

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Энергосбережение и энергоэффективность

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Разработка технических решений по повышению эффективности эксплуатации электрооборудования при реконструкции системы электроснабжения АО ЖБК «Тольяттинское»

Обучающийся

И.В. Малозёмов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, В.С. Романов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

Содержание

Введение.....	3
1 Анализ состояния существующего завода ЖБК.....	7
1.1 Анализ нормативно-правовой базы	7
1.2 Характеристика объекта исследования.....	8
1.3 Анализ потребления завода ЖБК.....	14
2 Повышение энергетической эффективности на промышленных предприятиях	24
2.1 Повышение энергетической эффективности металлургических предприятий.....	24
2.2 Повышение энергоэффективности машиностроительных предприятий	32
2.3 Способы повышения энергетической эффективности коммунальных предприятий.....	40
3 Технико-экономический расчет.....	47
3.1 Расчет энергоэффективности внедрения электродвигателей.....	47
3.2 Технико-экономический расчет мероприятий по компенсации реактивной мощности.....	60
Заключение	65
Список используемых источников.....	67

Введение

Рост уровня энергетической эффективности крупных объектов промышленности является одним из наиболее приоритетных направлений нашей страны.

«По оценкам аналитиков, объем электричества, который в России расходуется напрасно, равен годовому энергопотреблению Франции. Вместе с тем на фоне активного развития российской промышленности прослеживается тенденция появления дефицита топливно-энергетических ресурсов» [24].

Все вышесказанное создало предпосылки для утверждения Правительством Российской Федерации распоряжением от 09.06.2020 № 1523-р Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года.

Анализируя данную стратегию, энергоемкость экономики РФ снижается. Но несмотря на это, в РФ имеется значительный потенциал энергосбережения:

«В Российской Федерации имеется потенциал энергосбережения, достигающий третьей части текущего энергопотребления, и существуют возможности значительного повышения экономической эффективности проектов в сфере энергетики. Уровни энергоемкости производства важнейших отечественных промышленных продуктов выше (хуже) среднемировых в 1,2 - 2 раза, а по отношению к лучшим мировым практикам - в 1,5 - 4 раза.

По сравнению с 2008 годом достигнуто снижение энергоемкости в отраслях топливно-энергетического комплекса - коэффициент полезного использования попутного нефтяного газа увеличился на 9,2 процентных пункта и достиг 85,1 процента, удельный расход топлива на отпуск электрической энергии на тепловых электростанциях снизился на 7,8 процента и составил 309,8 г у.т./кВт·ч, потери электрической энергии в электрических сетях снизились с 13 процентов до 10,6 процента» [13].

Для промышленных предприятий это является особенно актуальным поскольку, в случае повышения энергетической эффективности, стоимость конечной продукции снижается.

«Мероприятия, направленные на повышение энергоэффективности производственной компании, в первую очередь необходимо рассматривать с точки зрения экономического роста. Помимо этого, следует учитывать экологичность производства и возможность улучшения социально-бытовой обстановки. Главное, это не должна быть бесцельная экономия, которая к тому же наносит ущерб производству» [24].

Рассмотрим такую область промышленности как производство ЖБК. Данные конструкции нашли свое широкое применение в строительстве различного рода зданий и сооружений.

«Бетон и железобетон уже несколько десятилетий являются и остаются в обозримой перспективе основными конструкционными строительными материалами для промышленного, жилищного, гражданского и сельского строительства. Наряду с традиционными проблемами в отрасли, связанными с совершенствованием структуры и физико-механических свойств бетона, снижением материалоемкости конструкций и повышением их качества, в последние годы одной из определяющих задач в технологии бетона становится задача разработки путей резкого снижения энергоемкости бетонных и железобетонных изделий, конструкций и сооружений» [19].

Актуальность исследования обусловлена тем, что производство железобетонных конструкций (ЖБК) требует значительных производственных мощностей. Поэтому очень важно использовать энергетические ресурсы оптимально, применяя наиболее современные и актуальные энергосберегающие решения и технологии.

В соответствии с этим сформулирована следующая тема магистерской диссертации: «Разработка технических решений по повышению эффективности эксплуатации электрооборудования при реконструкции системы электроснабжения АО ЖБК Тольяттинское».

Объектом исследования является АО ЖБК Тольяттинское. В ходе исследования будут проанализированы мероприятия, которые позволят повысить энергетическую эффективность рассматриваемого объекта.

Целью магистерской диссертации является повышение энергетической эффективности электрооборудования АО ЖБК Тольяттинское.

«Требования энергетической эффективности зданий, строений, сооружений должны включать в себя:

- показатели, характеризующие удельную величину расхода энергетических ресурсов в здании, строении, сооружении;
- требования к влияющим на энергетическую эффективность зданий, строений, сооружений архитектурным, функционально-технологическим, конструктивным и инженерно-техническим решениям;
- требования к отдельным элементам, конструкциям зданий, строений, сооружений и к их свойствам, к используемым в зданиях, строениях, сооружениях устройствам и технологиям, а также требования к включаемым в проектную документацию и применяемым при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте зданий, строений, сооружений технологиям и материалам, позволяющие исключить нерациональный расход энергетических ресурсов как в процессе строительства, реконструкции, капитального ремонта зданий, строений, сооружений, так и в процессе их эксплуатации» [23].

Помимо вышеперечисленных проблем, необходимо, чтобы инженерно-технический персонал имел соответствующую мотивацию по внедрению данных проектов, а также умел быстро адаптироваться к изменениям в законодательстве и нормативно-технической документации.

Поэтому для достижения энергетической эффективности любого объекта необходимо проведение организационных, технологических, а также экономических мероприятий.

В соответствии с этим сформулируем следующие задачи для достижения поставленной цели:

- анализ состояния существующего завода ЖБК;
- анализ существующих решений по повышению энергетической эффективности;
- технико-экономическое обоснование предлагаемых решений.

Научная новизна диссертации заключается том, что существующие технологии и мероприятия, используемые на объектах промышленности различного назначения и направления применены для повышения энергетической эффективности объекта исследования.

В качестве теоретической и методологической основы исследования будут использованы фундаментальные и прикладные исследования ученых, нормативно-техническая документация. В процессе исследования будет использован метод системного подхода (теоретический) и экспериментальный метод (практический).

1 Анализ состояния существующего завода ЖБК

1.1 Анализ нормативно-правовой базы

Использование различного рода законодательной и нормативно-правовой базы в жизнедеятельности промышленного сектора, необходима для повышения энергоэффективности любой отрасли промышленности. Схема нормативно-правовой базы приведена на рисунке 1 [20].



Рисунок 1 – Схема нормативно-правовой базы по энергосбережению и повышению энергетической эффективности

При внедрении мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности необходимо сохранять безопасность технологических процессов, экологичность, качество производимых материалов и изделий.

Для промышленных предприятий, энергосбережение помогает повысить эффективность деятельности предприятия благодаря следующим факторам:

- снижение энергозатрат, что приводит к снижению себестоимости производства и как следствие приводит к повышению конкурентоспособности;
- модернизация оборудования, поскольку более современное оборудование способно себя окупить более низким энергопотреблением;
- улучшение экологической обстановки в районах расположения промышленных предприятий.

1.2 Характеристика объекта исследования

Завод ЖБК расположен по адресу: Самарская обл., г.о. Тольятти, ул. Новозаводская бк (рисунок 2).

«В 1964 г. Ставропольским заводом железобетонных изделий «Облколхозстроя», а в последствии Тольяттинским сельским строительным комбинатом, был освоен выпуск товарного бетона ежемесячной мощностью 9 тыс.м³. В сентябре 1997 г предприятие было переименовано в Закрытое акционерное общество по производству железобетонных конструкций «Тольяттинское», которое по настоящее время изготавливает, реализует и укомплектовывает железобетонными изделиями строительные площадки города и региона.

Ассортимент продукции очень широк — это плиты перекрытий, фундаменты, ригеля, колонны, перемычки, сваи, кольца, шпунты, лотки, бордюры, заборы, и многое другое. Также ведется выпуск товарного бетона, в том числе и гидротехнического бетона для нужд связанных с ведением работ по берегоукреплению и гидросооружениям. Качество нашей продукции является визитной карточкой нашего завода. Вся наша продукция проходит проверку персоналом ОТК и соответствует действующим ГОСТам и ТУ» [8].

Также рассматриваемое предприятие оказывает услуги:

- металлообработка;

- ремонт (перемотка) промышленных асинхронных электродвигателей;
- доставка и погрузка продукции.

Генеральный план предприятия представлен на рисунке 3.

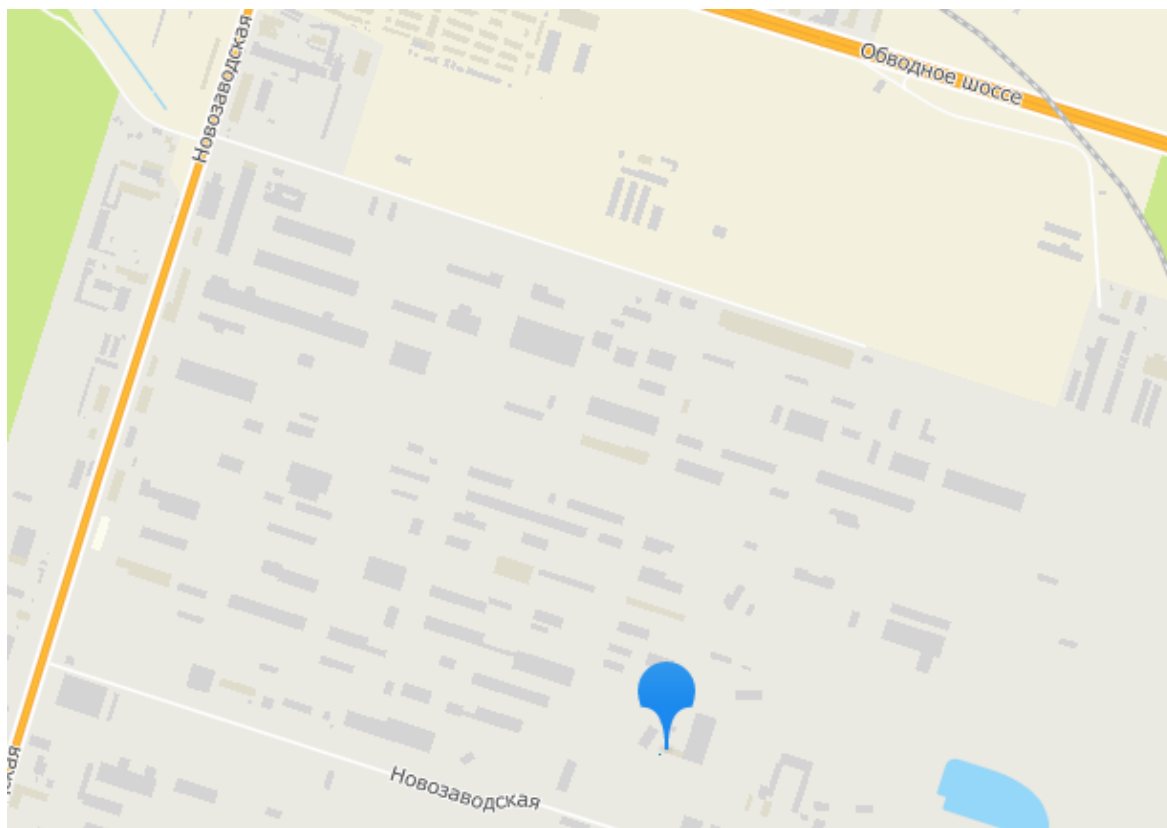


Рисунок 2 – Местоположение АО ЖБК Тольяттинское

Завод ЖБК включает в себя административные, вспомогательные, производственные здания и сооружения. Состоит завод ЖБК из четырех производственных площадок, вблизи которых располагаются склады с сырьем для производства ЖБК. На производственных площадках расположены транспортные механизмы для перемещения различного рода сырья и продукции, а также производственные цеха для изготовления этой продукции.

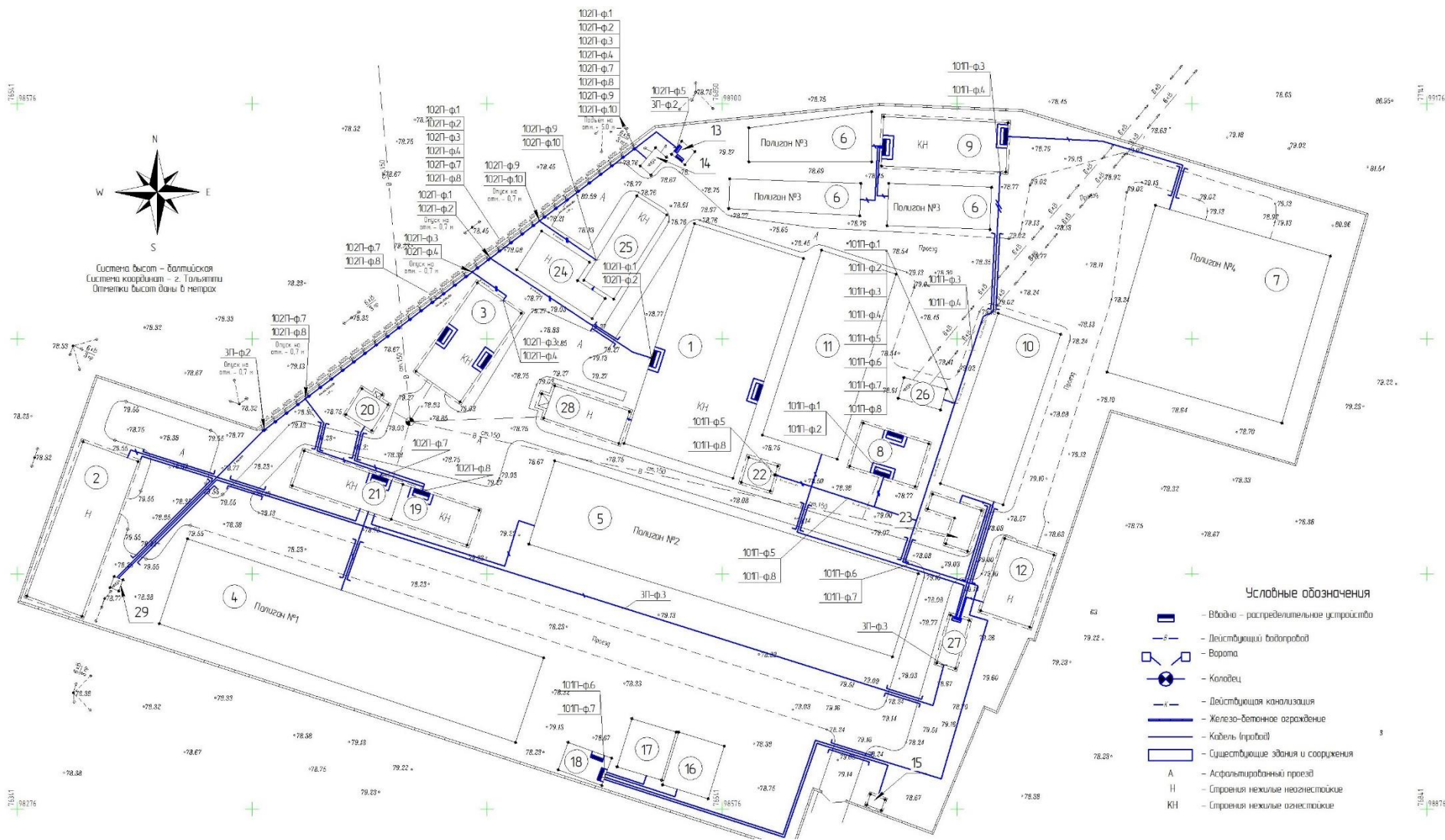


Рисунок 3 – Генеральный план ЖБК «Тольяттинское»

К производственным цехам завода ЖБК относятся: ремонтно-механический цех (РМЦ), электротехнический цех (ЭТЦ), компрессорный цех (КЦ), арматурный цех (АЦ), бетонно-смесительный цех (БСЦ).

РМЦ предназначен для:

- производства запчастей, материалов, заготовок, а также для изготовления закладных деталей;
- хранения ремфонда;
- ремонтно-восстановительных работ;
- очистка деталей и агрегатов;
- сборки агрегатов и узлов, снабжения запчастями;
- хранение и транспортировка восстановленных изделий.

ЭТЦ осуществляет эксплуатацию, ремонт и техническое обслуживание электроустановок цехов завода ЖБК. Персонал ЭТЦ проводит ремонтные работы осветительных установок, кабельно-проводниковых элементов распределительной сети, приводов станков и агрегатов (токарные, фрезерные, сверлильные и другие), сварочных аппаратов. Также персонал ЭТЦ проводит осмотр и профилактику работы приводов станков и компрессоров.

