6000	70	70	200	140	66	70	193	128
7000	80	70	200	140	75	70	193	128
8000	97	95	240	165	91	95	234	156

Таблица 4.2 – Сечения кабелей АВБШв, ВВГ при нагрузке 50А по экономической плотности тока

Тим, час	Расчетные сечения проводников, мм <sup>2</sup>							
	АВБШв	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>	ВВГ	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>
500	17	16	77	67	13	16	120	75
750	20	16	77	67	14	16	120	75
1000	22	25	100	88	16	16	120	75
1250	25	25	100	88	18	16	120	75
1500	27	25	100	88	20	16	120	75
1750	30	35	121	109	22	25	150	95
2000	32	35	121	109	23	25	150	95
2250	35	35	121	109	25	25	150	95
2500	37	35	121	109	27	25	150	95
2750	40	50	147	136	29	25	150	95
3000	42	50	147	136	30	35	180	120
4000	52	50	147	136	38	35	180	120
5000	62	70	178	167	45	50	225	145
6000	73	70	178	167	52	50	225	145
7000	83	95	212	204	59	50	225	145
8760	100	95	212	204	72	70	275	180

Таблица 4.3 – Сечения проводов СИП, АС, А при нагрузке 50А по экономической плотности тока

Тим, час	Расчетные сечения проводников, мм <sup>2</sup>								
	СИП	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.возд</sub>	АС	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>	А	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.возд</sub>
500	20	16	75	12	16	111	16	16	105
1000	26	25	95	16	16	111	20	16	105
1500	32	35	160	20	16	111	24	25	136
2000	37	35	160	23	25	142	29	25	136
2500	43	50	245	27	25	142	33	35	170
3000	49	50	245	30	35	175	38	35	170
3500	55	50	245	34	35	175	42	50	215
4000	60	50	245	37	35	175	47	50	215
4500	66	70	290	41	35	175	51	50	215
5000	72	70	290	44	50	210	56	50	215
5500	78	70	290	48	50	210	60	70	265
6000	84	95	315	51	50	210	65	70	265
6500	89	95	315	55	50	210	69	70	265
7000	95	95	315	58	70	265	73	70	265
7500	101	95	315	62	70	265	78	70	265
8000	107	120	340	66	70	265	82	95	320
8760	115	120	340	71	70	265	89	95	320

Сечения кабелей и проводов, выбранных по экономической плотности тока и ближайшие стандартные при нагрузке 100А, приведены в таблицах 4.4–4.6.

Таблица 4.4 – Сечения кабелей АСБл, АВВГ при нагрузке 100А

Тим,	Расчетные сечения проводников, мм <sup>2</sup>							
	АСБл	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>	АВВГ	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>
500	34	35	135	95	32	35	128	82
750	39	35	135	95	36	35	128	82
1000	44	50	165	110	41	35	128	82
1250	48	50	165	110	46	50	161	101
1500	53	50	165	110	50	50	161	101
1750	58	50	165	110	55	50	161	101
2000	63	70	200	140	59	50	161	101
2250	68	70	200	140	64	70	193	180
2500	73	70	200	140	68	70	193	180
2750	78	70	200	140	73	70	193	180
3000	83	95	240	165	77	70	193	180
4000	102	95	240	165	95	95	234	156
5000	121	120	272	200	114	120	271	184
6000	141	150	305	230	132	120	271	184
7000	160	150	305	230	150	150	308	216
8000	195	185	345	260	182	185	354	248

Таблица 4.5 – Сечения кабелей АВБШв, ВВГ при нагрузке 100А

Тим,	Расчетные сечения проводников, мм <sup>2</sup>							
	АВБШв	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>	ВВГ	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>
500	35	35	121	109	25	25	150	95
750	40	35	121	109	29	25	150	95
1000	45	50	147	136	32	35	180	120
1250	50	50	147	136	36	35	180	120
1500	55	50	147	136	39	35	180	120
1750	60	50	147	136	43	50	225	145
2000	65	70	178	167	47	50	225	145
2250	70	70	178	167	50	50	225	145
2500	75	70	178	167	54	50	225	145
2750	80	70	178	167	57	50	225	145
3000	85	95	212	204	61	70	275	180
4000	105	95	212	204	75	70	275	180
5000	123	120	241	2365	90	95	330	220
6000	145	150	274	273	104	95	330	220
7000	165	150	274	273	118	120	385	260
8760	200	185	305	289	144	150	385	260

Таблица 4.6 – Сечения проводов СИП, АС, А при нагрузке 100А

Тим, час	Расчетные сечения проводников, мм <sup>2</sup>								
	СИП	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.возд</sub>	АС	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>	А	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.возд</sub>
500	40	35	160	25	25	142	31	35	170
1000	52	50	245	32	25	142	40	35	170
1500	63	70	290	39	35	172	49	50	215
2000	75	70	290	46	50	210	58	50	215
2500	86	95	315	53	50	210	66	70	265
3000	98	95	315	60	50	210	76	70	265
3500	109	95	315	67	70	265	84	95	320
4000	121	120	340	75	70	265	93	95	320
4500	132	120	340	82	70	265	102	95	320
5000	144	150	385	89	95	330	111	120	375
5500	156	150	385	96	95	330	120	120	375
6000	167	150	385	103	95	330	129	120	375
6500	179	185	495	110	95	330	138	150	440
7000	190	185	495	117	120	390	147	150	440
7500	202	185	495	124	120	390	156	150	440
8000	213	240	515	131	120	390	165	150	440
8760	231	240	515	142	150	450	178	185	500

Сечения кабелей и проводов, выбранных по экономической плотности тока и ближайшие стандартные при нагрузке 100А, приведены в таблицах 4.7–4.9.

Таблица 4.7 – Сечения кабелей АСБл, АВВГ при нагрузке 200А

Тим, час	Расчетные сечения проводников, мм <sup>2</sup>							
	АСБл	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>	АВВГ	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>
500	68	70	200	140	63	70	193	128
750	77	70	200	140	73	70	193	128
1000	87	95	240	165	82	70	193	128
1250	97	95	240	165	91	95	234	156
1500	107	120	272	200	100	95	234	156
1750	116	120	272	200	110	120	271	184
2000	126	120	272	200	118	120	271	184
2250	136	150	305	230	128	120	271	184
2500	146	150	305	230	136	150	308	216
2750	155	150	305	230	146	150	308	216
3000	165	150	305	230	154	150	308	216
4000	204	185	345	260	191	185	354	248
5000	243	240	402	359	227	240	363	359
6000	282	240	402	359	264	240	363	359
7000	321	240	402	359	300	240	363	359
8760	389	240	402	359	364	240	363	359



Таблица 4.8 – Сечения кабелей АВБШв, ВВГ при нагрузке 200А

Тим,	Расчетные сечения проводников, мм <sup>2</sup>							
	час	АВБШв	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>	ВВГ	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>
500	70	70	178	167	50	50	225	145
750	80	70	178	167	57	50	225	145
1000	90	95	212	204	64	70	275	180
1250	100	95	212	204	72	70	275	180
1500	110	120	241	236	79	70	275	180
1750	120	120	241	236	86	95	330	220
2000	130	120	241	236	93	95	330	220
2250	140	150	274	273	100	95	330	220
2500	150	150	274	273	108	95	330	220
2750	160	150	274	273	115	120	385	260
3000	170	185	305	289	122	120	385	260
4000	210	185	305	289	151	150	435	305
5000	247	240	368	342	179	185	473	366
6000	290	240	368	342	208	185	473	366
7000	330	240	368	342	237	240	500	430
8760	401	240	368	342	288	240	500	430

