

Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!

Если вы скопируете данный файл,

Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.

Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .

Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.

Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

О. В. ФЁДОРОВ

**ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

**Москва
ИНФРА-М
2011**

УДК 622:621.3
ББК 33.31
Ф 33

Рецензент:

доктор технических наук, профессор
Ю. В. Шевырев

Ф33 **Фёдоров, О. В. Оценки эффективности частотно-регулируемых электроприводов [Текст]: монография / О. В. Фёдоров. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 144 с.**

ISBN 978-5-16-012051-5

Для инженерно-технических работников, специализирующихся в области электромеханических систем и электросбережения средствами электропривода.

Может быть использована в учебном процессе соответствующих направлениях высшего профессионального образования, а также при выполнении соответствующих курсовых и дипломных проектов и работ студентами старших курсов.

УДК 622:621.3
ББК 33.31

ISBN 978-5-16-012051-5

© Фёдоров О.В., 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
Глава 1. Технологии реализации энергосберегающей политики.....	9
§ 1.1. Потребители электроэнергии.....	9
§ 1.2. Тенденции развития электроприводов металлургического производства.....	27
§ 1.3. Перспективы регулируемого электропривода.....	28
Глава 2. Влияние электропривода с вентильным преобразователем на качество электрической энергии.....	42
§ 2.1. Качество электроэнергии при работе электроприводов с полупроводниковыми преобразователями.....	42
§ 2.2. Особенности компенсации реактивной мощности в сетях с полупроводниковыми преобразователями.....	49
§ 2.3. Улучшение качества электроэнергии при работе электроприводов с полупроводниковыми преобразователями.....	51
§ 2.4. Методы повышения качества электроэнергии при работе частотно-регулируемого электропривода переменного тока.....	57
§ 2.5. Математические модели электротехнических комплексов, содержащих электроприводы с полупроводниковыми преобразователями.....	60
Глава 3. Оценки эффективности частотно-регулируемого электропривода в различных технологиях.....	79
§ 3.1. Оценка спектрального состава тока и напряжения электропривода подъемной машины.....	79
§ 3.2. Оценки свойств надежности электроприводов с полупроводниковыми преобразователями.....	85
§ 3.3. Частотно-регулируемый электропривод аппаратов воздушного охлаждения установки гидроочистки дизельного топлива.....	93
§ 3.4. Регулируемые электропривода в структуре ТЭЦ.....	99
§ 3.4.1. Электропривода собственных нужд.....	99
§ 3.4.2. Дутьевой вентилятор котлоагрегата.....	101

§ 3.4.3. Электропривод мазутного насоса.....	105
§ 3.4.4. Электропривод мазутного насоса газовой ТЭЦ....	112
§ 3.5. Высоковольтный электропривод блочной насосной атомной электростанции.....	113
§ 3.6. Высоковольтный электропривод водозабора.....	118
§ 3.7. Регулируемый электропривод в пожарном водоснабжении.....	121
§ 3.8. Определение областей эффективности регулируемых электроприводов.....	125
Литература.....	132
Приложения	
Приложение А. Список сокращений.....	136
Приложение Б. Маркировка насосов.....	138
Приложение В. Параметры консольных насосов.....	139
Приложение Г. Техничко-экономические показатели насосов серии Д.....	140
Приложение Д. Циркуляционный насос АЭС.....	141
Приложение Е. Электродвигатель HRQ3 803-6 циркуляционного насоса АЭС.....	142

ВВЕДЕНИЕ

Рост эффективности производства связан с развитием и совершенствованием электропривода - главного потребителя электроэнергии в промышленности. В настоящее время на него приходится около 60 % всей вырабатываемой в стране электроэнергии. Такое соотношение в электропотреблении, по прогнозам Института экономики Российской академии наук, сохранится и в будущем. Динамика потребления электроэнергии рядом отраслей промышленности приводится в научной и учебной литературе, а структура ее потребления базовыми отраслями машиностроения отражена в отчетах Госкомстата РФ. Стоимость собственно электрического хозяйства промышленных предприятий составляет 6 – 11 % (включая сооружения), а по отдельным объектам электроемких предприятий достигает 50 %. Однако предприятиям не всегда удается эффективно использовать электроэнергию: велики ее потери. Поэтому вопросам правильного формирования электрического хозяйства, с учетом специфики его эксплуатации, уделяется особое внимание.