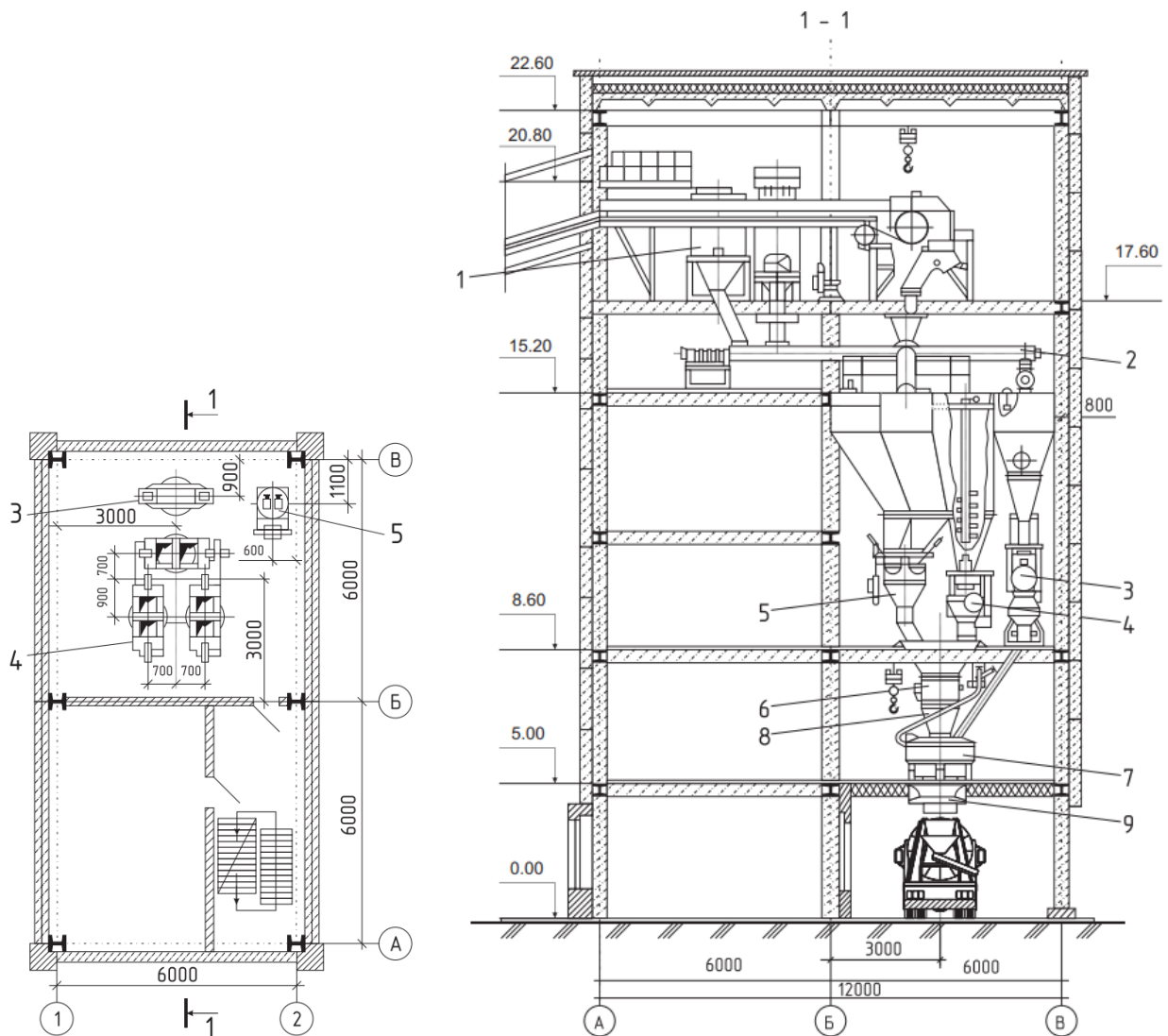
КЦ включает в себя множество компрессорных установок, которые осуществляют сжатие воздуха. Сжатый воздух требуется для выполнения следующих технологических операций:

- перемещение цемента из силосов в бункера и из транспортных средств в силосы;
- перемешивание цемента;
- работа пневмооборудования;
- обеспыливания.

Пыль в цехе БСЦ возникает в следствие пересыпки материалов. Обеспыливание помещений, где находится персонал, производят вытягиванием воздуха вентиляцией, оборудованной аппаратами очистки и фильтрации. Вытяжные вентиляторы работают с использованием трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Для того, чтобы

пыльный воздух не выходил из бункера, создается разрежение с помощью аспирационных вентиляторов [17].

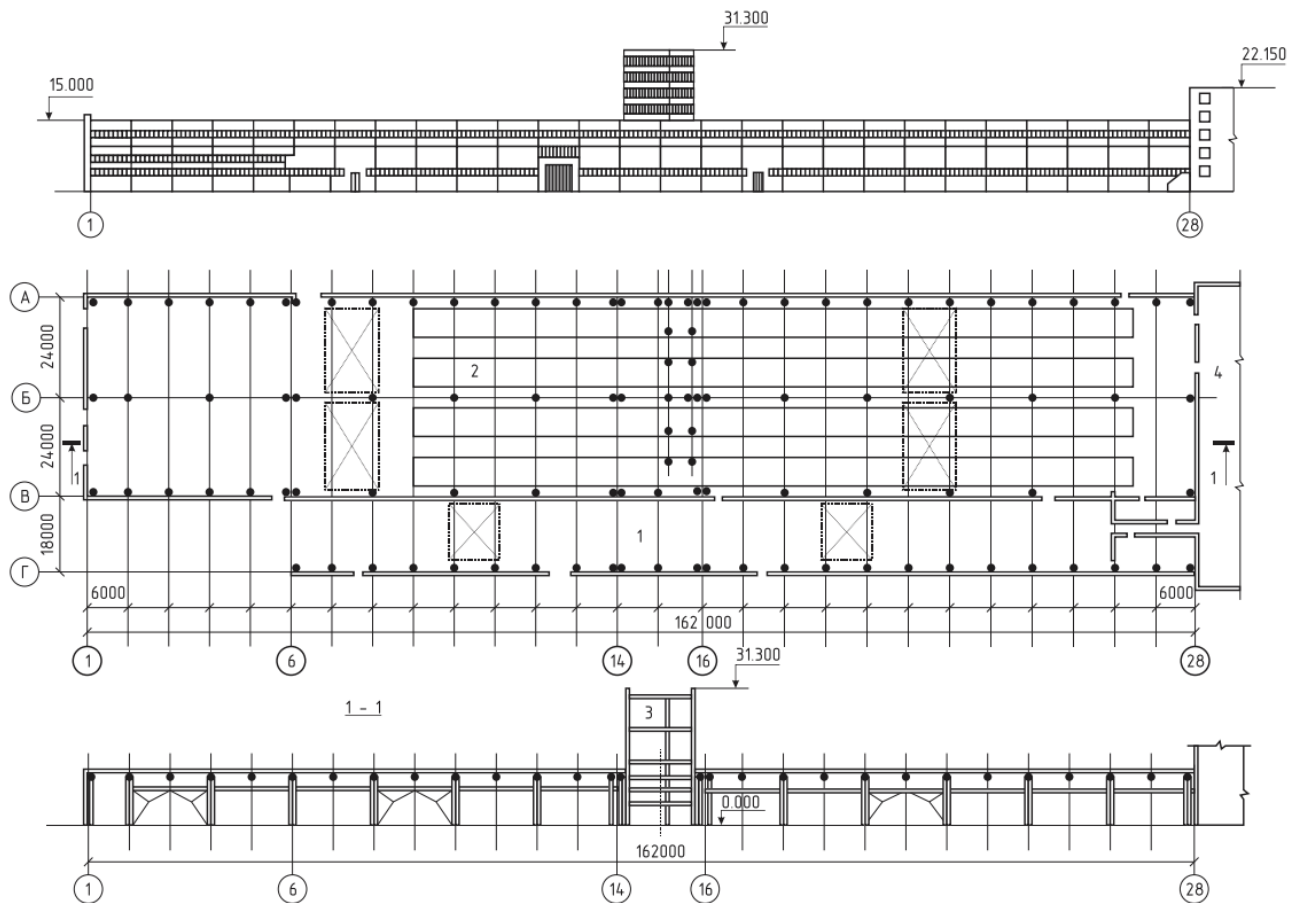
БСЦ осуществляет смешивание исходного сырья для изготовления бетона. В данном цехе используются смесительные установки, транспортировочные механизмы (рисунок 4).



1 — циклон; 2 — конвейер винтовой; 3 — дозатор весовой для цемента; 4 — дозатор весовой для инертных материалов; 5 — дозатор весовой для жидкости; 6 — воронка сборная; 7 — бетоносмеситель; 8 — сток в бетоносмеситель; 9 — воронка выдачи бетона

Рисунок 4 – План и разрез БСЦ

Главный корпус представлен на рисунке 5.



1 – АЦ; 2 – формовочный цех; 3 – БСЦ; 4 – Помещения бытового назначения

Рисунок 5 – Главный корпус завода железобетонных изделий

В АЦ проводится сварка арматуры и металлоконструкций, которая в дальнейшем используется в ЖБК. Сырье поставляется с помощью ЖД путей, а по территории завода с помощью транспортировочные механизмов.

В АЦ участок обработки выполняет следующие действия:

- перемещение готовой продукции с помощью грузоподъемных механизмов (ГПМ) на специальную площадку;
- размотка и корректировка арматуры с помощью станков;
- сварка арматуры контактной сваркой полуавтоматом для плоских каркасов, а для объемных – сварочными клещами на вертикальных стендах.

– производство сложно согнутых изделий на профильно-гибочном станке.

Что касается складских помещений, то помимо хранения материалов, они выполняют множество других функций.

Склад сырьевых материалов выдает материал круглогодично при любых условиях. На данном складе имеется механизированная приемка, поскольку данный склад привязан к рельсовым коммуникациям.

Склад цемента предусматривает хранение изготовленного продукта по маркам. Чаще всего используются силосные склады. Силосы размещаются вблизи БСЦ для быстрого и эффективного перемещения цемента в емкости для хранения. Из силосов перемещение цемента производится с помощью пневмотранспорта.

Склад заполнителей помимо хранения материала может осуществлять разрыхление материалов, обогрев заполнителей в холодное время года и прочие нестандартные технологические операции.

1.3 Анализ потребления завода ЖБК

«Энергоемкость искусственных пористых песков составляет от 300 до 400 кВт-ч/м³. Весьма энергоемкой составляющей является стальная арматура в железобетонных конструкциях. При производстве 1 т стали расходуется от 4200 кВт-ч для арматурных элементов до 5100 кВт-ч при применении прокатных профилей.

Таким образом, энергоемкость 1 м³ железобетонной конструкции может изменяться в довольно широком диапазоне в зависимости от вида, марки и расхода цемента, вида заполнителей и степени армирования. Так, без учета расхода на выдерживание бетона, энергоемкость 1 м³ бетонной или железобетонной конструкции может составлять от 600 до 2700 кВт-ч.

Учитывая эту составляющую энергоемкости, вернемся к примеру оценки расхода энергии при строительстве монолитного и сборного сооружения.

При проектировании монолитных сооружений оказывается возможным сократить расход цемента на 10-15%, а стали на 25-30% по сравнению с конструкцией из сборного железобетона. Таким образом энергоемкость 1 м³ бетона в монолитной конструкции на 160-170 кВт-ч меньше, чем в конструкции заводского изготовления за счет сокращения расхода энергоемких материалов.

Совершенно очевидно, что и при реализации проекта возможны решения по снижению энергоемкости конструкций за счет: правильного подбора состава бетона, применения эффективных видов и марок малоэнергоемких цементов, дополнительного снижения расхода цемента за счет применения химических добавок и прежде всего суперпластификатора, строгом соблюдении марки стали, вида и диаметра арматуры» [19].

Электроснабжение цехов завода ЖБК осуществляется от трех трансформаторных подстанций (ТП): ТП-102, ТП-3, ТП-101. Для компенсации реактивной мощности к шинам ТП подключены УКРМ мощностью 25-100 квар.

На подстанциях ТП-101 и ТП-102 установлено по два трансформатора, которые необходимы для питания потребителей, имеющих I и II категории надежности электроснабжения. На подстанции ТП-101 установлены трансформаторы ТМГ-1000/6/0,4, а на ТП-102 ТМГ-630/6/0,4. Подстанция ТП-3 является однострансформаторной, используется трансформатор ТМГ-160/6/0,4.

Питание на подстанции поступает по воздушным линиям 6кВ, распределительные сети 0,4 кВ проложены на кабельных эстакадах.

В таблице 1 представлены потребители завода ЖБК, их мощность и категория надежности электроснабжения. На основании табличных данных на рисунке 2 представлена диаграмма долей потребления электроэнергии.

Таблица 1 – Нагрузка потребителей завода ЖБК

Потребитель	Категория надежности электроснабжения	Полная расчетная мощность, кВА
АЦ	II	226,32
Гаражи	III	14,32
Склад заполнителей	III	7,52
Склад цемента	III	9,92
Цех опалубки	II	84,64
Диспетчерское помещение	III	4,32
Здание технического контроля	III	107,6
Склад материалов	III	30,32
РМЦ	II	179,44
Полигоны	III	68,48
Компрессорная	II	277,6
Цех ЖБК	II	380,8
Котельная	I	44,16
ЭТЦ	II	116,8
Слесарное помещение	II	57,2
Заводоуправление	III	24,72
Цех обработки дерева	II	160,64
Лаборатория	III	12,64
Главный корпус	III	32,16
Помещения бытового назначения	III	42,64
БСЦ	I	333,52
ИТОГО:		2215,76

Значительная часть потребителей завода ЖБК относится ко II и III категории надежности электроснабжения. Однолинейная схема предприятия представлена на рисунке 6. Структура потребления представлена на рисунке 7 [14].