Таблица 4.9 – Сечения проводов СИП, АС, А при нагрузке 200А

Тим,	Расчетные сечения проводников, мм <sup>2</sup>								
	час	СИП	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.возд</sub>	АС	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>	А	F <sub>ст.</sub>
500	80	70	290	50	50	210	62	70	265
1000	103	95	315	64	70	265	80	70	265
1500	127	120	340	79	70	265	98	95	320
2000	150	150	385	92	95	330	116	120	375
2500	173	185	495	106	95	330	131	120	375
3000	196	185	495	121	120	390	151	150	440
3500	219	240	495	135	120	390	168	150	440
4000	242	240	495	149	150	450	187	185	500
4500	265	240	495	163	150	450	205	185	500
5000	288	240	495	178	185	520	222	240	590
5500	311	240	495	192	185	520	240	240	590
6000	334	240	495	206	185	520	258	240	590
6500	357	240	515	220	240	520	276	240	590
7000	380	240	515	233	240	605	294	240	590
7500	403	240	515	249	240	605	312	240	590
8000	426	240	515	263	240	605	329	240	590
8760	462	240	515	284	240	605	357	240	590

Сечения кабелей и проводов, выбранных по экономической плотности тока и ближайшие стандартные при нагрузке 300А, приведены в таблицах 4.10–4.12. J,

Таблица 4.10 – Сечения кабелей АСБл, АВВГ при нагрузке 300А

Тим,	Расчетные сечения проводников, мм <sup>2</sup>							
	АСБл	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>	АВВГ	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>
500	102	95	240	165	95	95	234	156
750	116	120	272	200	109	120	271	184
1000	131	120	272	200	122	120	271	184
1250	145	150	305	230	137	150	308	216
1500	160	150	305	230	150	150	308	216
1750	175	185	345	260	164	185	354	248
2000	189	185	345	260	177	185	354	248
2250	204	185	345	260	192	185	354	248
2500	218	240	402	359	204	185	354	248
2750	233	240	402	359	219	240	363	359
3000	248	240	402	359	231	240	363	359
4000	306	240	402	359	286	240	363	359
5000	364	240	402	359	341	240	363	359
6000	423	240	402	359	395	240	363	359
7000	481	240	402	359	450	240	363	359
8760	560	240	402	359	546	240	363	359

Таблица 4.11 – Сечения кабелей АВБШв, ВВГ при нагрузке 300А

Тим,	Расчетные сечения проводников, мм <sup>2</sup>							
	АВБШв	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>	ВВГ	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.зем</sub>	I <sub>дл.доп.возд.</sub>
500	105	95	212	204	75	70	275	180
750	120	120	241	236	86	95	330	220
1000	135	120	241	236	97	95	330	220
1250	150	150	274	273	108	120	385	220
1500	165	150	274	273	118	120	385	220
1750	180	185	305	289	129	120	385	220
2000	195	185	305	289	140	150	435	305
2250	210	185	305	289	150	150	435	305
2500	225	240	368	342	161	150	435	305
2750	240	240	368	342	172	185	473	366
3000	255	240	368	342	183	185	473	366
4000	315	240	368	342	226	240	500	430
5000	370	240	368	342	269	240	500	430
6000	435	240	368	342	312	240	500	430
7000	495	240	368	342	355	240	500	430
8760	601	240	368	342	432	240	500	430

Таблица 4.12 – Сечения проводов СИП, АС, А при нагрузке 300А по экономической плотности тока

Тим, час	Расчетные сечения проводников, мм <sup>2</sup>								
	СИП	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.возд</sub>	АС	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.возд</sub>	А	F <sub>ст.</sub>	I <sub>дл.доп.возд</sub>
500	120	120	340	74	70	265	93	95	320
1000	155	150	385	96	95	330	120	120	375
1500	190	185	495	118	120	390	147	150	440
2000	224	240	515	138	150	450	173	185	500
2500	259	240	515	160	150	450	197	185	500
3000	294	240	515	181	185	520	227	240	590
3500	328	240	515	202	185	520	253	240	590
4000	363	240	515	224	240	605	280	240	590
4500	397	240	515	245	240	605	307	240	590
5000	432	240	515	266	240	605	334	240	590
5500	467	240	515	288	240	605	361	240	590
6000	502	240	515	309	240	605	387	240	590
6500	536	240	515	330	240	605	414	240	590
7000	570	240	515	350	240	605	441	240	590
7500	605	240	515	373	240	605	467	240	590
8000	640	240	515	394	240	605	494	240	590
8760	462	240	515	284	240	605	357	240	590

По полученным результатам получим зависимость  $I_{N(F_3)}$  от числа часов использования максимума нагрузки в год, результаты при нагрузке 50А отображены на рисунках 4.1–4.2.

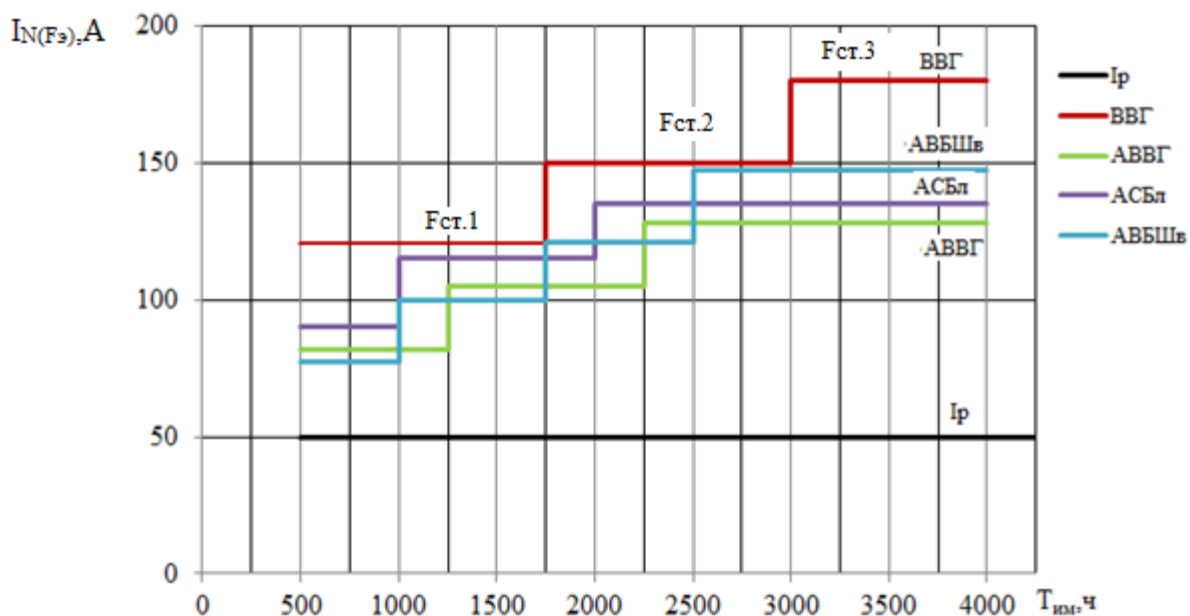


Рисунок 4.1 – Длительно-допустимые токи стандартных сечений кабелей, выбранных по  $J_{эк.}=f(T_{им})$ , при  $I_p=50A$