На долю электроприводов приходится основная часть общих потерь электроэнергии в системе электроснабжения промышленных предприятий. Для современных крупных промышленных предприятий потери электроэнергии в электроприводе могут достигать 75 % суммарных потерь в системе их электроснабжения. Поэтому эффективное использование электроприводов имеет важное народнохозяйственное значение.

Разнообразие технологических требований к характеру и качеству механического движения предопределяет многообразие электроприводов по исполнению, принципу действия, роду тока, мощности, частоте вращения, точности и разнообразию пространственного движения. Подавляющее большинство современных технологических и производственных механизмов во всех отраслях народного хозяйства предъявляют к электроприводу определенные требования по диапазонам регулирования координат и качеству управления движением или вовсе не имеют таковых. Мощность таких электроприводов составляет от долей единиц до десятков киловатт, а число их – миллионы.

Из всей электроэнергии, потребляемой электроприводом в настоящее время, приблизительно 80 % приходится на простейший массовый нерегулируемый электропривод и 20 % – на регулируемый.

В соответствии с существующей в РФ статистической отчетностью учет производства электродвигателей, входящих в состав регулируемых и нерегулируемых электроприводов, осуществляется по двум группам их номинальной мощности (мощностью до 100 кВт и выше). В соответствии с этой отчетностью электродвигателей мощностью до 100 кВт промышленностью выпускается в количественном выражении около 95 % и лишь около 5 % – выше 100 кВт.

Электропривод, являясь продукцией машиностроения и входя в состав другой продукции различных отраслей промышленности, способствует повышению технической базы машиностроения и в, частности, самого электропривода (рис. В.1).