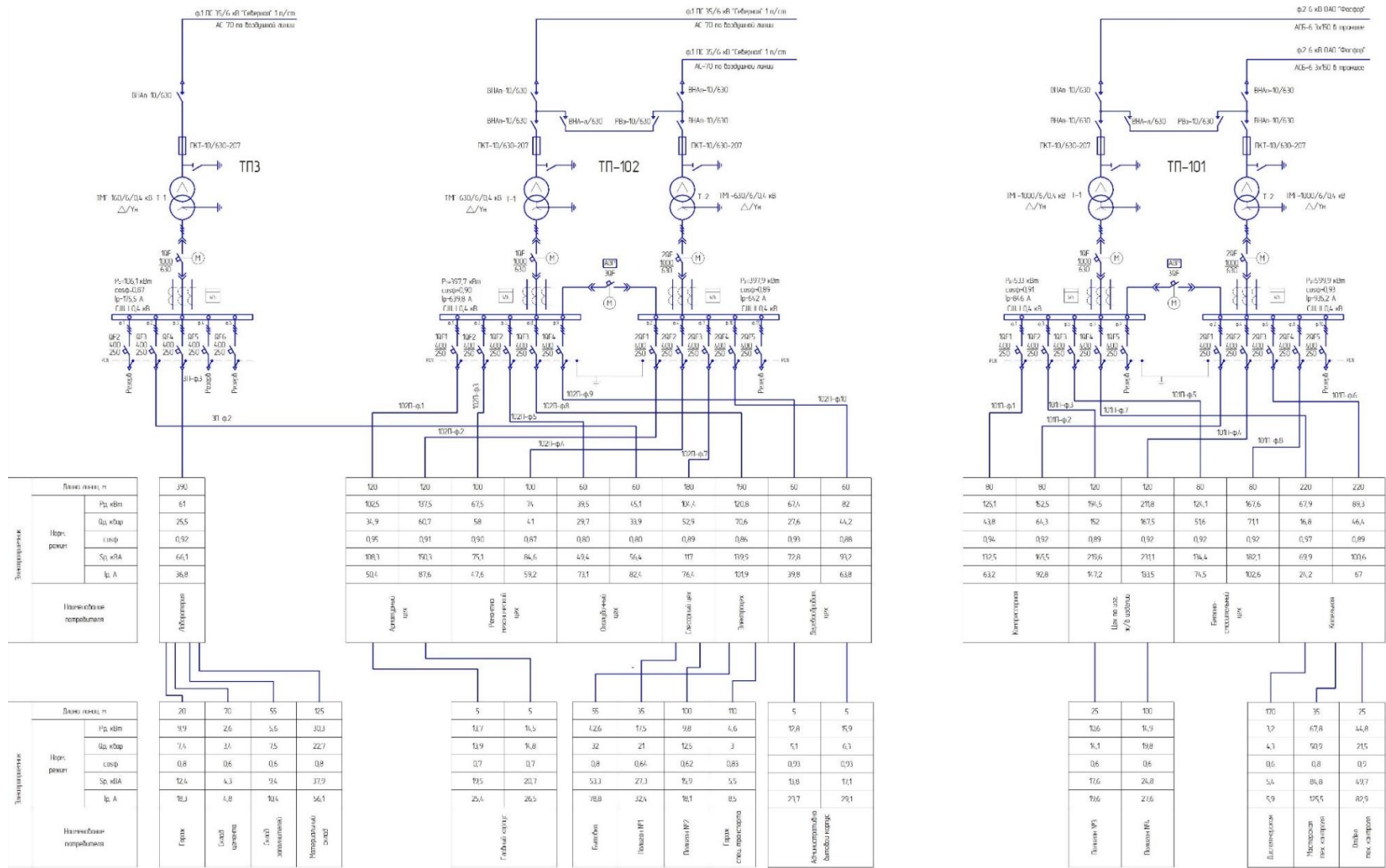


Рисунок 6 – Схема однолинейная электрическая предприятия

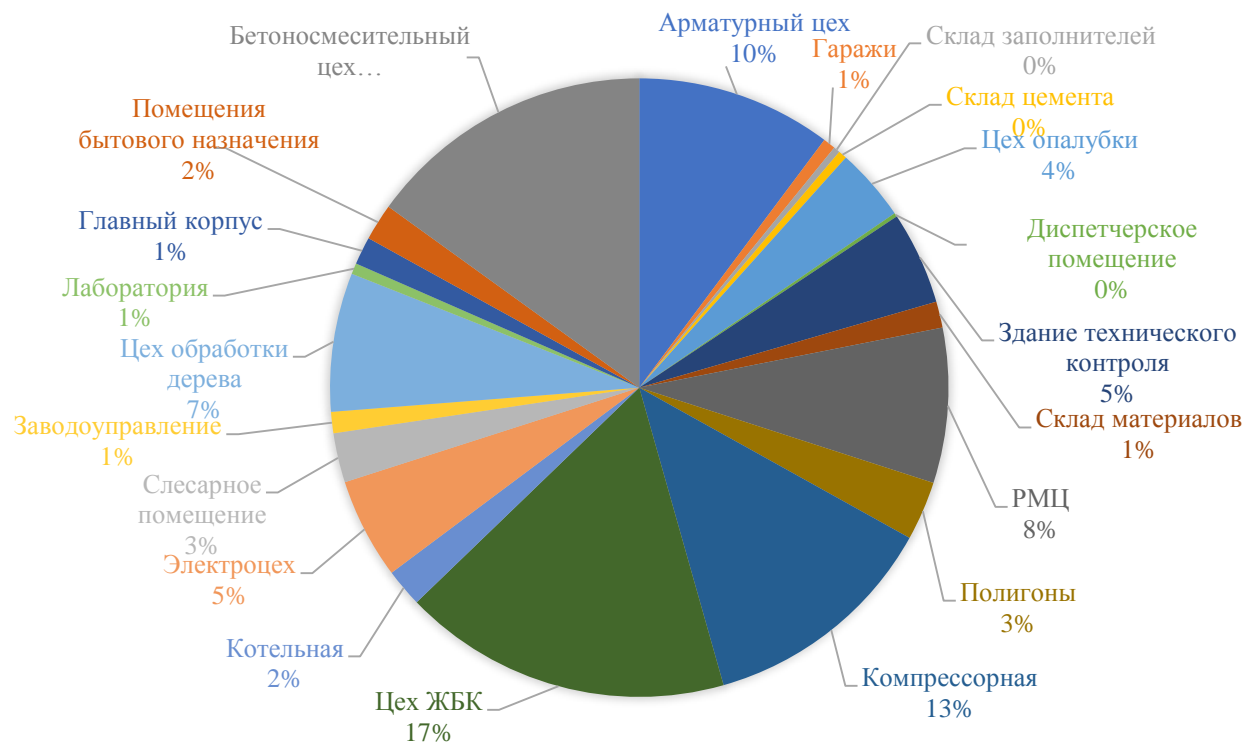


Рисунок 7 – Структура потребления электроэнергии завода ЖБК

Как мы видим по диаграмме, самыми крупными потребителями электроэнергии являются цеха по производству и изготовлению продукции: АЦ, БСЦ, РМЦ, цех ЖБК, ЭТЦ, цех обработки дерева, компрессорная.

К электроприемникам РМЦ относятся следующие станки (рисунок 8):

- вертикально-сверлильные;
- универсально-фрезерные;
- заточные;
- плоскошлифовальные;
- радиально-сверлильные и настольно-сверлильные;
- кузнечнопрессовые;
- строгальные;
- точильные;
- фрезерные;
- дробильные.

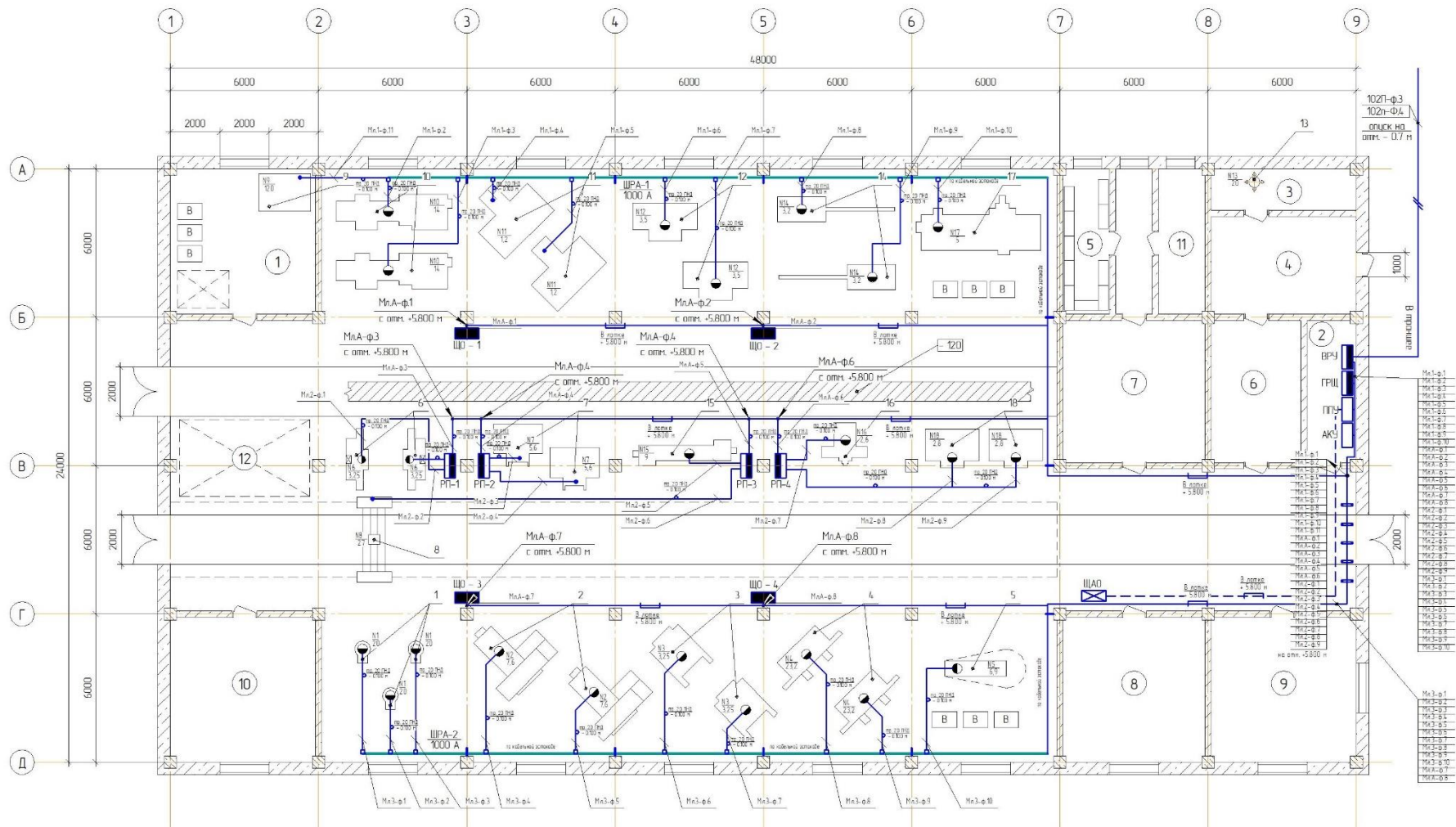


Рисунок 8 – План РМЦ

Компрессорная завода ЖБК необходима для создания потока сжатого воздуха. Сжатый воздух необходим для:

- перекачки и заливки цемента;
- сушки материалов;
- очистки рабочих поверхностей (с помощью пневмоскребок);
- смазки отсеков пневмоудочкой;
- уплотнения бетонной смеси (с использованием пневмовибратора).

Классификация компрессоров приведена на рисунке 9.

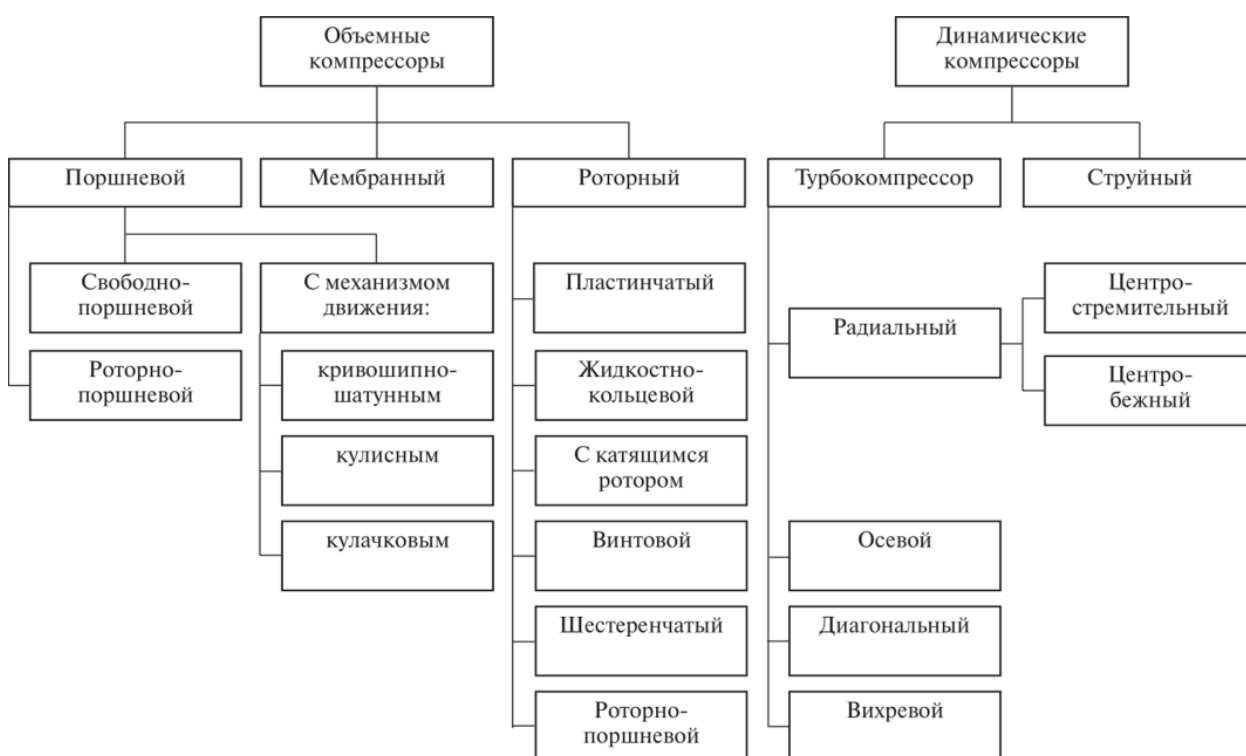


Рисунок 9 – Классификация компрессоров

Компрессоры приводятся в движение электродвигателями. В холодильных и тепловых машинах могут использоваться трехфазные синхронные и асинхронные электродвигатели. Передача механической энергии производится с помощью общего вала, соединения муфтой, ременных передач, а также редуктора, если необходимо повысить количество оборотов.

«Синхронные электродвигатели применяют для привода крупных компрессоров и размещают на одном валу с ними. Ротор электродвигателя при посадке его на вал тихоходного горизонтального компрессора служит одновременно маховиком. В комплект также включены возбуждающие агрегаты, питающие обмотку якоря постоянным током. Их снабжают дополнительной асинхронной обмоткой для запуска двигателя и достижения синхронного числа оборотов, соответствующего числу пар полюсов, установленных на статоре двигателя.

Такая конструкция синхронных двигателей повышает коэффициент использования потребляемой электрической мощности — косинус φ [16].

Запуск синхронных двигателей осуществляется с использованием станции управления, которые обеспечивают асинхронный пуск и при достижении определенного числа оборотов вращения двигателя подает возбуждение для последующего включения синхронной обмотки двигателя. Если производится пуск асинхронных двигателей, то применяются магнитные пускатели [3].

Электродвигатели в промышленности используются различного исполнения: открытые, взрывозащищенные, взрывонепроницаемые. Большинство электродвигателей рассматриваемого предприятия имеют открытое исполнение.

Компрессоры объемные обладают (рисунок 9) постоянным крутящим моментом, крутящее усилие вала носит постоянный характер и не зависит от скорости вращения. Отсюда можно сделать вывод о том, что мощность на валу зависит от рабочих условий (давления), способа управления производительностью, которые влияют на крутящий момент. В общем, уменьшение скорости вращения пропорционально уменьшению мощности на валу двигателя (рисунок 10) [15].



Рисунок 10 – Зависимость крутящего момента от скорости вращения (постоянный момент)

Чтобы эффективно использовать компрессор и управлять производительностью применяют преобразователи частоты. Преобразователи частоты применяются для изменения скорости вращения ротора электродвигателя.

Основными преимуществами использования преобразователей частоты являются снижение потерь мощности, связанных с применением золотникового механизма, а также уменьшение износа.

Преобразователи частоты также нашли свое применение для управления работой вентиляторов и насосов. Вентиляторы могут применяться в системах вентиляции.

Регулируемый электропривод также используется в составе оборудования, которое относится к подъемно-транспортному [9]. Данное оборудование необходимо для подъема и перемещения ЖБИ. Регулируемый электропривод используется преимущественно в машинах периодического действия на рассматриваемом промышленном предприятии, а также на погрузочно-разгрузочном оборудовании (рисунок 11).



Рисунок 11 – Классификация подъемно-транспортного оборудования

Что касается машин непрерывного действия и робототехники, то на рассматриваемом предприятии данное оборудование не применяется. Для перемещения продукции по территории склада, а также для погрузки и разгрузки ЖБИ в железнодорожные составы или грузовые автомобили используются мостовые краны.

Электрический двигатель мостового крана запитывается от троллеев, которые представляют собой стальной уголок, смонтированный к стене здания. При проведении регламентных работ и действий по обслуживанию троллей используется специальная площадка. Для подведения тока к электрическому двигателю, который расположен на тележке, применяются гибкие кабели. Гибкие кабели крепятся на специальных подвижных подвесках.

Выводы по первому разделу

В данном разделе был проведен анализ нормативно-правовой базы, исследована система электроснабжения потребителей. Анализ необходим для дальнейшего проведения мероприятий по повышению энергоэффективности завода ЖБК.

2 Повышение энергетической эффективности на промышленных предприятиях

2.1 Повышение энергетической эффективности металлургических предприятий

На металлургических предприятиях технологические процессы подразделяются на [7]:

- силовые;
- тепловые;
- электрохимические;
- электрофизические;
- электроосвещение.

Электроэнергия затрачивается на такие действия с материалами как:

- разгрузка;
- складирование;
- подготовка для дальнейшей плавки;
- подготовка формовочных материалов;
- плавка;
- создание, заливка, охлаждение, выбивка форм;
- создание стержней;
- чистка литья.

Данные действия выполняются на следующих участках:

- плавильный. В чугунолитейных цехах используются вагранки для выплавки серого чугуна, а также используются в качестве первого звена для изготовления отливок из ковкого чугуна и чугуна высокой прочности;
- формовочный. Основными электроприемниками для изготовления форм и формовочных смесей, заливки расплавленного металла

являются: конвейеры, гидравлические насосы, аэраторы, сепараторы, устройства выбивки;

- термообрубный. Проводится термообработка газовыми и электрическими печами;
- обрубный. Осуществляется обработка отливок. Электроприемниками данного участка являются обдирочные и наждачные станки, оборудования обработки дробью;
- смесеприготовительный. Проводится подготовка формовочной смеси;
- стержневой (изготовление стержней для создания в отливках внутренних полостей).

К основным направлениям энергосбережения литейных цехов относят:

- оптимизация использования вторичных энергоресурсов;
- модернизация оборудования и технологического процесса;
- использование более эффективных и экономичных энергоносителей.

На рисунке 7 представлена структура затрат на энергоносители цехов литейного предприятия.

В данных цехах 50-70% электроэнергии затрачивается на работу плавильных участков. На плавильных участках используются такие электроприемники как:

- дуговые печи;
- индукционные печи;
- вагранки горячего дутья;
- вагранки холодного дутья.

Также значительную долю затрат составляют участки термообработки, которые имеют в своем составе:

- электропечи сопротивления;
- пламенные печи.