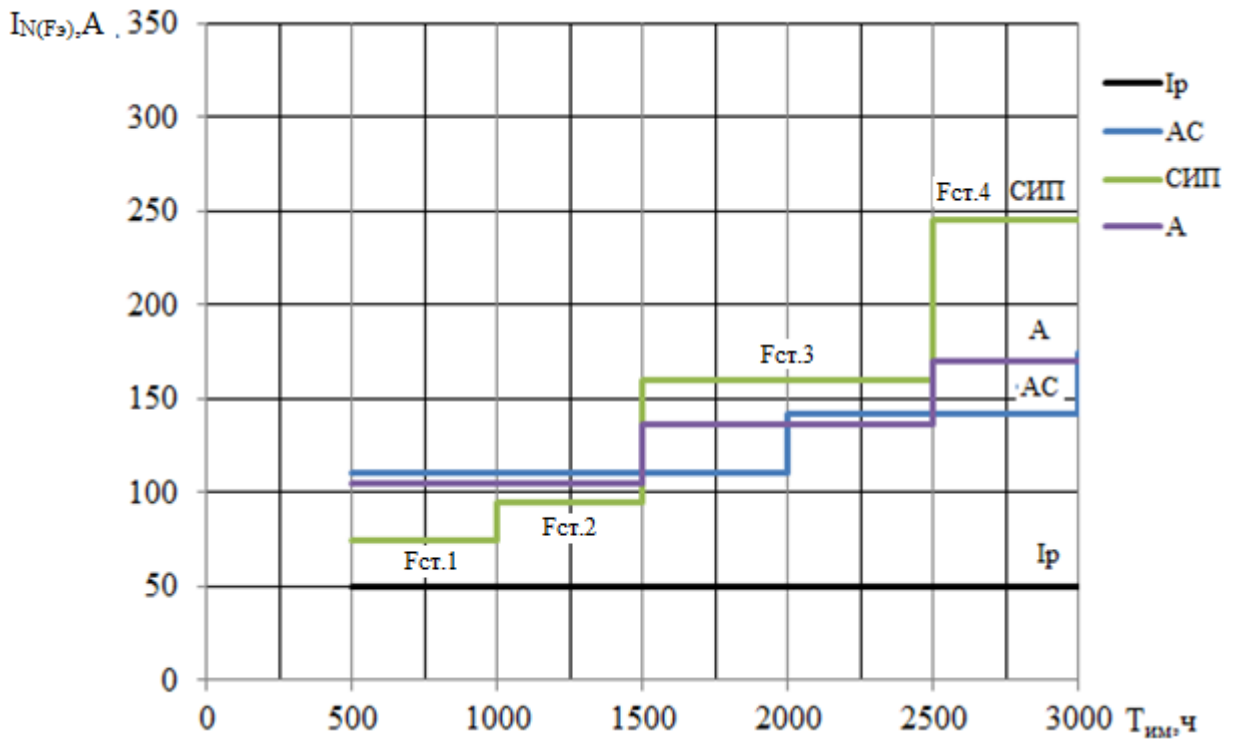


Рисунок 4.2 – Длительно-допустимые токи стандартных сечений проводов, выбранных по  $J_{эк.}=f(T_{им})$ , при  $I_p=50A$

При нагрузке в сети 100А построили зависимости  $I_{N(F_3)}=f(T_{им})$ , приведены на рисунках 4.3–4.4.

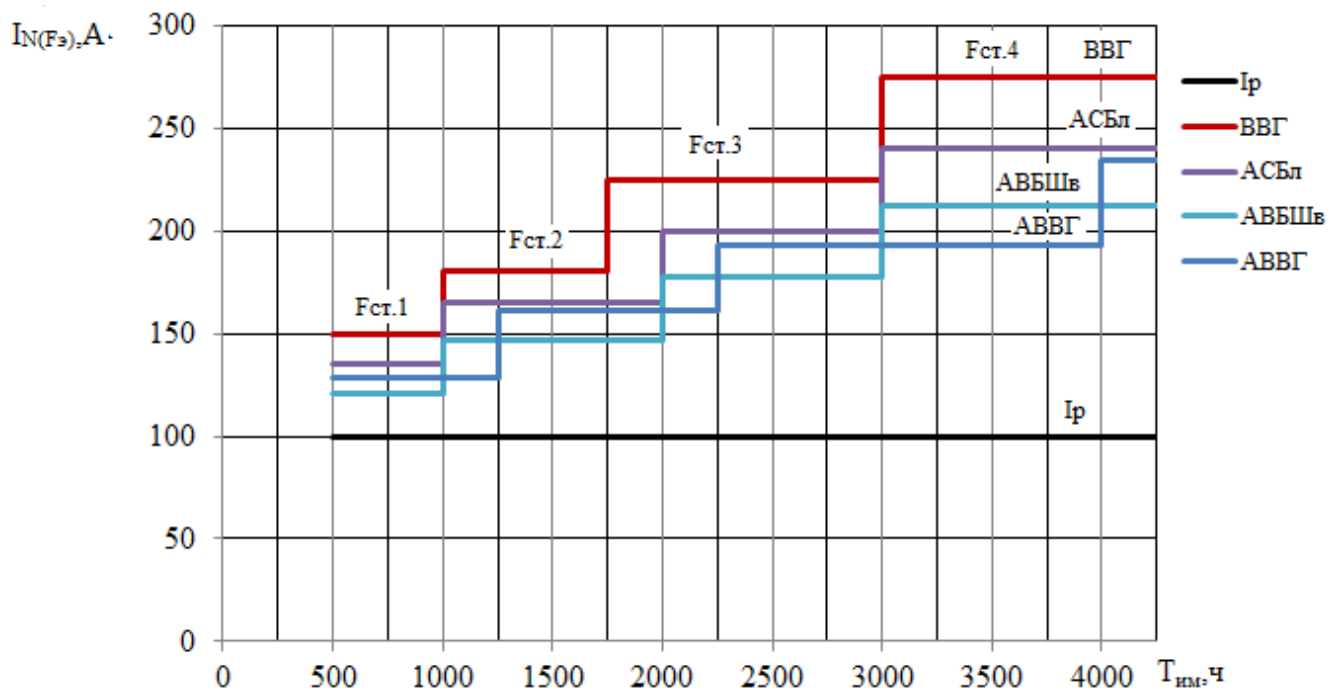


Рисунок 4.3 – Длительно-допустимые токи стандартных сечений кабелей, выбранных по  $J_{эк.}=f(T_{им})$ , при  $I_p=100A$