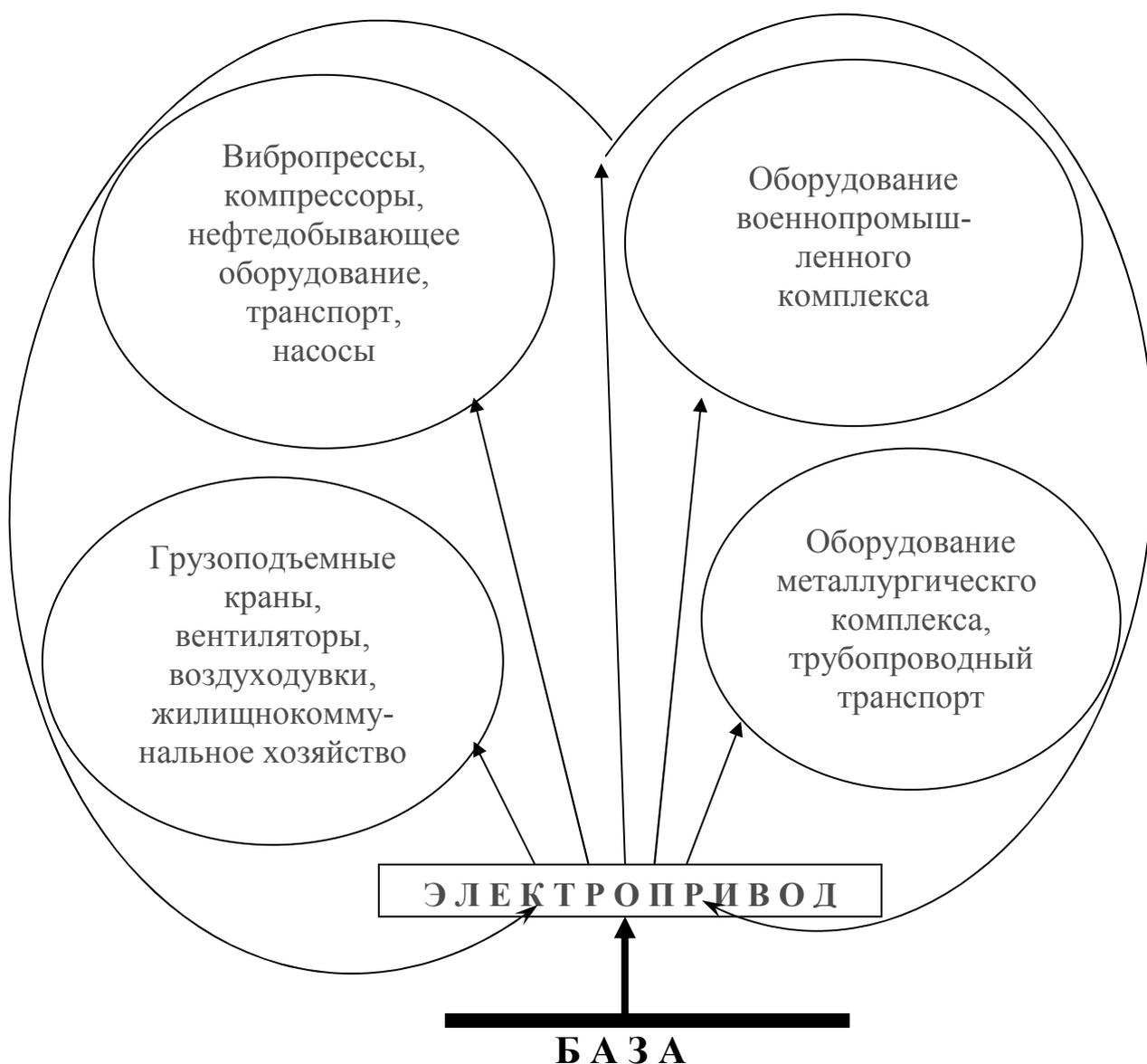


Рис. В.1. Электропривод в экономике страны

Электропривод, проходя последовательно этапы проектирования, изготовления, обращения и эксплуатации, потребляет все виды ресурсов (материальные, финансовые и трудовые). Особенно велико потребление этих ресурсов при эксплуатации.

Все отмеченные обстоятельства предполагают необходимость правильных оценок выбора электроприводов с позиций служб предприятия, ответственных за их эксплуатацию, из нескольких возможных альтернатив для конкретных производственных механизмов.

Глава 1. ТЕХНОЛОГИИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ПОЛИТИКИ

Эволюция человечества напрямую связана с ростом его энергетического потенциала и увеличением удельной энерговооружённости каждого члена общества, именно этот критерий является главным критерием прогресса общества.

Ситуация неизбежного исчерпания в будущем энергоресурсов усугубляется экспоненциальным ростом промышленного производства. Так, по оценкам ряда учёных в XX веке средний прирост мировой промышленности составлял 2-кратное увеличение каждые 20 лет. При сохранении этой тенденции и существующей сегодня энергоёмкости продукции к концу XXI века потребность в энергоресурсах может вырасти более чем в 30 раз по сравнению с нынешним их потреблением.

§ 1.1. Потребители электроэнергии

Потенциал энергосбережения в России по прогнозным оценкам составляет порядка 150 млрд кВт ч. Однако этот потенциал должным образом не используется. Российская экономика несет огромные непроизводительные потери электроэнергии, вызванные отсутствием или несовершенством способов регулирования и оптимизации технологических процессов в большинстве отраслей промышленности, электроэнергетике и коммунального хозяйства. В России до 40 % используемых энергоносителей расходуется нерационально, причем расход энергии на ВВП в 2,5 - 3 раза выше, чем в индустриально развитых странах мира. Поэтому в отличие от ориентации прежних лет на крупномасштабное наращивание электроэнергии приоритетом энергетической стратегии России до 2015 г. является повышение эффективности энергопроизводства и энергосбережения.

В настоящее время электропривод потребляет, по различным оценкам, до 60 % всей вырабатываемой в стране электроэнергии. Такое соотношение в электропотреблении, по оценкам специалистов института экономики РАН, сохранится и в будущем. На долю электродвигателей приходится и основная часть общих потерь в системе электроснабжения промышленных предприятий. Для современных крупных промышленных предприятий потери

электроэнергии в приводе могут достигать 75 % суммарных потерь в системе их электроснабжения. Поэтому вопросы энергоэффективности и электросбережения электроприводов имеют важное народнохозяйственное значение.