«Дуговые печи являются наиболее крупными электроприемниками литейных цехов. На металлургических предприятиях мощность дуговых печей достигает 100 МВА, а на машиностроительных предприятиях – 30 МВА. Наибольшее распространение имеют дуговые печи переменного тока. Они применяются для плавки сталей различных сортов и чугуна.

Результаты энергоаудитов дуговых печей, показывают, что в Российской Федерации удельные расходы электроэнергии в дуговых печах составляют от 600 до 900 кВтч/т расплавляемого металла» [4].

Важную роль играет время расплавления дуговой печи, поскольку в этот период потребляется 50-70% электрической энергии.

Удельный расход электроэнергии дуговых печей растет при сокращении производительной в режиме расплавления металла (рисунок 12). Данное явление связано с тем, что теплотери, которые не зависят от производительности, разделяются на меньший объем металла.

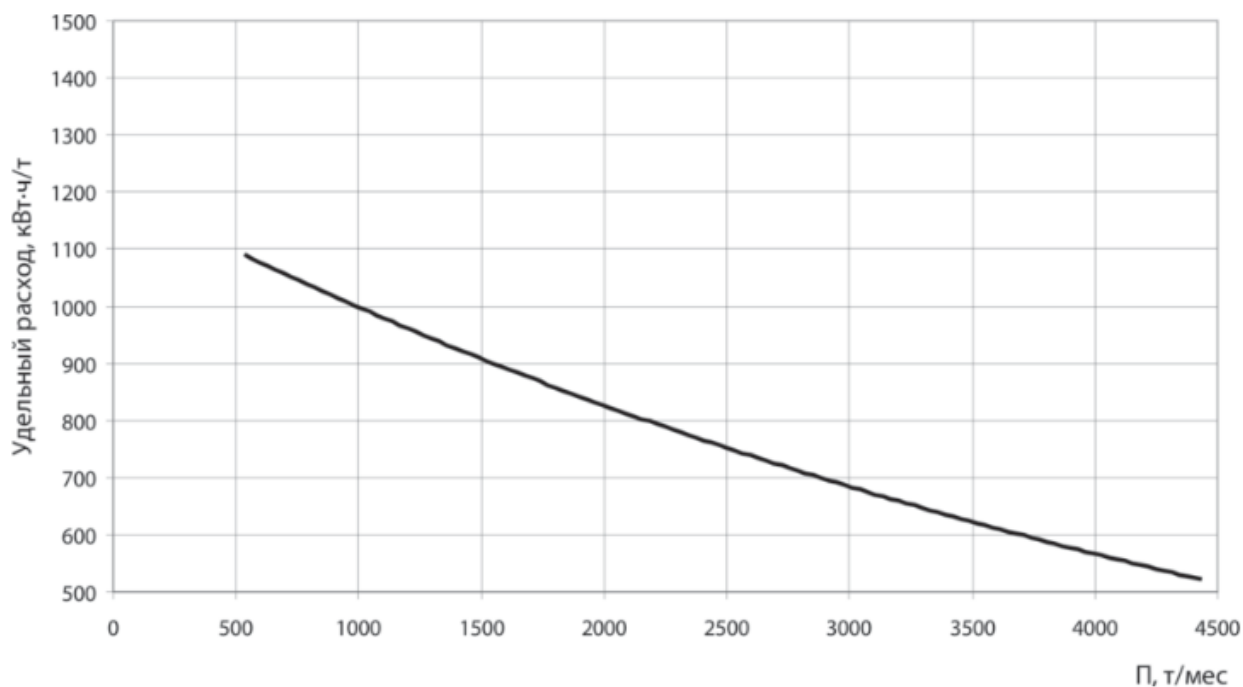


Рисунок 12 – Зависимость удельного расхода электроэнергии от производительности дуговых печей (режим расплавления)

Дуговые печи классифицируются на три класса в зависимости от значения удельной мощности:

- средней мощности (200-400 кВА/т);
- мощные (400-700 кВА/т);
- сверхмощные (более 700 кВА/т).

При использовании сверхмощных дуговых печей можно снизить время расплавления и соответственно величину удельного расхода электроэнергии (рисунок 13).

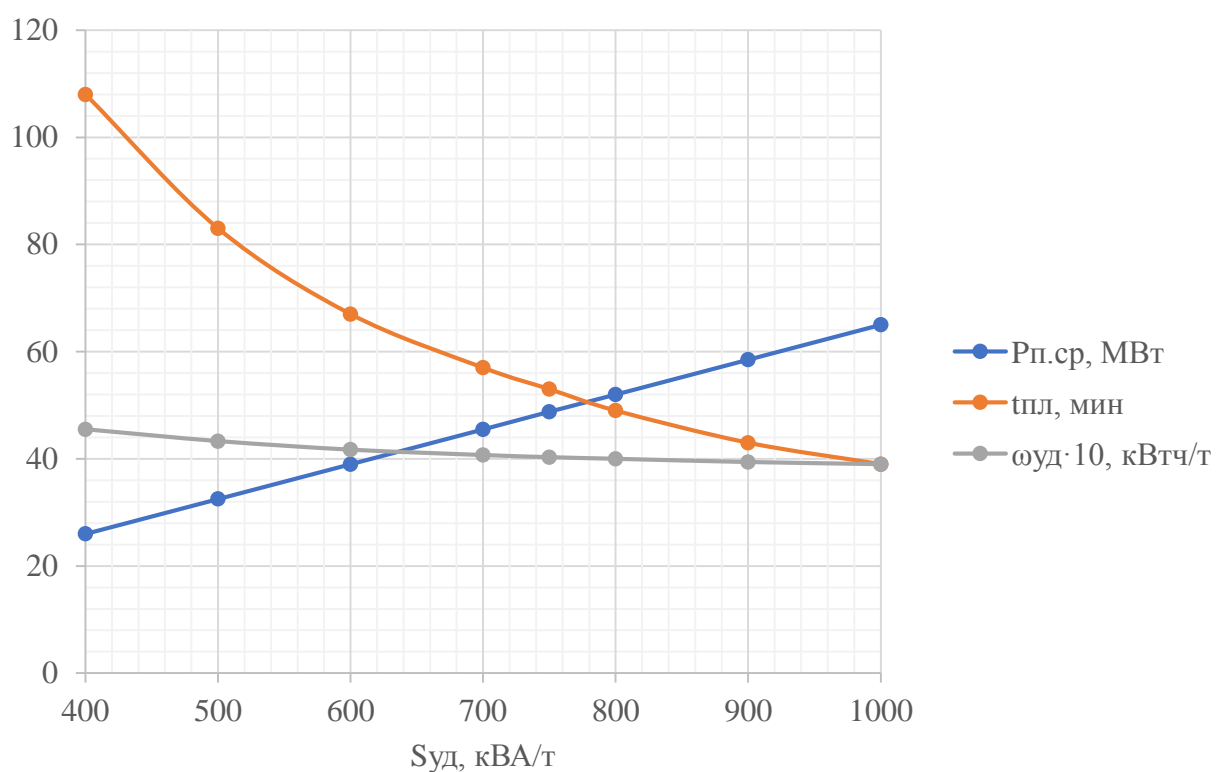


Рисунок 13 – Зависимость параметров процесса плавления от удельной мощности дуговой печи с загрузкой в 100 т

По рисунку видно, что увеличение удельного расхода печных трансформаторов от 400 до 750 кВА/т сокращает время плавления вдвое, а расход электроэнергии дуговой печи на 11%. Возрастание удельного расхода до 1000 кВА/т уже не приносит такого же эффекта. Время плавления сокращается на 28%, а удельный расход электроэнергии на 3%.

Выбор оптимальной мощности печных трансформаторов должен осуществляться исходя из условий их эксплуатации. Это выбор определяет технологическую и экономическую целесообразность внедрения трансформаторов дуговых печей.

На рисунке 14 приведены нормы удельного расхода электроэнергии в зависимости от номинальной емкости сверхмощных дуговых печей, производимых на территории Российской Федерации.

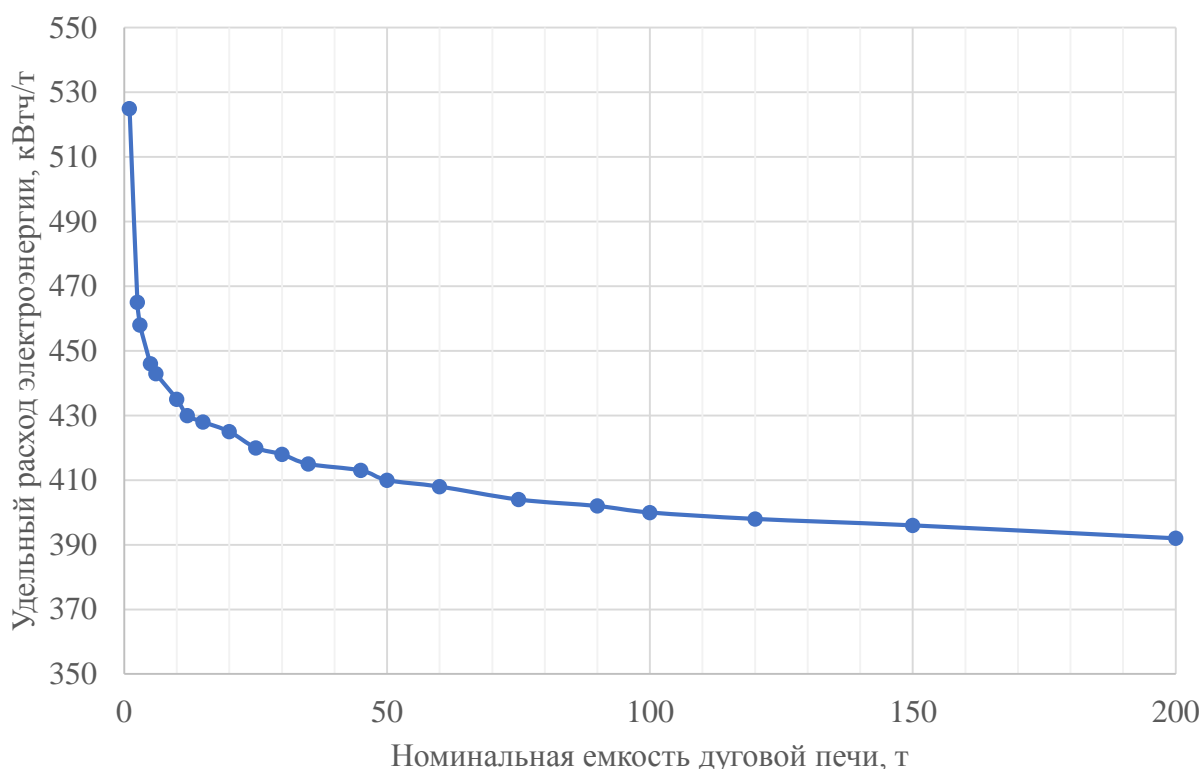
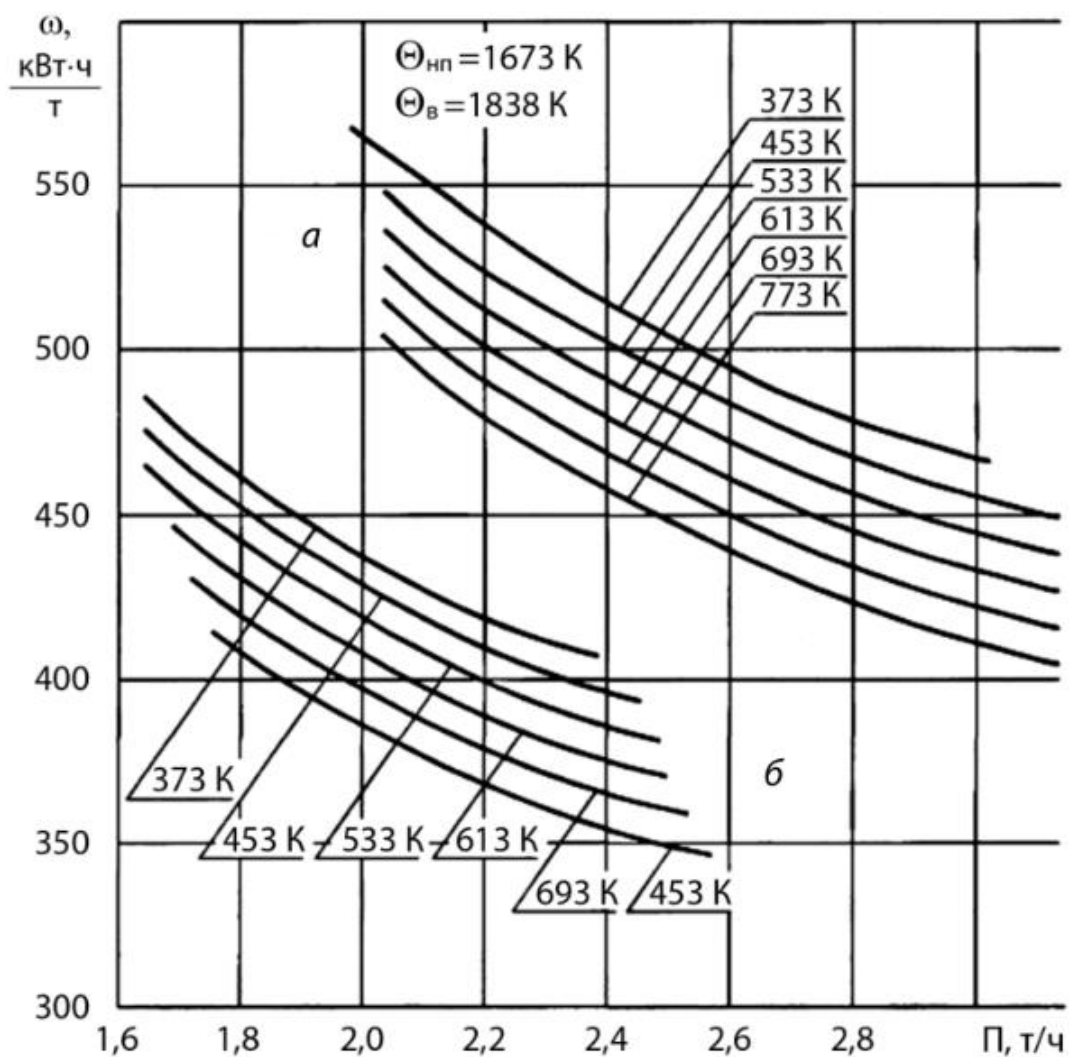


Рисунок 14 – График зависимости удельного расхода электроэнергии в зависимости от емкости дуговой печи

Дополнительный эффект повышения энергетической эффективности можно получить путем подогрева загружаемой металлической шихты отходящими от дуговой печи газами. С помощью данного мероприятия можно снизить удельный расход электроэнергии. На рисунке 15 приведен график зависимости удельного расхода электроэнергии от производительности печи при различных температурах нагрева шихты.

«В разных источниках даются различные рекомендации по оптимальной температуре нагрева шихты. Исследования, выполненные в Японии, показали, что физическое тепло, накапливаемое шихтой, увеличивается пропорционально температуре её подогрева» [4]. Данное явление приведено на рисунке 16.



а – печь ДСП12; б – печь ДСП6

Рисунок 15 – График зависимости удельного расхода электроэнергии от производительности дуговой печи при различных параметрах температуры шихты

«Однако с ростом температуры шихты увеличивается её окисление и повышается расход энергии, затрачиваемой на последующее восстановление железа. Авторы утверждают, что наиболее рациональным с учетом суммарного эффекта экономии энергозатрат является нагрев шихты до 400-500°C. При этом удельные расходы электроэнергии снижаются на 60-70 кВтч/т» [4].