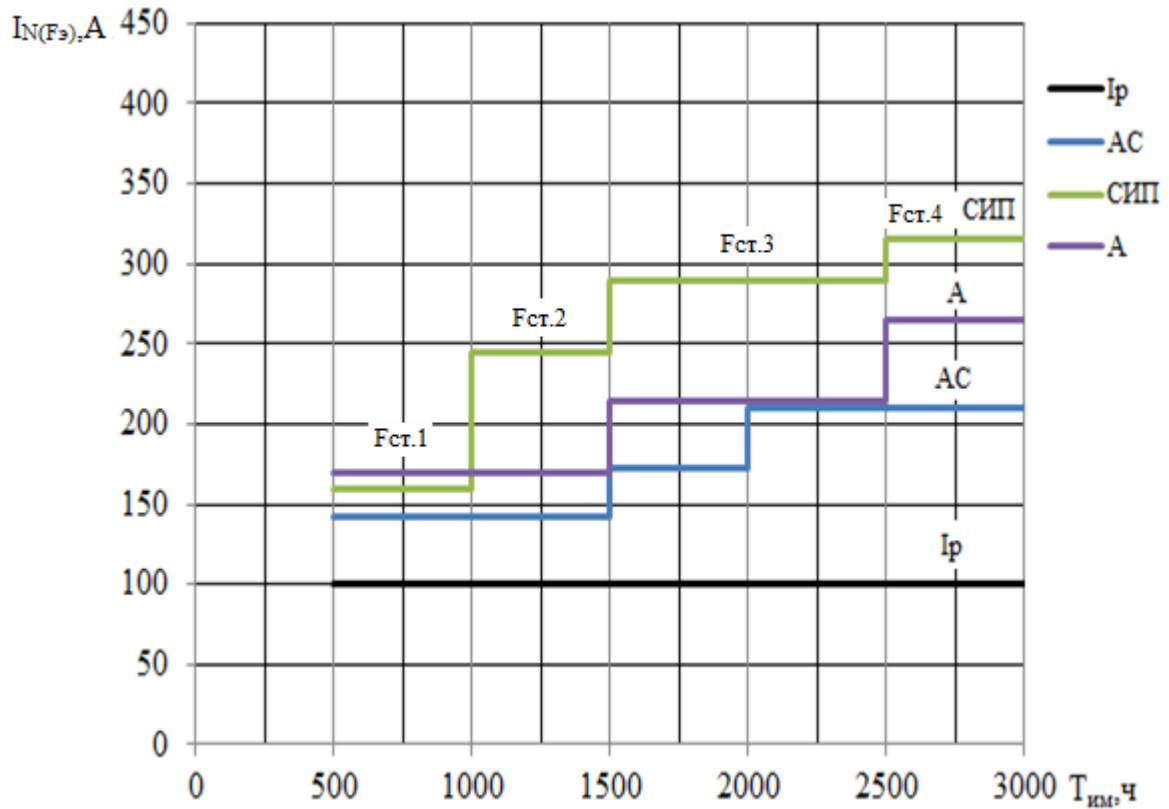


Рисунок 4.4 – Длительно-допустимые токи стандартных сечений проводов, выбранных по  $J_{эк.}=f(T_{им})$ , при  $I_p=100A$

При нагрузке в сети 200А зависимости  $I_{N(F_3)} = f(T_{им})$ , приведены на рисунках 4.5–4.7.

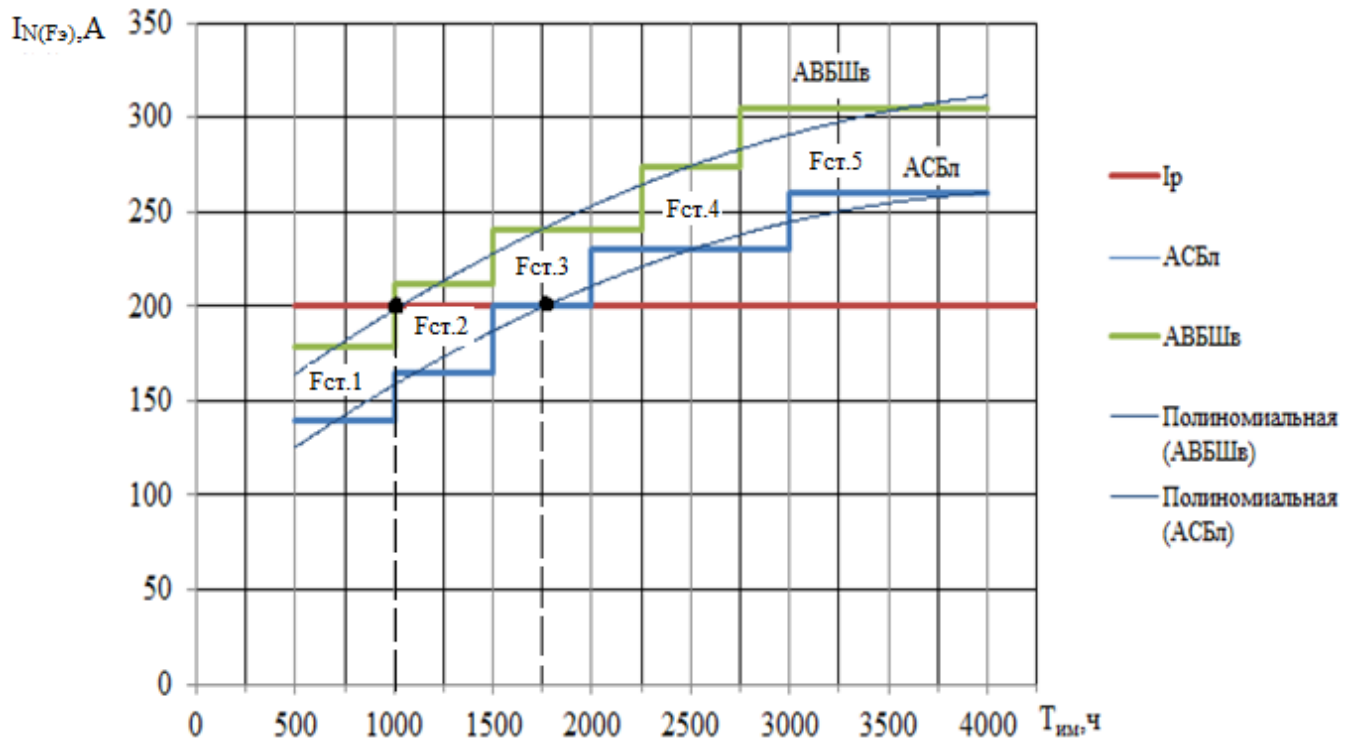


Рисунок 4.5 – Длительно-допустимые токи стандартных сечений кабелей, выбранных по  $J_{эк.}=f(T_{им})$ , при  $I_p=200A$

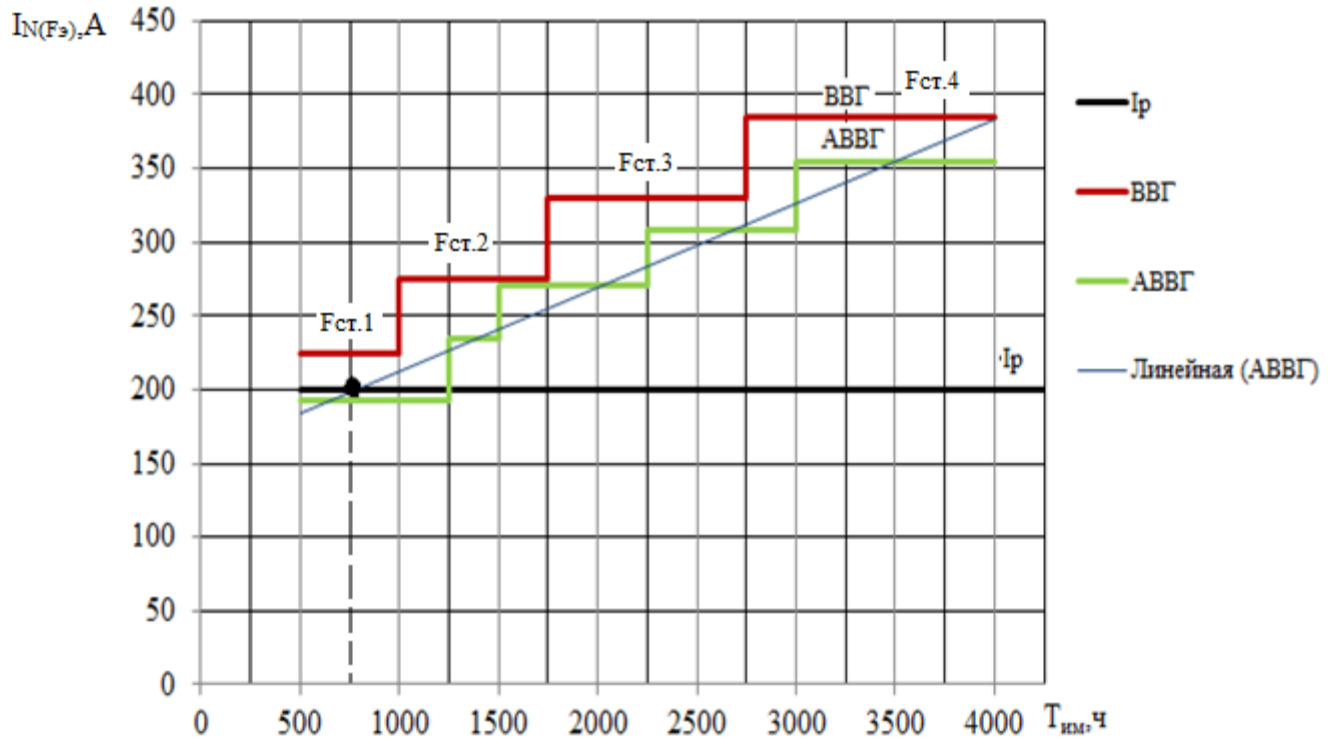


Рисунок 4.6 – Длительно-допустимые токи стандартных сечений кабелей, выбранных по  $J_{эк.}=f(T_{им})$ , при  $I_p=200A$

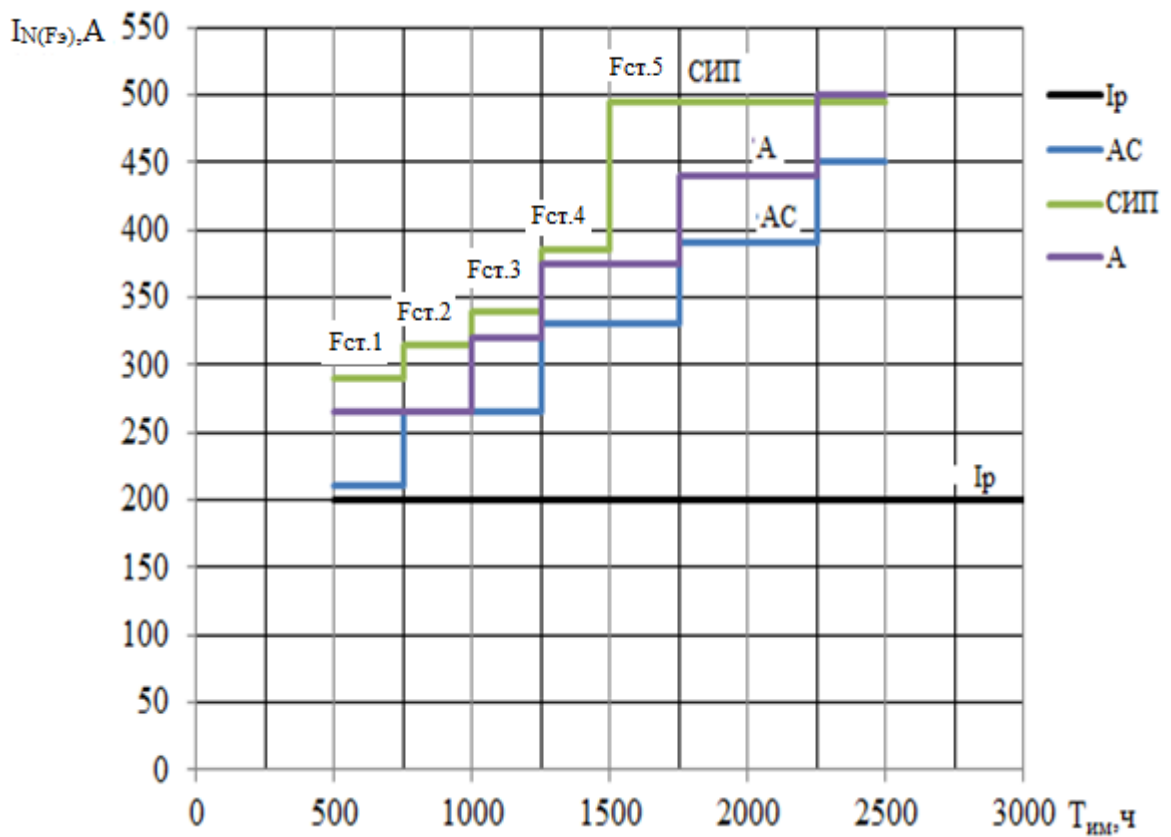


Рисунок 4.7 – Длительно-допустимые токи стандартных сечений проводов, выбранных по  $J_{эк.}=f(T_{им})$ , при  $I_p=200A$

При нагрузке в сети 300А зависимости  $I_{N(F_3)} = f(T_{им})$ , приведены на рисунках 4.7–4.10.

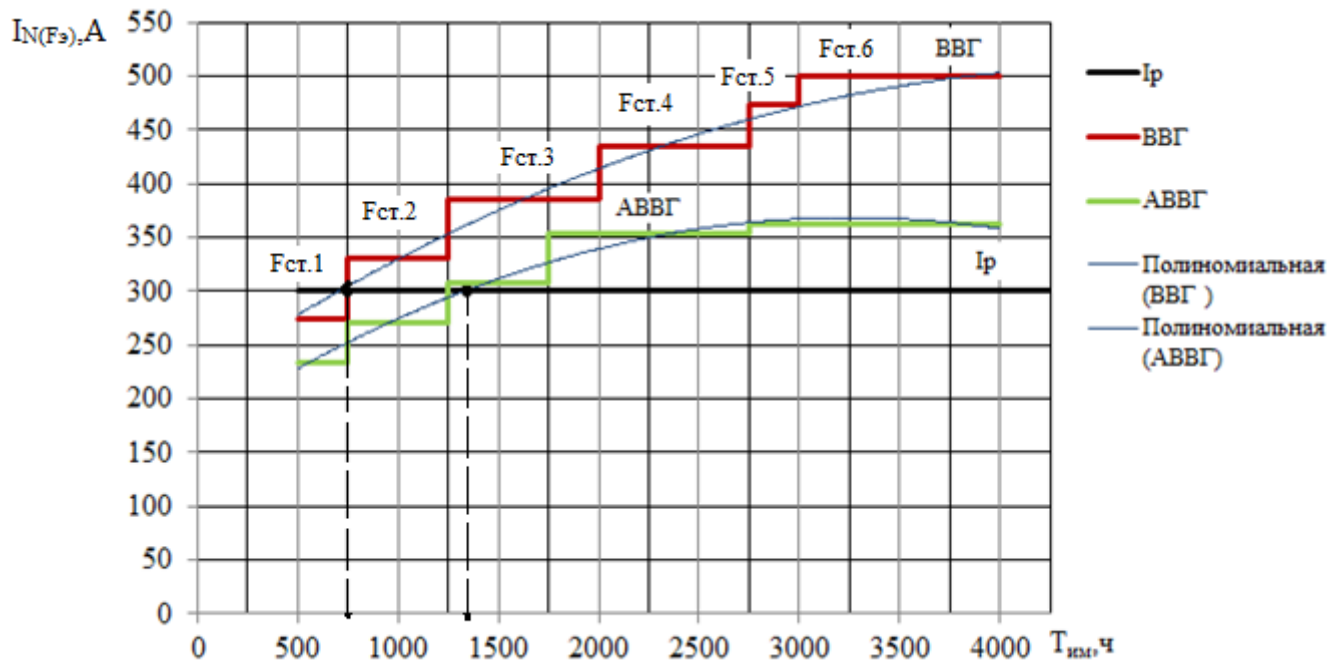


Рисунок 4.8 – Длительно-допустимые токи стандартных сечений кабелей, выбранных по  $J_{эк.} = f(T_{им})$ , при  $I_p = 300A$