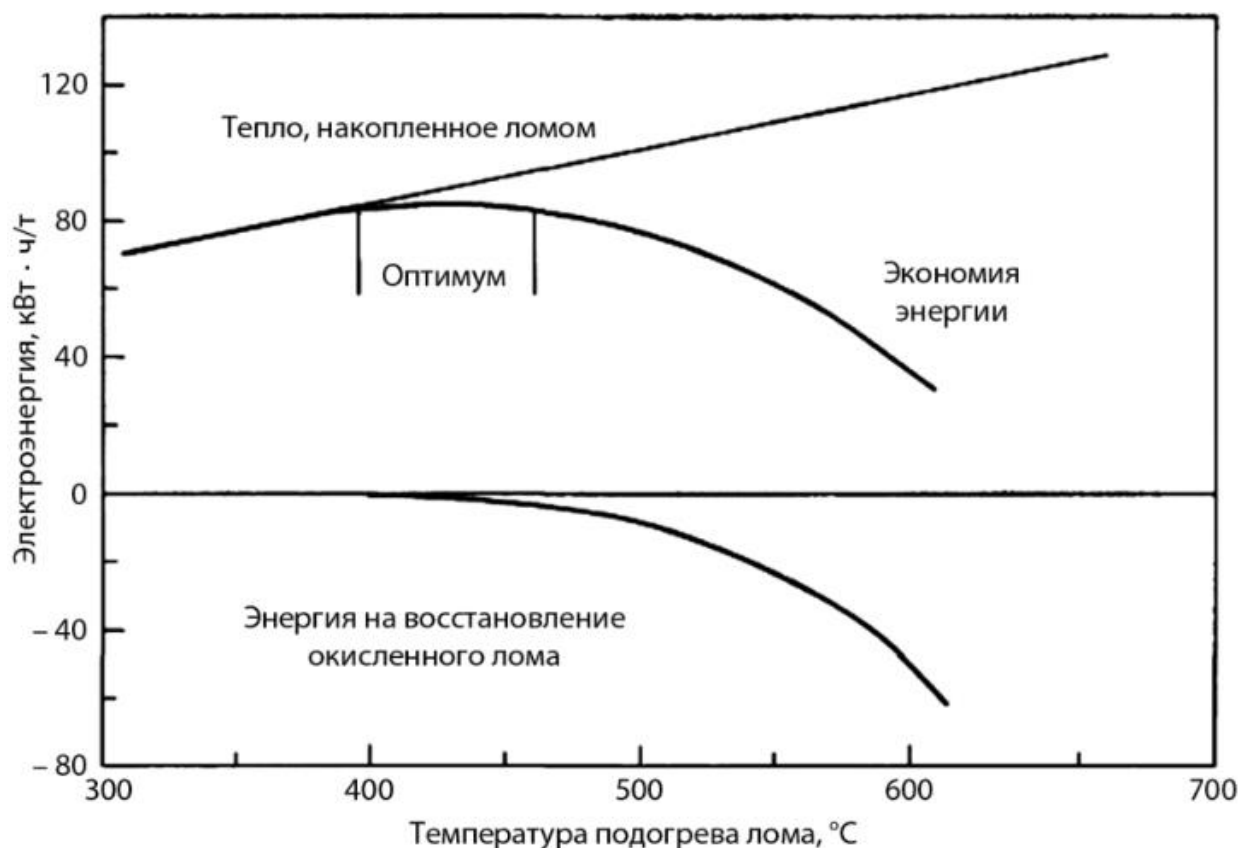


Рисунок 16 – Подогрев лома отходящими газами

Использование топливно-кислородных горелок для прогрева металлошихты относят к перспективным способам уменьшения удельных расходов электрической энергии и суммарных энергозатрат на плавку.

Стандартное число топливно-кислородных горелок, которые монтируются в «холодных зонах» дуговой печи составляет три штуки. Их мощность рассчитывается исходя из вместимости дуговой печи. Наиболее

оптимальным отношением объемов кислорода и газа, которые подаются в топливно-кислородную горелку два к одному и более.

Внедрение топливно-кислородных горелок снижает удельные расходы электрической энергии дуговой печи на 55-100 кВтч/т.

«При использовании топливно-кислородных горелок достигаются:

- увеличение количества тепла, вводимого в печь;
- повышение температуры в «холодных точках»;
- экономия электроэнергии;
- сокращение времени от выпуска до выпуска, что приводит к повышению производительности печи;
- уменьшение расхода электродов (на 0,4 кг/т) благодаря снижению продолжительности работы под током;
- уменьшение расхода огнеупоров (на 0,5 кг/т) в связи с сокращением продолжительности плавки» [4].

Топливно-кислородные горелки показывают самую высокую эффективность работы в начале процесса плавки, когда пламя окружает относительно холодный скрап. В течение самого процесса плавки КПД топливно-кислородных горелок уменьшается, поскольку шихта опускается, а пламя почти с ней контактирует. Исходя из этого, продолжительность работы топливно-кислородных горелок составляет около половины времени плавления (в начале плавления).

Эффективность работы топливно-кислородных горелок также определяется исходя из плотности шихты в печи (должна быть не ниже 1 т/м³), а также площади поверхности шихты (должна быть примерно равна 9-11 м²/т).

Использование инжекционных технологий является перспективным направлением повышения производительности и эффективности работы дуговых печей. Эти технологии предусматривают подачу в расплавленный металл кислорода и углерода.

«Инжекционная технология и оборудование для её осуществления обеспечивают:

- одновременное эффективное и гибкое использование электроэнергии и топлива;
- максимальное использование газообразного кислорода при сжигании природных ТЭР для предварительного подогрева, подрезки, плавления шихты, дожигания образующегося СО, быстрого окисления выплавляемого металла;
- формирование устойчивых вспененных шлаков с помощью многоцелевой фурмы для эффективной передачи энергии расплавленному металлу и его перемешиванию, что позволяет снизить расход электроэнергии и ускорить процесс окисления;
- высокую эффективность добавок углерода и газа при уникальной системе инъекции;
- низкое содержание азота в стали и образование оксидов азота при закрытых дугах» [4].

2.2 Повышение энергоэффективности машиностроительных предприятий

Значительную долю электроприемников на промышленных предприятиях составляют электродвигатели [5]. Распределение потерь по предприятию представлена на рисунке 17.

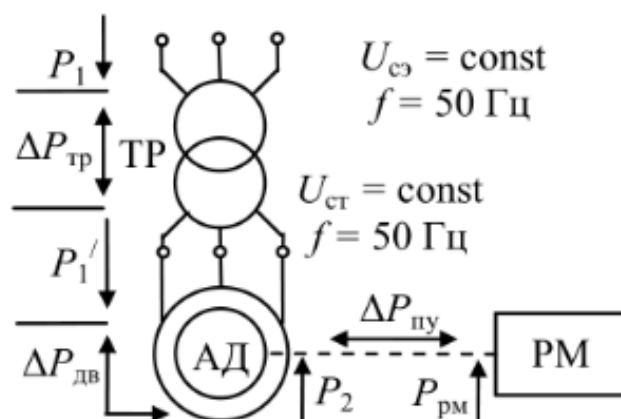


Рисунок 17 – Распределение потерь электрооборудования промышленных предприятий

По причине значительной доли потребления электроэнергии электродвигателями на промышленных предприятиях, эффективность использования этой электроэнергии имеет ключевое техническое и экономическое значение.

При оценке эффективности использования электроэнергии промышленного предприятия, необходимо разделять энергоэффективность технологических процессов, осуществляемых технологическим агрегатом с электрическим приводом, от эффективности самого электропривода. Энергоэффективность электропривода зависит в значительной степени от КПД.

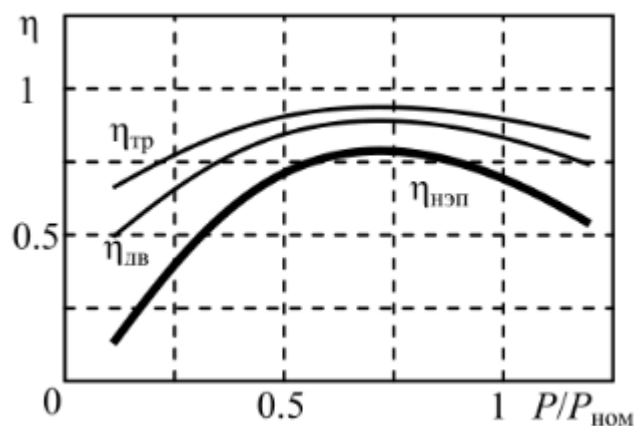
Значительную долю промышленных электрических приводов составляют нерегулируемые, питание которых осуществляется переменным током с постоянной амплитудой и частотой 50 Гц (рисунок 18).



P_1 – потребляемая электрическая мощность; P_1' – мощность вторичной цепи; P_2 – мощность на валу двигателя; $P_{рм}$ – мощность на валу рабочего механизма

Рисунок 18 – Схема нерегулируемого электропривода

КПД нерегулируемого электрического привода – отношение механической мощности к потребляемой электрической мощности (рисунок 19).



$\eta_{тр}$ – КПД трансформатора; $\eta_{дв}$ – КПД асинхронного двигателя; $\eta_{пу}$ – КПД передаточного механизма

Рисунок 19 – КПД асинхронного электропривода

Асинхронные двигатели потребляют не только активную, но и реактивную мощность. Активная мощность преобразуется в полезную механическую на валу, а реактивная необходима для создания электромагнитного поля.

На рисунке 20 представлены графики зависимости потерь мощности в сети электроснабжения от коэффициента мощности и коэффициента нагрузки.

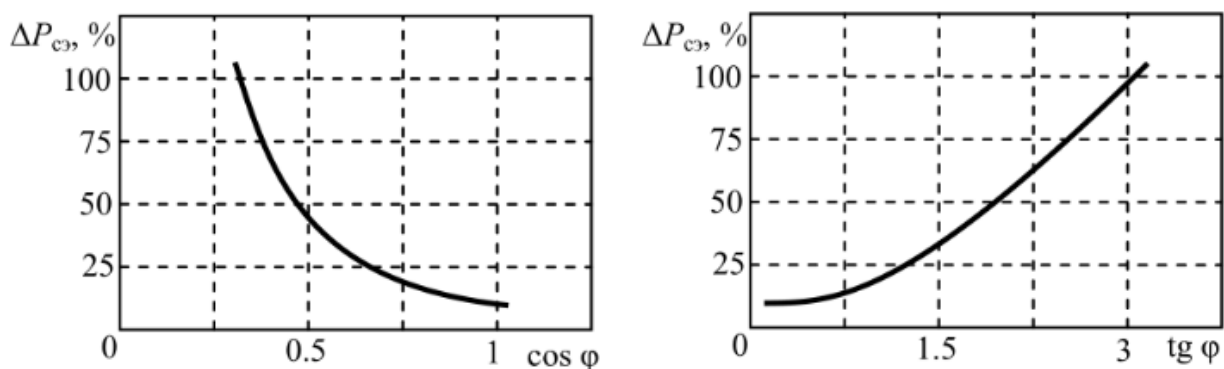


Рисунок 20 – Графики зависимости мощности в сети электроснабжения от коэффициента мощности (слева) и от коэффициента нагрузки (справа)

При проведении анализа энергоэффективности, помимо коэффициента мощности, необходимо также пользоваться коэффициентом нагрузки, поскольку при приближении коэффициента мощности к единице, величина реактивной мощности ещё высока.

По стандарту IEC60034-30, электрические двигатели подразделяются на следующие классы энергоэффективности (рисунок 21):

- стандартный (IE1);
- высокий (IE2);
- наивысший (IE3);

Что касается классов IE4 и IE5, то требования к таким двигателям пока разрабатываются.

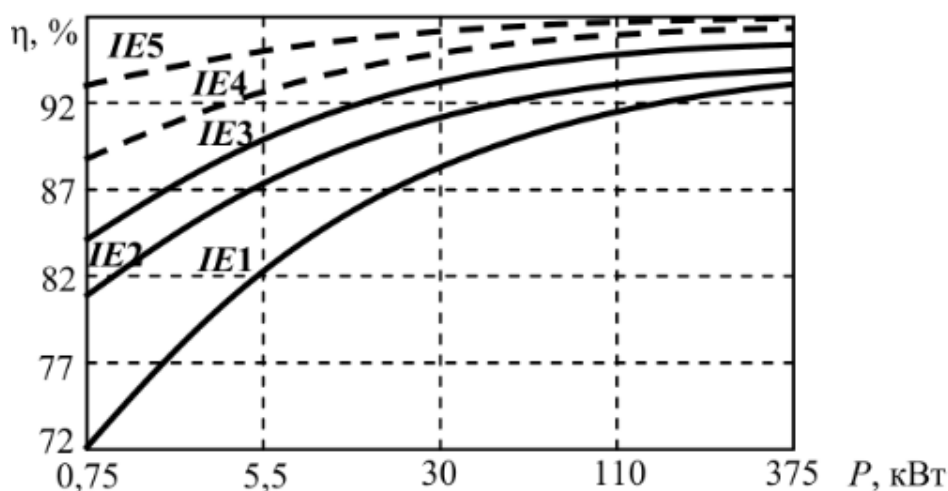


Рисунок 21 – Классы энергоэффективности электрических двигателей

Для снижения величины тока в распределительных сетях и потерь электроэнергии применяются компенсирующие устройства. Для повышения эффективности работы компенсирующих устройств, их располагают ближе к источникам реактивной мощности.

В таблице 2 представлены данные о влиянии компенсирующих устройств на величину реактивных потерь.

Таблица 2 – данные о влиянии компенсирующих устройств на величину реактивных потерь

Коэффициент мощности до компенсации	Коэффициент мощности после компенсации	Снижение тока, %	Снижение потерь по сопротивлению
0,50	0,80	37,50	61,00
0,50	0,90	44,50	69,00
0,60	0,80	25,00	43,50
0,60	0,90	33,00	55,50
0,70	0,80	12,50	23,00
0,70	0,90	22,00	39,50
0,80	0,90	11,00	21,00

Повысить коэффициент мощности можно следующими способами:

- изменение схемы переключения обмоток. При сокращении нагрузки до половины номинальной мощности электродвигателя, производить переключение схемы соединения обмоток с треугольника на звезду, что приводит к снижению мощности в 3 раза;
- установка контроллеров ограничения времени работы асинхронных двигателей в режиме холостого хода, а также других средств управления режимом работы электродвигателей;
- повышение уровня загрузки асинхронных двигателей.

К техническим средствам компенсации реактивной мощности относятся:

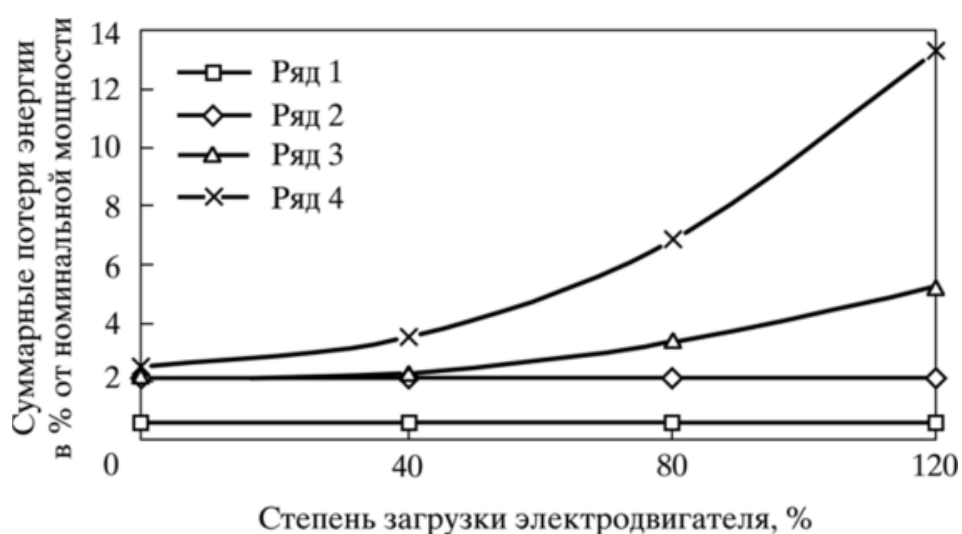
- «синхронные электродвигатели в режиме перевозбуждения;
- комплектные конденсаторные батареи;
- статические компенсаторы (управляемые тиристорами реакторы или конденсаторы)» [1].

Затраты по замене электродвигателя являются целесообразными в том случае, если его средняя загрузка составляет менее половины его номинальной мощности. Это связано с тем, что потери в железе начинают преобладать,

эффективность работы быстро снижается. При загрузке до 75% уже следует проводить технико-экономический расчет.

Составляющие потерь в электрических двигателях представлены на рисунке 22.

Потери в стали (намагничивания) являются стандартными для каждого электродвигателя независимыми от нагрузки. Потери на трение зависят только от частоты вращения. Активные потери возрастают пропорционально квадрату тока нагрузки, а добавочные зависят от величины нагрузки.