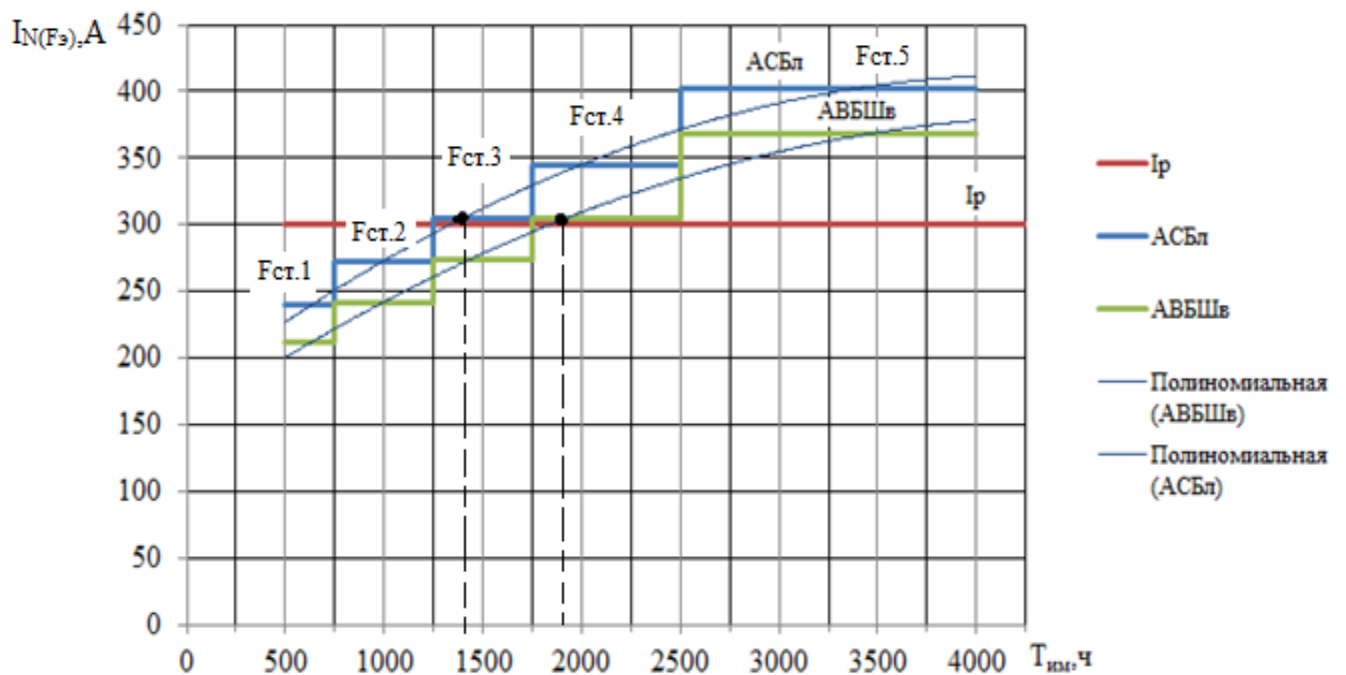


Рисунок 4.9 – Длительно-допустимые токи стандартных сечений кабелей, выбранных по  $J_{эк.} = f(T_{им})$ , при  $I_p = 300A$

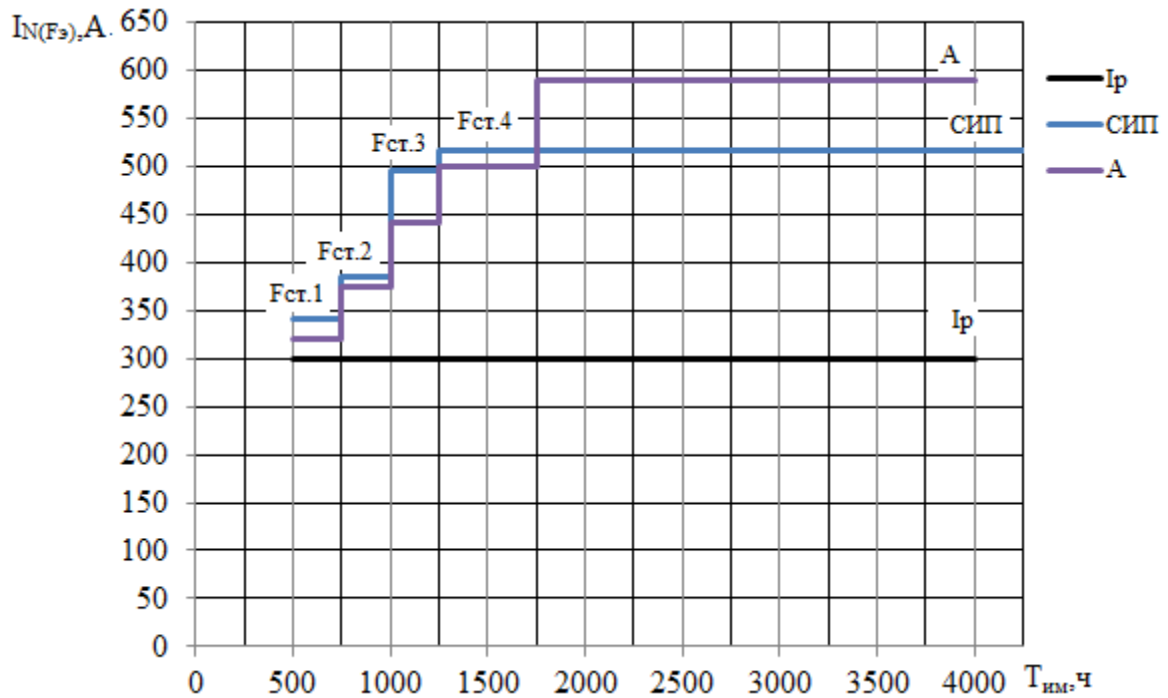


Рисунок 4.10 – Длительно-допустимые токи стандартных сечений проводов, выбранных по  $J_{эк.}=f(T_{им})$ , при  $I_p=300A$

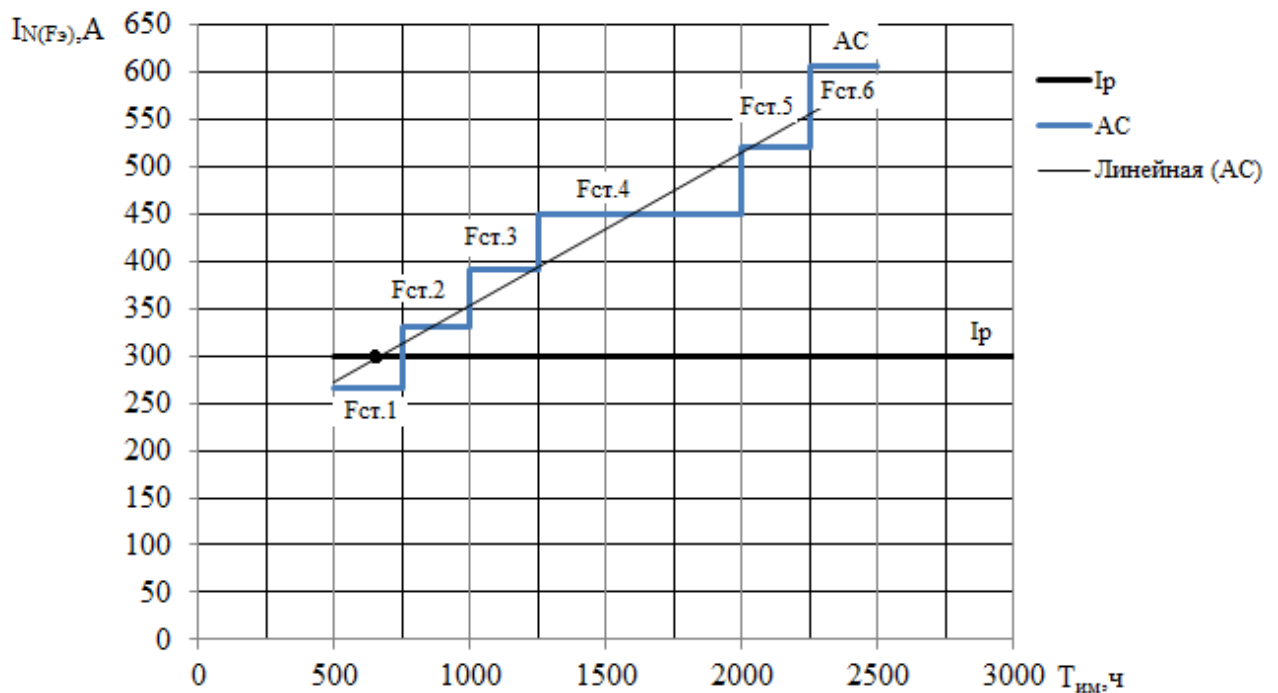


Рисунок 4.11 – Длительно-допустимые токи стандартных сечений провода марки АС, выбранного по  $J_{эк.}=f(T_{им})$ , при  $I_p=300A$

Найдем интервал времени  $T_{им}$  для выбора сечения проводника по экономической плотности тока, с учетом разных тарифов на электроэнергию в регионах России, а так же разной стоимости провода марки АС.



Укрупненные стоимости провода марки АС примем согласно таблице 3.9. При нагрузке в сети 300А зависимости  $I_{N(F_3)} = f(T_{им})$ , приведены на рисунках 4.11–4.12.

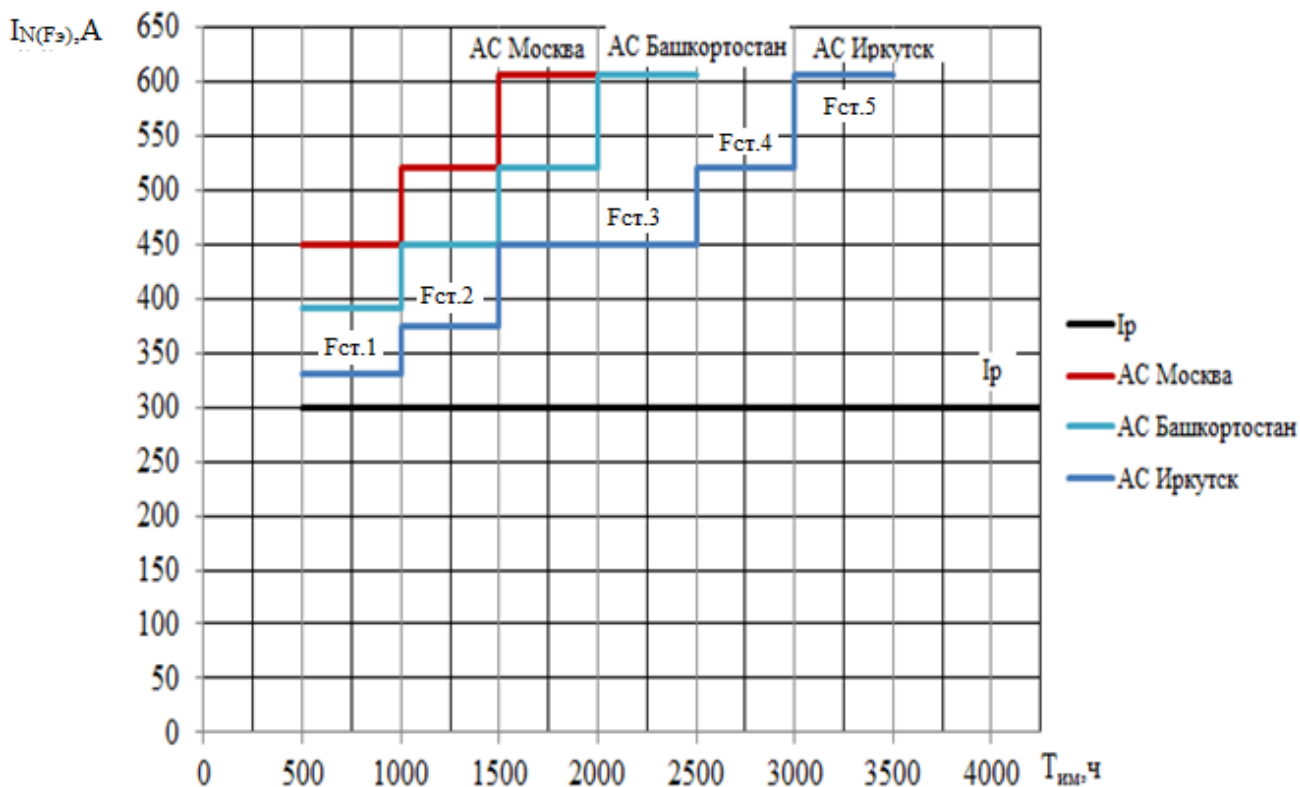


Рисунок 4.12 – Длительно-допустимые токи стандартных сечений проводов и кабелей, выбранных по  $J_{эк.} = f(T_{им})$ , при  $I_p = 300A$