1 – потери на трение и сопротивление; 2 – потери в стали; 3 – потери на рассеивание; 4 – активные потери в меди

Рисунок 22 – Сложение потерь мощности в электрических двигателях

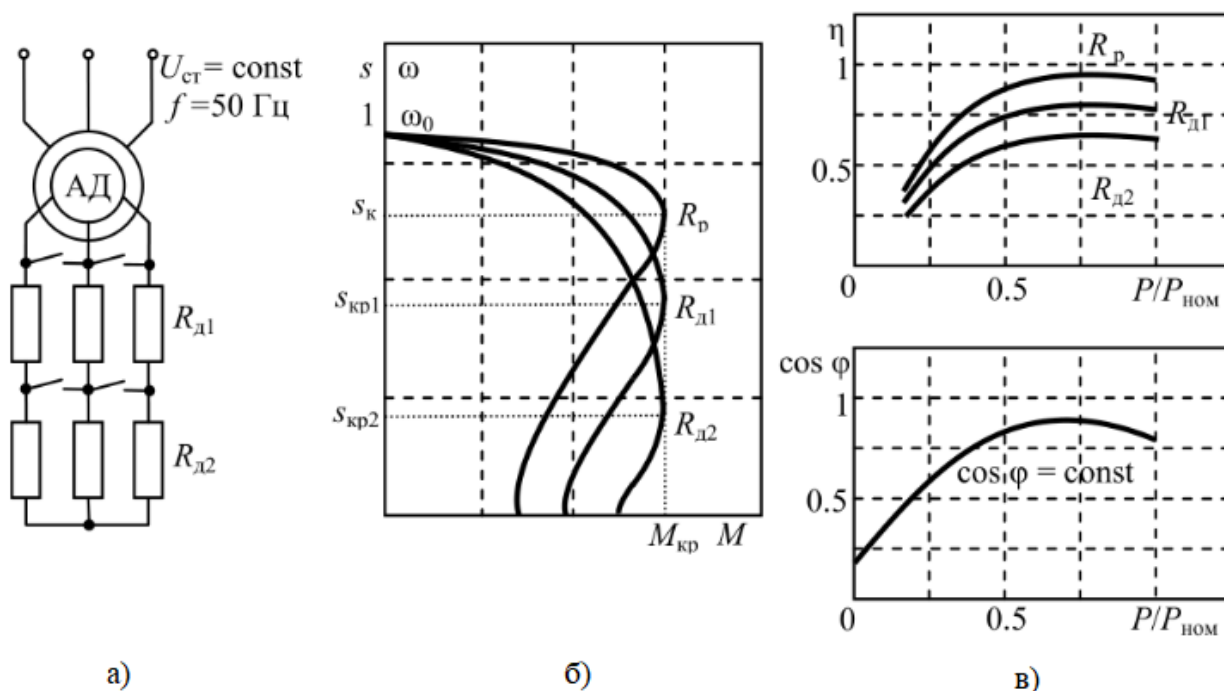
Применение регулятора напряжения электрического двигателя позволяет уменьшить магнитное поле в стали, потери в стали, увеличить КПД электродвигателя. Регулятор напряжения имеет незначительное потребление электроэнергии.

Существуют следующие способы управления работой асинхронного двигателя:

- реостатный (изменение сопротивления ротора);

- параметрический (изменение амплитуды статорного напряжения);
- частотный (изменение частоты питающего напряжения);
- переключение схемы соединения обмоток.

Реостатный способ может быть применен при использовании асинхронных двигателей с фазным ротором (рисунок 23).



а) Структурная схема; б) механические характеристики; в) энергетические характеристики

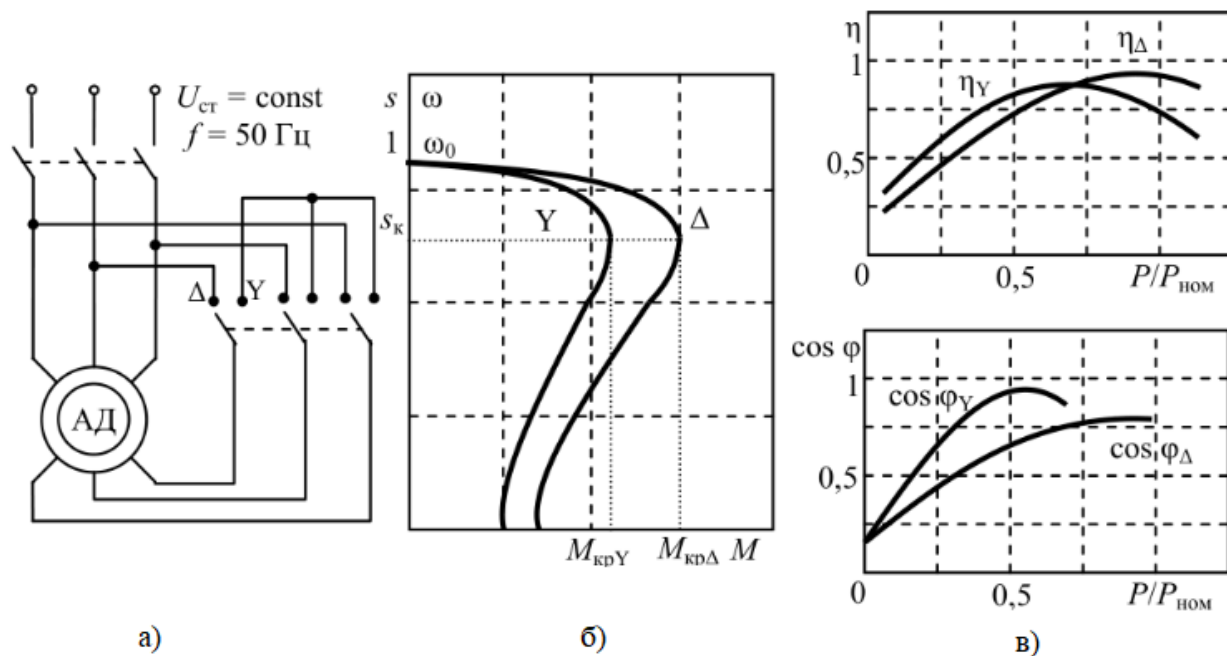
Рисунок 23 – Реостатное регулирование

Реостатное регулирование позволяет проводить ступенчатое изменение частоты вращения электрического двигателя. Но при уменьшении частоты вращения, снижается жесткость механической характеристики. Дополнительное сопротивление цепи ротора приводит к дополнительным потерям в обмотке ротора. Это говорит о том, что при уменьшении частоты вращения, уменьшается КПД.

Параметрический режим является неэффективным, применяется реже.

Что касается изменения схемы соединения обмоток, то необходима дополнительная коммутационная аппаратура и специальные двигатели. Электропривод является двухскоростным.

Характеристики электроприводов приведены на рисунке 24.



а) структурная схема; б) механические характеристики; в) энергетические характеристики

Рисунок 24 – Изменение схемы соединения обмоток электрического двигателя

Частотно регулируемые электрические приводы позволяют экономить в переменных режимах работы технологического оборудования значительную долю электроэнергии:

- вентиляторы и воздуходувки – 30-50%;
- компрессорные установки и агрегаты – 40-50%;
- насосное оборудование – 25%.

Тиристорные регуляторы являются более дешевым решением, поскольку диапазон регулирования более узкий относительно частотных регуляторов. Внедрение частотных регуляторов происходит медленно за счет высокой цены. Монтаж частотных регуляторов может окупиться, когда

значительную часть времени нагрузка электродвигателя примерно в три раза меньше его номинальной мощности.

Также следует отметить, что при увеличении мощности двигателя, соотношение цены за 1 кВт мощности становится выгоднее.

2.3 Способы повышения энергетической эффективности коммунальных предприятий

Электродвигатели на коммунальных и очистных предприятиях применяются преимущественно на насосном оборудовании.

Подача воды по трубопроводам составляет значительную долю энергетических затрат. Основные виды энергии, которые участвуют в транспортировке являются [2]:

- электрическая;
- тепловая;
- топливная.

Правильный учет расхода топливно-энергетических ресурсов происходит благодаря учету и нормированию удельных норм расхода.

Подлежит учету расходуемые топливно-энергетические ресурсы используемые для:

- подачи воды по магистральным трубопроводам, с учетом потерь технологического оборудования и коммуникаций;
- пополнение в накопительные емкости;
- собственных нужд линейной производственно-диспетчерской станции, перекачивающей станции и наливного пункта (очистные сооружения, водоснабжение, теплоснабжение, освещение и т.д.), включая потери;
- линейная часть магистральных трубопроводов.

К основным неэффективным затратам коммунальных предприятий относят в процессе водоснабжения относят:

- использование технологического оборудования с низким КПД, а также несоответствие других параметров, которые ведут к эксплуатации в неэффективном режиме работы установки.
- нерациональный монтаж насосных станций, который требует дополнительного гидравлического напора и, соответственно, повышенного расхода электрической энергии.
- увеличенный объем перекачек внутри станций;
- скопления примесей в трубопроводе;
- использование задвижек и прочей арматуры с повышенным гидравлическим сопротивлением;
- отсутствие компенсации реактивной мощности;
- высокое общее время работы оборудования на холостом ходу;
- повышенное падение напряжения в распределительных сетях;
- низкое качество производства изоляционных работ, приводящее к дополнительным потерям электрической энергии, которая расходуется станциями катодной защиты на электрохимическую защиту трубопровода.

При эксплуатации магистральных насосов довольно часто требуется изменять их гидравлические характеристики для повышения энергетической эффективности их работы. Существуют следующие методы регулирования на водоснабжающих предприятиях [30]:

- установка дросселей;
- перепуск (байпасирование);
- отключение малонагруженных насосов, изменение схемы обвязки;
- использование сменных роторов;
- частотно-регулируемый электропривод;
- монтаж регулирующих муфт;
- применение газотурбинного привода;

– чистка и промывка трубопровода, повышение его пропускной способности, а также снижение гидросопротивления.

Применение байпаса на практике довольно редкое, поскольку метод незначительно экономичнее, чем дросселирование.

Существует параллельная и последовательная схема обвязки насосных агрегатов. Параллельное соединение используется тогда, когда не достигается необходимая подача перекачиваемой жидкости.

Но более широкое применение получила последовательная обвязка. Насосы монтируются друг за другом, что обеспечивает увеличение напора и КПД. Используется такая схема преимущественно, когда наблюдается ускоренный рост гидравлических потерь с одновременным повышением расхода [21].

Поскольку значительная часть современных насосов комплектуется вместе со сменными роторами, то таким образом можно регулировать подачу. Сменные роторы позволяют работать на 50% и 70% от номинальной подачи насоса. Некоторые же насосы могут поставляться также с ротором, работающим на повышенной подаче (125% от номинальной подачи) [26]-[29].

В некоторых случаях применяются механические устройства плавного регулирования, вместо частотно-регулируемых электроприводов из-за экономических соображений. По принципу работы муфты могут классифицироваться:

- гидравлические;
- электромагнитные;
- сухого трения;
- мокрого трения.

«Для плавного регулирования частоты вращения рабочего колеса можно использовать гидравлические трансмиссии. В этом виде трансмиссий передача энергии от ведущего вала к ведомому валу осуществляется за счет кинетической энергии напора рабочей жидкости. Конструктивно это

реализуется в виде гидромufты с регулируемым коэффициентом проскальзывания» [2].

Гидравлическая муфта состоит из (рисунок 25):

- насосного колеса с лопатками;
- турбинного колеса.

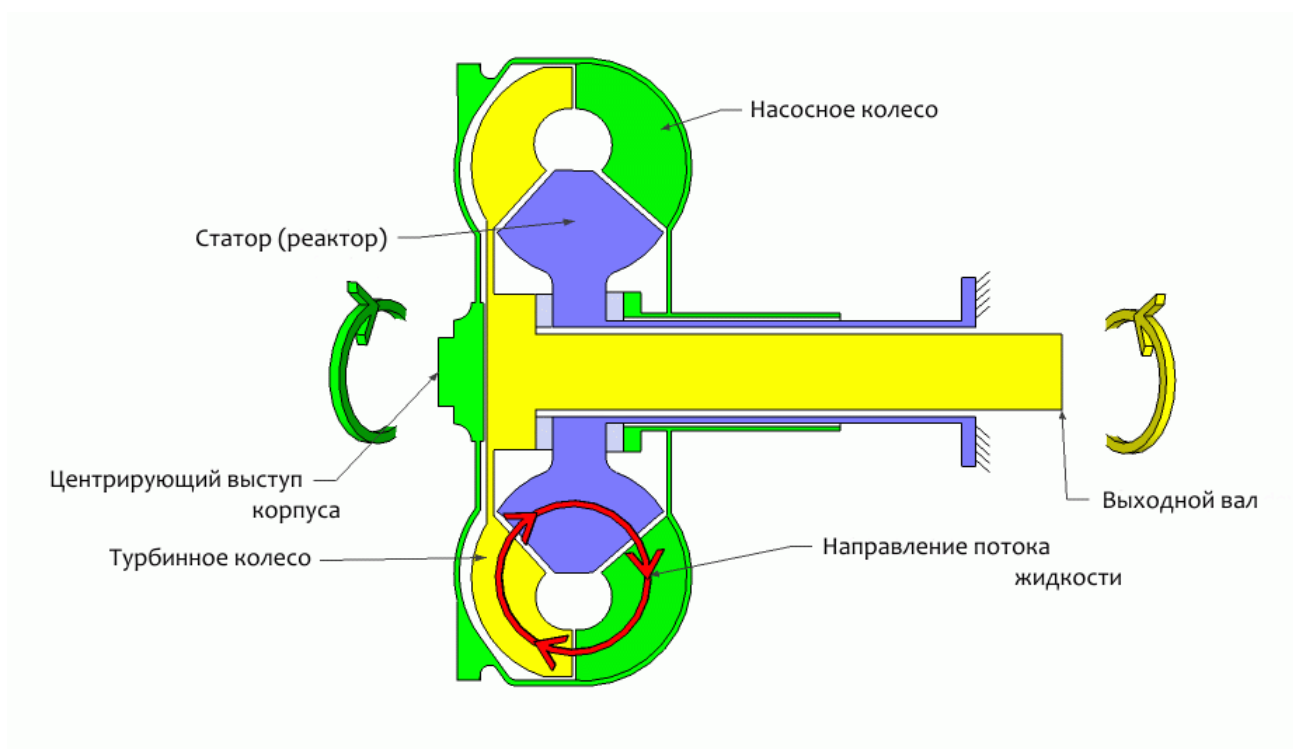


Рисунок 25 – Схема гидравлической муфты

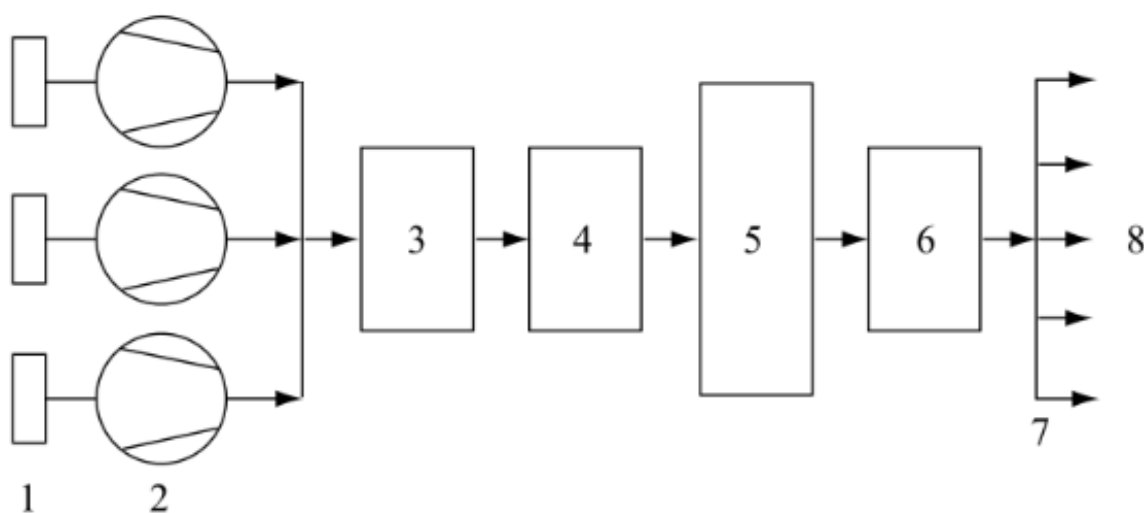
Ключевые преимущества гидравлической муфты:

- высокий КПД;
- возможность пуска электродвигателя под нагрузкой, снижение пусковых токов;
- бесступенчатая регулировка мощности и числа оборотов;
- плавный разгон, отсутствие ударных нагрузок на обмотки, подвижные части;
- отсутствие гидроудара, гашение вращательных колебаний, вибрации;
- защита от перегрузок.

Помимо вышеприведенных достоинств гидравлической муфты, данное устройство имеет и недостаток: не позволяет регулировать крутящий момент электродвигателя в зависимости от нагрузки на ведомом валу [12].

Стоит отметить, что электродвигатели также используются в компрессорных установках, для подачи сжатого воздуха, в котельных установках (при сжигании жидкого топлива), а также для аэрации воды в очистных сооружениях [11].

На рисунке 26 приведена принципиальная схема системы генерации сжатого воздуха.



1 – фильтр забора воздуха; 2 – компрессорные установки; 3 – охладитель воздуха; 4 – влагоотделитель; 5 – ресивер; 6 – осушитель воздуха; 7 – система распределения; 8 – потребитель

Рисунок 26 – Принципиальная схема системы генерации сжатого воздуха

Сжатие воздуха является в целом энергетически неэффективным процессом. Относительно эффективным является процесс сжатия воздуха при постоянной температуре.

Процесс сжатия воздуха происходит в компрессоре за счет работы электрического привода. В основном на коммунальных предприятиях используются компрессоры:

- поршневые;
- винтовые;
- ротационные.

На очистных сооружениях применяются турбовоздуходувки.