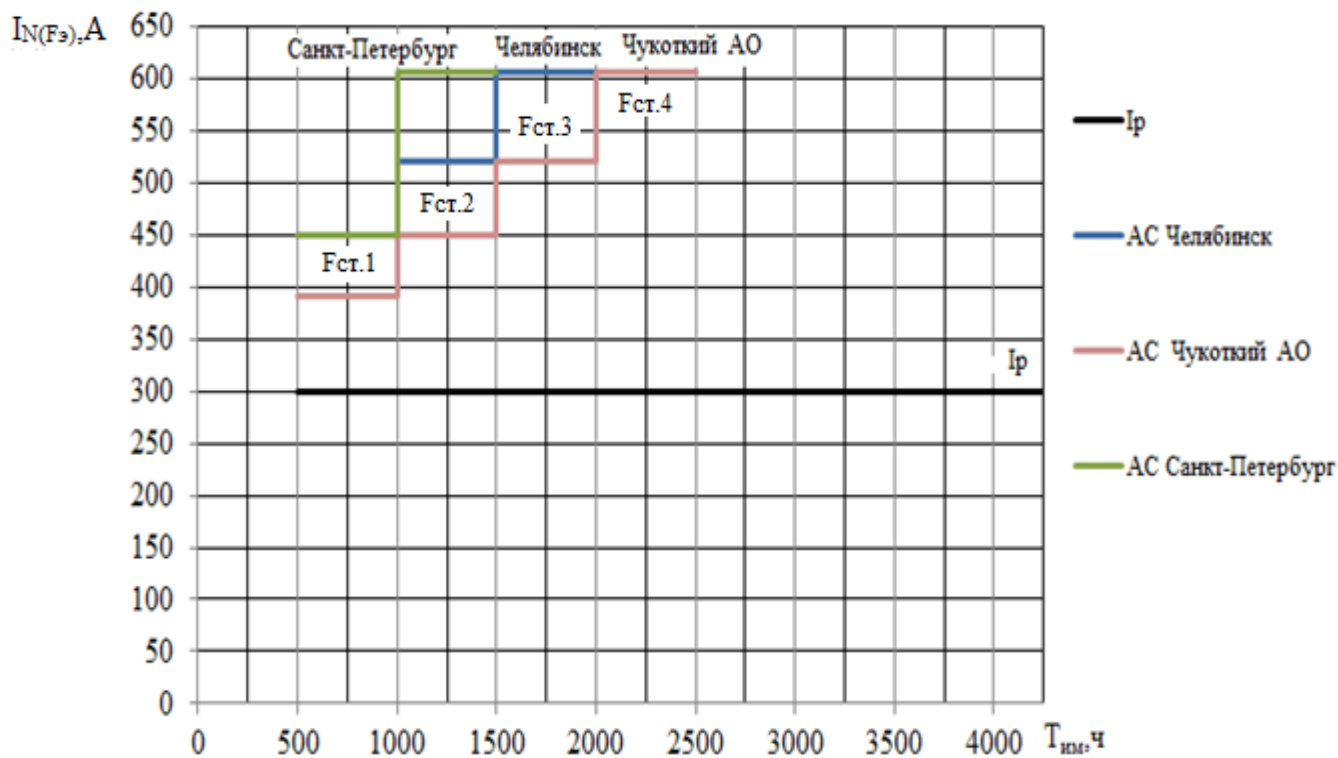


Рисунок 4.13 – Длительно-допустимые токи стандартных сечений проводов и кабелей, выбранных по  $J_{эк.} = f(T_{им})$ , при  $I_p = 300A$

#### Выводы по разделу 4

1 При анализе графиков можно утверждать, что при относительно малых значениях тока до 100–150А целесообразно выбирать все проводники по экономической плотности тока.

2 Сделав анализ графиков можно сделать вывод, что при малых значениях  $T_{им}$  выбор сечений по экономической плотности не удовлетворяет условию по длительно допустимому току.

3 Значение экономической плотности, соответственно и сечение проводников выбранных по экономической плотности отличаются в разных регионах России, так как большой диапазон изменения тарифов на электроэнергию [12].

4 После проведения исследования можно сделать вывод провода для воздушных линий при значениях тока 250–350А в регионах России целесообразно выбирать экономической плотности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в России возводятся загородные поселки, коттеджные товарищества. Ведутся работы по реконструкции линий электропередачи, т.к. существующие в большинстве городов, а так же в сельской местности кабельные и воздушные линии электропередач напряжением 0,4 кВ не справляются с постоянно возрастающей нагрузкой и во многих случаях имеют 100 % физический износ.

В сложившейся ситуации экономичность электрической сети зависит от затрат на сооружение и эксплуатацию проектируемой линии электроснабжения.

Трудность определения многих технических и экономических показателей, влияющих на экономически обоснованное значение сечения проводников, постоянное изменение стоимости кабельно-проводниковой продукции и строительства линий электропередачи, цены на электроэнергию не позволяют установить фиксированные значения экономической плотности тока так, чтобы они были актуальными в течение длительного периода. В связи с этим выполненные расчеты периодически должны обновляться в соответствии с изменением исходных данных.

Современные тенденции к увеличению стоимости электроэнергии, а так же затрат на сооружения линий электропередач, еще больше снижает значение экономической плотности тока, обосновывая тем самым применение больших сечений для экономически целесообразного использования электроэнергии. Учет указанных факторов при выборе проводников повышает обоснованность принятых решений.

Цена на электрическую энергию оказывает влияние на значения экономической плотности тока. В тоже время, цены на электроэнергию по всей территории Российской Федерации разные, и как следствие этого, значения экономической плотности тока должны быть про дифференцированы по субъектам Российской Федерации.

Полученные новые значения экономической плотности тока так же оказывают влияние на диапазон интервала времени  $T_{им}$  при котором необходимо выбирать проводники по экономической плотности тока. Интервалы времени  $T_{им}$  полученные в нашей работе, соответствующие выбору проводников по экономической плотности тока отличаются от приведенных в ПУЭ, в меньшую сторону.

Это говорит о том, что предлагаемая математическая модель является приемлемой для определения экономической плотности тока и на ее основе определения интервала времени  $T_{им}$ , в современных экономических условиях.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила устройства электроустановок: утв. Приказом Минэнерго России от 20 июня 2003 г. № 242 / М-во энергетики Российской Федерации. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
2. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года.– [http://www.energystrategy.ru/ab\\_ins/source/ES-2035\\_09\\_2015.pdf](http://www.energystrategy.ru/ab_ins/source/ES-2035_09_2015.pdf)
3. Макурова, Ю.А. Многокритериальная методика выбора кабелей для систем электроснабжения нефтяной и газовой промышленности: дис...канд.техн.наук: / Ю.А. Макурова.–Москва: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2015.–167 с.
4. Суворова, И.А. Выбор сечений проводников и рациональных напряжений распределительных электрических сетей в современных условиях.: дис...канд. тех. наук. / И.А. Суворова. – М., 2015. – 168 с.
5. Хужина, З. Б. Определение величин экономических плотностей тока в условиях современного рынка на электротехническое оборудование/ З. Б. Хужина, А.В. Варганова// Электротехнические системы и комплексы. 2017 №3(36).– [http://www.doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-23-28/](http://www.doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-23-28/).– С.23-28.
6. Вестник ценообразования и сметного нормирования. Выпуск 10 Октябрь 2015 г. Москва. «Стройформиздат».2015г.- 72 с.
7. Минэконом развития 9 апреля 2018 г. «Прогноз долгосрочного экономико-социального развития РФ до 2030 года»,2015г. – 222с.
8. Сборник укрупненных показателей стоимости строительства (реконструкции) подстанций и линий электропередачи для нужд ОАО «Холдинг МРСК» Москва, 2012 - 71 стр.
9. Номенклатурный каталог: каталог продукции. – Пермь: ООО Камкабель, 2017. – 62 с.
10. Тарифы на электроэнергию в разных регионах России.– <https://energybase.ru/tariff/electricity/2019>
11. Нуждин, А.В. К вопросу расчета экономической плотности тока с учетом времени наибольших нагрузок, срока эксплуатации и изменения стоимости электроэнергии в зависимости от региона расположения электрических сетей / А.В. Нуждин, Ю.Н. Кондрашова, А.Ю. Турищев // Технические науки от теории к практике: материалы 12-й международной научной конференции. Секции технических наук.– Новосибирск: Издательский центр СибАК, 2016. – С. 188-196.
12. О функционировании розничных рынков электроэнергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии: Постановление правительства Российской Федерации № 442 принято 04.05.2012.– [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_130498/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_130498/)