К основным причинам энергопотерь установок сжатого воздуха относят:

- «износ компрессорного оборудования;
- отсутствие системы охлаждения воздуха, подаваемого в поршневой компрессор в жаркий период, так как с ростом температуры на входе в компрессор уменьшается его плотность и производительность;
- неэкономичные методы регулирования при несоответствии производительности компрессоров полезному потреблению.
- обеспечение из одной системы сжатого воздуха потребителей с различным уровнем давления;
- несоответствие номинальное производительности компрессора производственно-необходимой;
- плохая работа промежуточных воздухоохладителей в многоступенчатом компрессоре (отложение накипи) увеличивает работу на сжатие;
- плохая работа системы осушки сжатого воздуха при низких наружных температурах;
- отсутствие автоматизированной систему управления компрессорами» [10].

К энергосберегающим мероприятиям, внедряемым на очистных сооружениях и коммунальных предприятиях, относят:

- монтаж автоматизированной системы регулирования подачи сжатого воздуха, путем подачи сигнала на систему управления давлением;
- установка линий разводки системы подачи сжатого воздуха, которая необходима для отключения незадействованных ветвей;

- разделение потребителей воздуха, которые используют разные давления;
- реализация отводимого тепла компрессорных установок в других инженерных системах и сетях.

Выводы по второму разделу

Для повышения энергоэффективности систем вентиляции, кондиционирования, водоснабжения, необходимо управление производительностью работы электрических двигателей. Для каждой инженерной системы необходимо провести технико-экономический анализ эффективности внедрения средств управления производительностью электродвигателей [18].

Также значительное влияние на повышение энергоэффективности потребителей завода ЖБК оказывает снижение реактивной составляющей полной мощности. Необходима установка компенсирующих устройств.

В следующем разделе необходимо провести технико-экономический расчет мероприятий.

3 Технико-экономический расчет

3.1 Расчет энергоэффективности внедрения электродвигателей

КПД электрических двигателей может находиться в диапазоне от 10 до 99% в зависимости от типа и конструктивных особенностей [25].

Класс энергоэффективности электродвигателя может быть повышен следующими способами:

- «применение принципиально нового типа изоляции. В процессе работы от преобразователя частоты в двигателе возникают дополнительные потери в обмотке, вызванные ШИМ-модуляцией, однако именно изоляция является одним из важнейших узлов, определяющих долговечность электрической машины.
- использование аддитивных технологий. Возможность использования широкого спектра материалов: пластиков, керамики, металлических сплавов и даже органических/биоматериалов ставит аддитивные технологии в авангарде современных технологий производства. В настоящее время уже имеется опыт изготовления катушек/обмоток, элементов электрической изоляции, блоков магнитных сердечников статора/ротора, постоянных магнитов, корпуса двигателя, конструктивных элементов на основе использования новых материалов и технологий. Однако, следует отметить относительно низкую технологическую зрелость данной технологии – так, например, магнитные или обмоточные материалы обладают несколько худшими физическими свойствами по сравнению с существующими решениями. Тем не менее, исследования и разработки в этой области быстро прогрессируют.
- улучшение аэродинамических свойств для снижения вентиляционных потерь путем оптимизации геометрии и топологии ротора.

- увеличение точности обработки и изготовления узлов и деталей двигателя, а также увеличение точности системы управления электрическим приводом за счёт внедрения в работу высокочувствительных датчиков и микроконтроллеров. Микроконтроллеры, применяемые к электромеханике, должны обладать такими характеристиками, как достаточное количество модулей захвата (САР), большое статическое ОЗУ, несколько каналов 12-разрядных АЦП, несколько модулей ШИМ.
- использование подшипников более высокого класса (NSK, SKF), выше 6, расчетный срок службы которых составляет более 40000 часов
- использование двигателя совместно с частотным преобразователем, который позволяет регулировать коэффициент мощности машины, а также наличие ПЧ позволяет использовать синхронные реактивные двигатели, класс энергоэффективности которых может достигать IE5 [9].

Подшипники могут быть магнитные, которые сейчас применяются только в высокоскоростных электрических машинах. Недостатки в магнитной системе подшипников могут заключаться в сложной системе управления электромагнитами в таких системах» [22].

Чем выше КПД выдаваемый электродвигателем при заданной нагрузке, тем выше класс энергоэффективности.

Стоимость 1 кВтч электроэнергии примем 4,46 руб. Для установки примем электродвигатели классом энергоэффективности IE2. Данные электродвигатели имеют меньшую мощность, при практически тех же механических характеристиках (таблицы 3, 4).

Присоединительные размеры электродвигателей (используемых и устанавливаемых) соответствуют стандарту DIN EN 50347.

Таблица 3 – Выбор энергоэффективных электродвигателей

Месторасположение	Оборудование	Электродвигатель используемый				Электродвигатель				Механические параметры электродвигателей		
		Тип	η	$\cos\phi$	Р, кВт	Тип	η	$\cos\phi$	Р, кВт	M_p/M_n	M_{max}/M_n	n, об/мин
Арматурный цех	Кузнечнопрессы станки	АИР 132М4	0,88	0,84	11	АИС 132М4-IE2	0,89	0,83	7,5	2,2	2,3	1440
	Оборудование вальцовки листового металла	АИР 250М2	0,94	0,91	90	АИС 250М2-IE2	0,93	0,89	55	2,2	2,3	2975
	Гильотины	АИР 250М6	0,93	0,86	55	АИС 250М6-IE2	0,92	0,83	37	2,1	2,1	980
	Гидравлический пресс	АИР 250М2	0,94	0,91	90	АИС 250М2-IE2	0,93	0,89	55	2,2	2,3	2975
	Молот	АИР 250М6	0,93	0,86	55	АИС 250М6-IE2	0,92	0,83	37	2,1	2,1	980
Цех по изготовлению ж/б изделий	Бетонные смесители	АИР 132М4	0,88	0,84	11	АИС 132М4-IE2	0,89	0,83	7,5	2,2	2,3	1440
	Пневмоустановка	АИР180М2	0,91	0,9	30	АИС180М2-IE2	0,91	0,89	22	2	2,3	2950
	Подъемно-транспортный механизм	АИР180М2	0,91	0,9	30	АИС180М2-IE2	0,91	0,89	22	2	2,3	2950

Продолжение таблицы 3

Месторасположение	Оборудование	Электродвигатель используемый				Электродвигатель				Механические параметры электродвигателей		
		Тип	η	$\cos\phi$	Р, кВт	Тип	η	$\cos\phi$	Р, кВт	M_p/M_n	M_{max}/M_n	n, об/мин
РМЦ	Токарные станки	АИР 112М2	0,87	0,88	7,5	АИС 112М2-IE2	0,86	0,88	4	2,3	2,3	2972
	Фрезерные станки	АИР 112М2	0,87	0,88	7,5	АИС 112М2-IE2	0,86	0,88	4	2,3	2,3	2972
	Сверлильные станки	АИР 132М4	0,88	0,84	11	АИС 132М4-IE2	0,89	0,83	7,5	2,2	2,3	1440
	Шлифовальные станки	АИР 112М2	0,87	0,88	7,5	АИС 112М2-IE2	0,86	0,88	4	2,3	2,3	2972
Цех опалубки	Деревообрабатывающие станки	АИР 132М4	0,88	0,84	11	АИС 132М4-IE2	0,89	0,83	7,5	2,2	2,3	1440
Компрессорная	Компрессоры	АИР 315М4	0,95	0,89	200	АИС 315М4-IE2	0,95	0,89	132	2,1	2,2	1480
Заготовительные цеха	Ленточные пилы	АИР 315М2	0,95	0,92	200	АИС 315М2-IE2	0,95	0,9	132	2	2,2	2975
	Гильотины	АИР 250М6	0,93	0,86	55	АИС 250М6-IE2	0,92	0,83	37	2,1	2,1	980

Продолжение таблицы 3

Месторасположение	Оборудование	Электродвигатель используемый				Электродвигатель				Механические параметры электродвигателей		
		Тип	η	$\cos\phi$	Р, кВт	Тип	η	$\cos\phi$	Р, кВт	M_p/M_n	M_{max}/M_n	n, об/мин
Котельная, административный корпус	Циркуляционные насосы системы отопления и ГВС	АИР 112М2	0,87	0,88	7,5	АИС 112 М2-IE2	0,86	0,88	4	2,3	2,3	2972
Административный корпус	Вентиляционные установки	АИР 132М4	0,88	0,84	11	АИС 132М4-IE2	0,89	0,83	7,5	2,2	2,3	1440
Котельная		АИР 250М6	0,93	0,86	55	АИС 250М6-IE2	0,92	0,83	37	2,1	2,1	980
Гараж		АИР 250М4	0,94	0,88	90	АИС 250М4-IE2	0,94	0,86	55	2,2	2,3	1480

Таблица 4 – Техничко-экономический расчет энергоэффективных электродвигателей

Месторасположение	Оборудование	Тип электродвигателя	Р, кВт	n, шт	Экономия			Стоимость замены электродвигателя, тыс. руб	Общая стоимость, тыс. руб	Простой срок окупаемости, лет
					кВт	кВтч/год	тыс. руб			
Арматурный цех	Кузнечнопрессовые станки	АИС 132М4-IE2	7,5	4	14	20440	91,16	51,25	204,98	2,25
	Оборудование вальцовки листового металла	АИС 250М2-IE2	55	1	35	51100	227,91	375,80	375,80	1,65
	Гильотины	АИС 250М6-IE2	37	2	36	52560	234,42	252,81	505,62	2,16
	Гидравлический пресс	АИС 250М2-IE2	55	1	35	51100	227,91	375,80	375,80	1,65
	Молот	АИС 250М6-IE2	37	1	18	26280	117,21	252,81	252,81	2,16
Цех по изготовлению ж/б изделий	Бетонные смесители	АИС 132М4-IE2	7,5	10	35	51100	227,91	51,25	512,45	2,25
	Пневмоустановка	АИС180М2-IE2	22	6	48	70080	312,56	150,32	901,92	2,89
	Подъемно-транспортный механизм	АИС180М2-IE2	22	8	64	93440	416,74	150,32	1 202,56	2,89

Продолжение таблицы 4

Месторасположение	Оборудование	Тип электродвигателя	Р, кВт	n, шт	Экономия			Стоимость замены электродвигателя, тыс. руб	Общая стоимость, тыс. руб	Простой срок окупаемости, лет
					кВт	кВтч/год	тыс. руб			
РМЦ	Токарные станки	АИС 112М2-IE2	4	14	49	71540	319,07	27,33	382,63	1,20
	Фрезерные станки	АИС 112 М2-IE2	4	6	21	30660	136,74	27,33	163,99	1,20
	Сверлильные станки	АИС 132М4-IE2	7,5	8	28	40880	182,32	51,25	409,96	2,25
	Шлифовальные станки	АИС 112 М2-IE2	4	6	21	30660	136,74	27,33	163,99	1,20
Цех опалубки	Деревообрабатывающие станки	АИС 132М4-IE2	7,5	3	10,5	15330	68,37	51,25	153,74	2,25
Компрессорная	Компрессоры	АИС 315М4-IE2	132	4	272	397120	1 771,16	901,92	3 607,68	2,04
Заготовительные цеха	Ленточные пилы	АИС 315М2-IE2	132	6	408	595680	2 656,73	901,92	5 411,52	2,04
	Гильотины	АИС 250М6-IE2	37	4	72	105120	468,84	252,81	1 011,24	2,16

Продолжение таблицы 4

Месторасположение	Оборудование	Тип электродвигателя	Р, кВт	n, шт	Экономия			Стоимость замены электродвигателя, тыс. руб	Общая стоимость, тыс. руб	Простой срок окупаемости, лет
					кВт	кВтч/год	тыс. руб			
Котельная, административный корпус	Циркуляционные насосы системы отопления и ГВС	АИС 112 М2-IE2	4	6	21	30660	136,74	27,33	163,99	1,20
Административный корпус	Вентиляционные установки	АИС 132М4-IE2	7,5	8	28	40880	182,32	51,25	409,96	2,25
Котельная		АИС 250М6-IE2	37	4	72	105120	468,84	252,81	1 011,24	2,16
Гараж		АИС 250М4-IE2	55	3	105	153300	683,72	375,80	1 127,40	1,65
–	–	–	–	–	–	2033050	9 067,40	–	18 349,29	–

Использование энергоэффективных электродвигателей класса IE2 позволило снизить потери электрической энергии предприятия на 2033 МВтч/год при работе в одну смену (8 часов).

Расчет годовой экономии электроэнергии был проведен по следующей формуле:

$$W = \Delta P_n \cdot K_n \cdot t \quad (1)$$

где ΔP_n – разница номинальных мощностей групп устанавливаемых и заменяемых электродвигателей, кВт;

K_n – время работы группы электродвигателей под нагрузкой в течение одной смены;

t – количество часов работы группы электродвигателей, ч.

По полученным результатам, срок окупаемости при внедрении электрических двигателей класса IE2 составляет в среднем два года. Электродвигатели IE3 являются более дорогостоящими, имеют иные механические характеристики и приводят к окупаемости значительно позже.

Далее проведем технико-экономический расчет внедрения частотных преобразователей. Стоимость частотных преобразователей примем согласно каталогам производителей.

При производстве железобетонных конструкций электродвигатели предприятия задействованы в среднем на 50-55%. Поэтому использование преобразователей частоты позволит снизить потери электроэнергии.

Расчет экономии электроэнергии для каждого электродвигателя представлен в таблице 5.

Простой срок окупаемости рассчитывается как отношение стоимости оборудования к экономии электроэнергии в рублях.

Таблица 5 – Техничко-экономический расчет частотных преобразователей

Месторасположение	Оборудование	Электродвигатель				n, шт	Стоимость частотного преобразователя, тыс. руб	Годовое электропотребление, кВтч	Годовое потребление при работе частотного преобразователя, кВтч	Экономия		Простой срок окупаемости, лет
		Тип	η	cos ϕ	P, кВт					кВтч/год	тыс. руб	
Арматурный цех	Кузнечнопрессовые станки	АИС 132М4-IE2	0,89	0,83	7,5	4	52,5	10950	6554,20	17583,17	78,42	2,68
	Оборудование вальцовки листового металла	АИС 250М2-IE2	0,93	0,89	55	1	385	80300	46465,25	33834,74	150,90	2,55
	Гильотины	АИС 250М6-IE2	0,92	0,83	37	2	259	54020	34027,21	39985,58	178,34	2,90
	Гидравлический пресс	АИС 250М2-IE2	0,93	0,89	55	1	385	80300	48870,02	31429,98	140,18	2,75
	Молот	АИС 250М6-IE2	0,92	0,83	37	1	259	54020	34777,62	19242,38	85,82	3,02

Продолжение таблицы 5

Месторасположение	Оборудование	Электродвигатель				n, шт	Стоимость частотного преобразователя, тыс. руб	Годовое электропотребление, кВтч	Годовое потребление при работе частотного преобразователя, кВтч	Экономия		Простой срок окупаемости, лет
		Тип	η	$\cos\phi$	P, кВт					кВтч/год	тыс. руб	
Цех по изготовлению ж/б изделий	Бетонные смесители	АИС 132М4-IE2	0,89	0,83	7,5	10	52,5	10950	7077,47	38725,24	172,71	3,04
	Пневмоустановка	АИС180М2-IE2	0,91	0,89	22	6	154	32120	19019,58	78602,47	350,57	2,64
	Подъемно-транспортный механизм	АИС180М2-IE2	0,91	0,89	22	8	154	32120	19133,75	103889,94	463,35	2,66
РМЦ	Токарные станки	АИС 112М2-IE2	0,86	0,88	4	14	28	5840	3272,971993	35938,39	160,29	2,45
	Фрезерные станки	АИС 112 М2-IE2	0,86	0,88	4	6	28	5840	3796	12264,00	54,70	3,07
	Сверлильные станки	АИС 132М4-IE2	0,89	0,83	7,5	8	52,5	10950	7117,5	30660,00	136,74	3,07
	Шлифовальные станки	АИС 112 М2-IE2	0,86	0,88	4	6	28	5840	3796	12264,00	54,70	3,07

Продолжение таблицы 5

Месторасположение	Оборудование	Электродвигатель				n, шт	Стоимость частотного преобразователя, тыс. руб	Годовое электропотребление, кВтч	Годовое потребление при работе частотного преобразователя, кВтч	Экономия		Простой срок окупаемости, лет
		Тип	η	cos ϕ	P, кВт					кВтч/год	тыс. руб	
Цех опалубки	Деревообрабатывающие станки	АИС 132М4-IE2	0,89	0,83	7,5	3	52,5	10950	6924,331232	12077,01	53,86	2,92
Компрессорная	Компрессоры	АИС 315М4-IE2	0,95	0,89	132	4	924	192720	112074,2969	322582,81	1438,72	2,57
Заготовительные цеха	Ленточные пилы	АИС 315М2-IE2	0,95	0,9	132	6	924	192720	110813,7607	491437,44	2191,81	2,53
	Гильотины	АИС 250М6-IE2	0,92	0,83	37	4	259	54020	33041,75603	83912,98	374,25	2,77
Котельная, административный корпус	Циркуляционные насосы системы отопления и ГВС	АИС 112 М2-IE2	0,86	0,88	4	6	28	5840	3345,548213	14966,71	66,75	2,52

Продолжение таблицы 5

Месторасположение	Оборудование	Электродвигатель				n, шт	Стоимость частотного преобразователя, тыс. руб	Годовое электропотребление, кВтч	Годовое потребление при работе частотного преобразователя, кВтч	Экономия		Простой срок окупаемости, лет
		Тип	η	cos ϕ	P, кВт					кВтч/год	тыс. руб	
Административный корпус	Вентиляционные установки	АИС 132М4-IE2	0,89	0,83	7,5	8	52,5	10950	6830,408332	32956,73	146,99	2,86
Котельная		АИС 250М6-IE2	0,92	0,83	37	4	259	54020	34086,06398	79735,74	355,62	2,91
Гараж		АИС 250М4-IE2	0,94	0,86	55	3	385	80300	49780,04839	91559,85	408,36	2,83
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1583649,2	7063,07	–

3.2 Техничко-экономический расчет мероприятий по компенсации реактивной мощности

Приведем в таблице 6 результаты расчета нагрузок по фидерам. С использованием данных расчетов выберем соответствующие компенсирующие устройства.

«Большинство промышленных потребителей электроэнергии наряду с активной мощностью потребляют и реактивную мощность, которая расходуется на создание электромагнитных полей и является бесполезной. Наличие в электросети реактивной мощности снижает качество электроэнергии, приводит к увеличению платы за электроэнергию, дополнительным потерям и перегреву проводов, перегрузке подстанций, необходимости завышения мощности силовых трансформаторов и сечения кабелей, просадкам напряжения в электросети» [22].

Проведем расчет мощности АУКРМ для достижения значения коэффициента мощности 0,95.

Расчетная мощность АУКРМ:

$$Q_{\text{кв}} = \theta \cdot P_p \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \quad (2)$$

$$Q_{\text{кв}} = 0,9 \cdot 1856,74 \cdot (0,75 - 0,33) = 701,85 \text{ квар}$$

где θ – коэффициент, учитывающий повышение коэффициента мощности;

$\operatorname{tg} \varphi_1$ – значение коэффициента до компенсации;

$\operatorname{tg} \varphi_2$ – значение коэффициента после компенсации.

Таблица 6 – Расчет нагрузок и мощности АУКРМ

Фидер	P_p	Q_p	$\cos\varphi$	S_p	I_p	Q'_{ky}	$Q_{p'}$	$\cos\varphi$	$S_{p'}$	$I_{p'}$
	кВт	квар	–	кВА	А	квар	квар	–	кВА	А
12П/ф1	100,45	83,202	0,77	130,433	188,264	35	48,20	0,90	111,416	160,816
12П/ф2	134,75	108,486	0,78	172,994	249,695	35	73,49	0,88	153,485	221,537
12П/ф3	66,15	81,34	0,63	104,843	151,328	35	46,34	0,82	80,7664	116,576
12П/ф4	73,50	89,18	0,64	115,565	166,804	40	49,18	0,83	88,436	127,646
34П/ф3	59,78	49,49	0,77	77,6074	112,017	20	29,49	0,90	66,6581	96,2127
11П/ф1	122,60	91,924	0,80	153,233	221,172	35	56,92	0,91	135,169	195,099
11П/ф2	149,45	112,014	0,80	186,768	269,577	40	72,01	0,90	165,896	239,45
11П/ф3	190,61	148,96	0,79	241,912	349,169	60	88,96	0,91	210,347	303,61
11П/ф4	207,56	164,15	0,78	264,628	381,958	64,8	99,35	0,90	230,116	332,143
11П/ф5	38,71	29,106	0,80	48,4316	69,905	10	19,11	0,90	43,1683	62,3081

Продолжение таблицы 6

Фидер	P_p	Q_p	$\cos\varphi$	S_p	I_p	Q'_{ky}	$Q_{p'}$	$\cos\varphi$	$S_{p'}$	$I_{p'}$
	кВт	квар	–	кВА	А	квар	квар	–	кВА	А
32П/ф2	44,20	33,222	0,80	55,2916	79,8066	12,6	20,62	0,91	48,7722	70,3966
12П/ф7	102,31	76,342	0,80	127,655	184,254	30	46,34	0,91	112,318	162,117
12П/ф8	118,38	142,688	0,64	185,404	267,608	64,8	77,89	0,84	141,709	204,539
11П/ф5	121,62	124,068	0,70	173,735	250,765	55	69,07	0,87	139,862	201,873
11П/ф8	164,35	167,678	0,70	234,788	338,888	70	97,68	0,86	191,182	275,948
12П/ф9	66,05	76,048	0,66	100,728	145,389	32,4	43,65	0,83	79,1708	114,273
12П/ф10	80,36	92,316	0,66	122,393	176,659	40	52,32	0,84	95,889	138,404
11П/ф6	87,51	69,972	0,78	112,048	161,728	27,5	42,47	0,90	97,2757	140,405
11П/ф7	66,54	40,964	0,85	78,1402	112,786	10	30,96	0,91	73,3935	105,934

Коэффициент потерь $K_{\text{п}}$ для производств принимается равным 0,08 [15].

Годовая экономия электроэнергии после установки УРКМ:

$$W_{\text{эк}} = W_{\text{год}} \cdot \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2}\right) \cdot K_{\text{п}} \quad (3)$$

$$\frac{W_{\text{эк}}}{W_{\text{год}}} = \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2}\right) \cdot K_{\text{п}} \quad (4)$$

где « $W_{\text{год}}$ – годовое потребление энергии;

$\cos^2 \varphi_1$ и $\cos^2 \varphi_2$ – величины коэффициента мощности до и после внедрения УРКМ соответственно» [6].

Результаты расчетов представим в таблице 7.

Таблица 7 – Расчет окупаемости АУКРМ

Фидер	Цена руб	Wгод кВтч/год	Экономия			Простой срок окупаемости, лет
			%	кВтч/год	тыс. руб	
12П/ф1	46710	293314	2,16	6343,431	28,292	1,65
12П/ф2	46710	393470	1,70	6699,067	29,878	1,56
12П/ф3	46710	193158	3,25	6282,264	28,019	1,67
12П/ф4	48440	214620	3,32	7115,024	31,733	1,53
34П/ф3	41520	174558	2,10	3662,432	16,334	2,54
11П/ф1	46710	357986	1,77	6354,243	28,340	1,65
11П/ф2	48440	436394	1,69	7367,257	32,858	1,47
11П/ф3	55360	556581	1,95	10861,43	48,442	1,14
11П/ф4	57020,8	606087	1,95	11822,48	52,728	1,08
11П/ф5	38060	113033	1,64	1858,63	8,289	4,59
32П/ф2	38959,6	129058	1,78	2291,208	10,219	3,81
12П/ф7	44980	298751	1,81	5397,985	24,075	1,87
12П/ф8	57020,8	345681	3,33	11499,02	51,286	1,11

Продолжение таблицы 7

Фидер	Цена руб	Wгод кВтч/год	Экономия			Простой срок окупаемости, лет
			%	кВтч/год	тыс. руб	
11П/ф5	53630	355125	2,82	9998,218	44,592	1,20
11П/ф8	58820	479890	2,70	12936,19	57,695	1,02
12П/ф9	45810,4	192872	3,06	5897,685	26,304	1,74
12П/ф10	48440	234651	3,09	7249,801	32,334	1,50
11П/ф6	44115	255541	1,97	5035,124	22,457	1,96
11П/ф7	38060	194303	0,94	1831,125	8,167	4,66

Выводы по третьему разделу

Для снижения потерь электрической энергии были установлены двигатели класса IE2. Потери снижены на 2033 МВтч/год при работе предприятия в одну смену. Расход электроэнергии определялся исходя из неполной нагрузки электродвигателей.

Поскольку технологическое оборудование работает при неполной нагрузке, то были установлены частотные преобразователи, снизившие потери электроэнергии на 1583 МВтч/год.

Компенсация реактивной мощности позволила снизить нагрузку на электрооборудование, необходимого для электроснабжения завода, а также снизить потери электроэнергии на 2,2%.

Заключение

При проведении исследования на первом этапе был проведен анализ энергетической стратегии Российской Федерации, проанализирована существующая законодательная и нормативно-правовая базы.

Проанализирована энергетическая эффективность промышленного сектора Российской Федерации, на основании которого мы определили, что в промышленную сферу требуются капиталовложения для достижения требуемого уровня энергоэффективности.

Исходными данными объекта исследования являются производственные цеха и помещения, а также их потребление. Далее проанализировано энергопотребление завода ЖБК для определения приоритетных направлений, в которых будут проведены мероприятия по повышению энергетической эффективности.

Электрическая энергия в большей степени затрачивается на работу электроприводов, станков, технологических агрегатов.

В следствие этого для повышения энергетической эффективности исследуемого объекта был проведен анализ различных способов повышения энергетической эффективности, применяемых в других сферах промышленности. Были использованы следующие мероприятия по повышению энергоэффективности:

- для снижения рабочих токов, а также потерь электрической энергии были проведены мероприятия по компенсации реактивной мощности. Компенсирующие устройства позволили снизить нагрузку на электрооборудование, необходимого для электроснабжения завода ЖБК, а также снизить потери электроэнергии на 2,2%. Это является важным поскольку появится возможность для расширения производства железобетонной продукции не изменяя схему электроснабжения предприятия.

- монтаж двигателей класса IE2 позволил снизить потери на 2033 МВтч/год при работе предприятия в одну смену. Средний простой срок окупаемости при внедрении электрических двигателей составляет в среднем 2 года при частичной нагрузке.
- установка частотных преобразователей на технологическое оборудование, работающее при неполной нагрузке, позволило снизить потери электроэнергии на 1583 МВтч/год. Простой срок окупаемости составляет примерно 3 года.

Научная новизна работы заключается в том, что в ходе проведения исследования были применены современные методики по повышению энергетической эффективности рассматриваемого завода по производству ЖБК, которые объединены в одном объекте исследования.

Практическая значимость работы заключается в том, что внедрение мероприятий по повышению энергоэффективности предприятия промышленной отрасли позволяет снизить затраты на производство ЖБК.

Список используемых источников

1. Анчарова Т.В., Рашевская М.А., Стебунова Е.Д. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений : учебник / Т.В. Анчарова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2020. 415 с.
2. Артющкин В.Н., Тянь В.К. Энергосбережение при эксплуатации магистральных насосных агрегатов : монография / В.Н. Артющкин, Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. 112 с.: ил., табл.
3. Афонин А. М., Царегородцев Ю.Н., Петрова А.М., Петрова С.А. Энергосберегающие технологии в промышленности : учебное пособие / А.М. Афонин. 2-е изд. Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2020. 271 с.
4. Вагин Г.Я., Коровин В.А., Леушин И.О., Лоскутов А.Б. Ресурсо- и энергосбережение в литейном производстве : учебник / Г.Я. Вагин. 2-е изд. испр. и доп. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2020. 254 с.
5. Васильев Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода. Учебник. М.: СОЛОН-Пресс, 2020. 268 с.
6. Для чего нужен УКРМ? [Электронный ресурс] : Официальный сайт диллера электрооборудования Ortea. URL: http://orteastore.ru/info/dlya_chego_ukrm/ (дата обращения: 16.01.2021).
7. Жук В.Л., Заика В.И., Тупилко И.В. Оптимизация энергозатрат в металлургических технологиях : учебное пособие / В.Л. Жук; под ред. д.т.н., проф. А.А. Троянского. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. 212 с.
8. История компании ЗАО ЖБК Тольяттинское [Электронный ресурс] : Официальный сайт ЗАО ЖБК «Тольяттинское». URL: <https://zhbck.ru/about/> (дата обращения 01.04.2022).
9. Каржавин В.В., Каменских С.Ф. Краны машиностроительных предприятий. [Электронный ресурс] : Электронный архив Российского государственного профессионально-педагогического университета. URL: https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/18358/1/978-5-8050-0345-6_2008.pdf (дата обращения 01.04.2022).

10. Колесников А.И., Федоров М.Н., Варфоломеев Ю.М. Энергосбережение в промышленных и коммунальных предприятиях: Учебное пособие / Под общ.ред. М.Н. Федорова. М.: ИНФРА-М, 2010. 124 с.

11. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Энергосбережение в котельных установках ТЭС и систем теплоснабжения : монография / А.А. Кудинов. Москва : ИНФРА-М, 2021. 320 с.

12. Куликова Л.В., Дробязко О. Н. Общая энергетика : учебное пособие / Л. В. Куликова. 2-е изд. перераб. Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2020. 178 с.

13. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года [Электронный ресурс] : Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 г. N 1523-р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565068231> (дата обращения 01.04.2021).

14. Правила устройства электроустановок. 7-е издание / Ред. Л.Л. Жданова, Н. В. Ольшанская. М.: НЦ ЭНАС, 2013. 104 с.

15. Преобразователи частоты позволяют снизить энергопотребление и повысить эффективность холодильных машин [Электронный ресурс] : Официальный сайт Danfoss. URL: <https://drives.ru/stati/preobrazovateli-chastoty-pozvolyayut-snizit-energopotreblenie-i-povysit-effektivnost-holodilnyh-mashin/> (дата обращения 02.08.2021).

16. Привод компрессоров [Электронный ресурс] : интернет-ресурс. URL: <http://www.stroitelstvo-new.ru/holodilnye-ustanovki/privod-kompressorov.shtml> (дата обращения 02.08.2021).

17. Проектирование бетоносмесительных предприятий по производству бетонных и железобетонных изделий и конструкций [Электронный ресурс] : учеб. пособие. URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/77624/1/978-5-7996-2781-2_2019.pdf (дата обращения 24.03.2023).

18. Протасевич А.М. Энергосбережение в системах теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха : учебное

пособие / А.М. Протасевич. Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2021. 286 с.

19. Прямые и косвенные энергозатраты при производстве бетонных и железобетонных изделий, конструкций и сооружений [Электронный ресурс] : Официальный сайт научное электронной библиотеки КиберЛенинка. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pryamyie-i-kosvennyie-energozatraty-pri-proizvodstve-betonnyh-i-zhelezobetonnyh-izdeliy-konstruktsiy-i-sooruzheniy> (дата обращения 01.04.2021).

20. Ручкина Г.Ф. Энергоснабжение и энергоэффективность: актуальные проблемы правового регулирования : монография / Г.Ф. Ручкина, М.В. Демченко, А.В. Барков [и др.]. Москва : ИНФРА-М, 2022. 201 с.

21. Сибикин Ю.Д. Технология энергосбережения: учебник / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. 4-е изд., перераб. и доп. Москва : ИНФРА-М, 2022. 336 с.

22. Увеличение энергоэффективности путем компенсации реактивной мощности [Электронный ресурс] : Официальный сайт поставщика оборудования НПП «РУМИКОНТ». URL: <http://rumikont.com/articles/uvelichenie-energoeffektivnosti-putem-kompensatsii-reaktivnoy-moshchnosti/> (дата обращения: 14.01.2021).

23. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 23.11.2009 №261 (ред. от 26.01.2020). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ (дата обращения 01.04.2021).

24. Энергоэффективность на промышленном предприятии: тренды и технические решения. [Электронный ресурс] : Журнал-справочник «Рынок-электротехники». URL: <https://marketelectro.ru/content/energoeffektivnost-na-promyshlennom-predpriyatii-trendy-i-tehnicheskie-resheniya> (дата обращения 01.04.2021).

25. Энергоэффективность электродвигателей [Электронный ресурс] : Официальный сайт компании ООО «УЭСК». URL: <https://uesk.org/stati/energoeffektivnost-elektrodivigatelej/> (дата обращения 14.07.2022).

26. Benthaus M. A coupled technological-sociological model for national electrical energy supply systems including sustainability. *Energy, Sustainability and Society* Vol. 9, №1. 2019. p.1-16.

27. Donoso P., Schurch R., Ardila J., Orellana L. Analysis of Partial Discharges in Electrical Tree Growth Under Very Low Frequency (VLF) Excitation Through Pulse Sequence and Nonlinear Time Series Analysis. *IEEE Access* Vol. 8. 2020. p.673-684.

28. Escrivá-Escrivá G., Roldán-Blay C., Roldán-Porta C., Serrano-Guerrero X. Occasional Energy Reviews from an External Expert Help to Reduce Building Energy Consumption at a Reduced Cost. *Energies* Vol. 12, №15. 2019. 14 p.

29. Shabdin N.H., Padfield R. Sustainable Energy Transition, Gender and Modernisation in Rural Sarawak. *Chemical Engineering Transactions* vol.56, 2017. p.259-264.

30. Xiao Han, Jing Qiu, Lingling Sun, Wei Shen, Yuan Ma, Dong Yuan. Low- carbon energy policy analysis based on power energy system modeling. *Energy Conversion and Economics*. 2020. p.34-44.