Распределение электроэнергии потребляемой электроприводами по технологическим механизмам характеризуется соотношениями: подъемно-транспортные механизмы и машины - 10 %; компрессоры - 10 %; вентиляторы - 40 %; насосы - 40 %. В основном эти электропривода являются нерегулируемыми. Переход от нерегулируемого к регулируемому электроприводу (РЭП) позволяет только от этого мероприятия достигать значительного результата за счет более полного использования электропривода и экономии электроэнергии до 30 - 40 %.

Основной целью российской инновационной политики должны стать изменения экономики в пользу наукоемких отраслей промышленности. При проведении этих изменений должны быть реализованы конкретные меры по повышению выживаемости новых высокотехнологических компаний, стимулирование закупок отечественной высокотехнологичной продукции, продвижение ее экспорта и стимулирование инновационной деятельности в контролируемых государством компаниях.

На рис. 1.1 представлены перспективы приоритетов развития федеральных целевых программ (ФЦП) научно-технологического комплекса России на период до 2012 года.

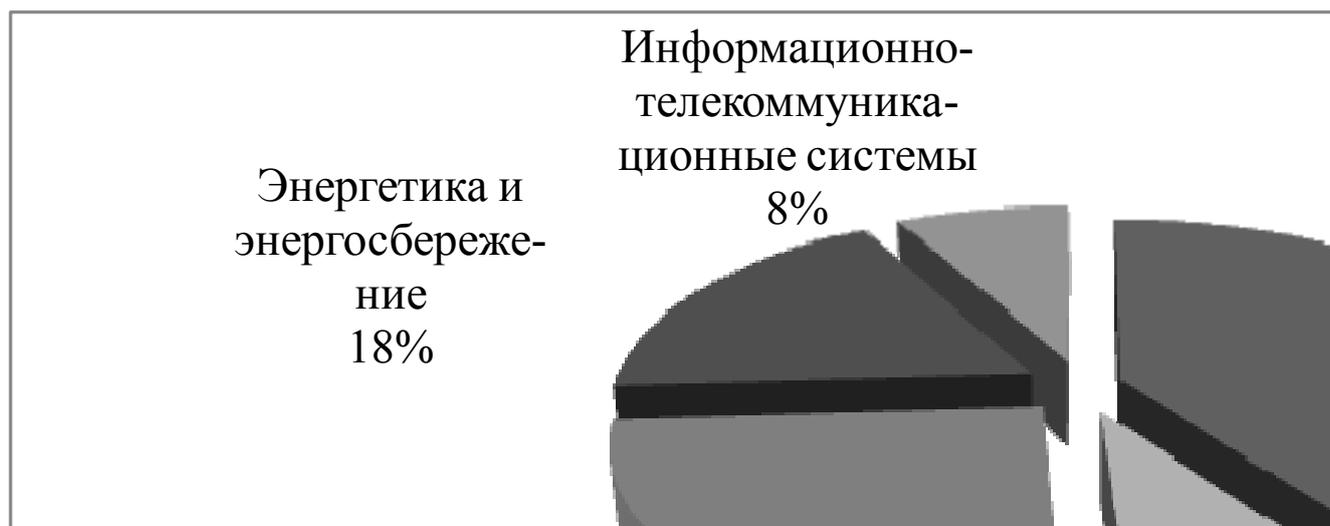


Рис. 1.1. Развитие научно-технологического комплекса по блокам

Наиболее массовыми электродвигателями являются асинхронные двигатели мощностью до 110 кВт, которые широко применяются во всех отраслях экономики в приводе насосов, вентиляторов, транспортеров, дробилок, воздуходувок, станочного оборудования (рис. 1.2).

В большинстве случаев в этих приводах установлены редукторы, имеющие низкое значение КПД. В работе показана необходимость разработок эффективных наиболее массовых электродвигателей для различных отраслей экономики и применения для них преобразователей частоты с целью необходимого регулирования скорости исполнительных механизмов.

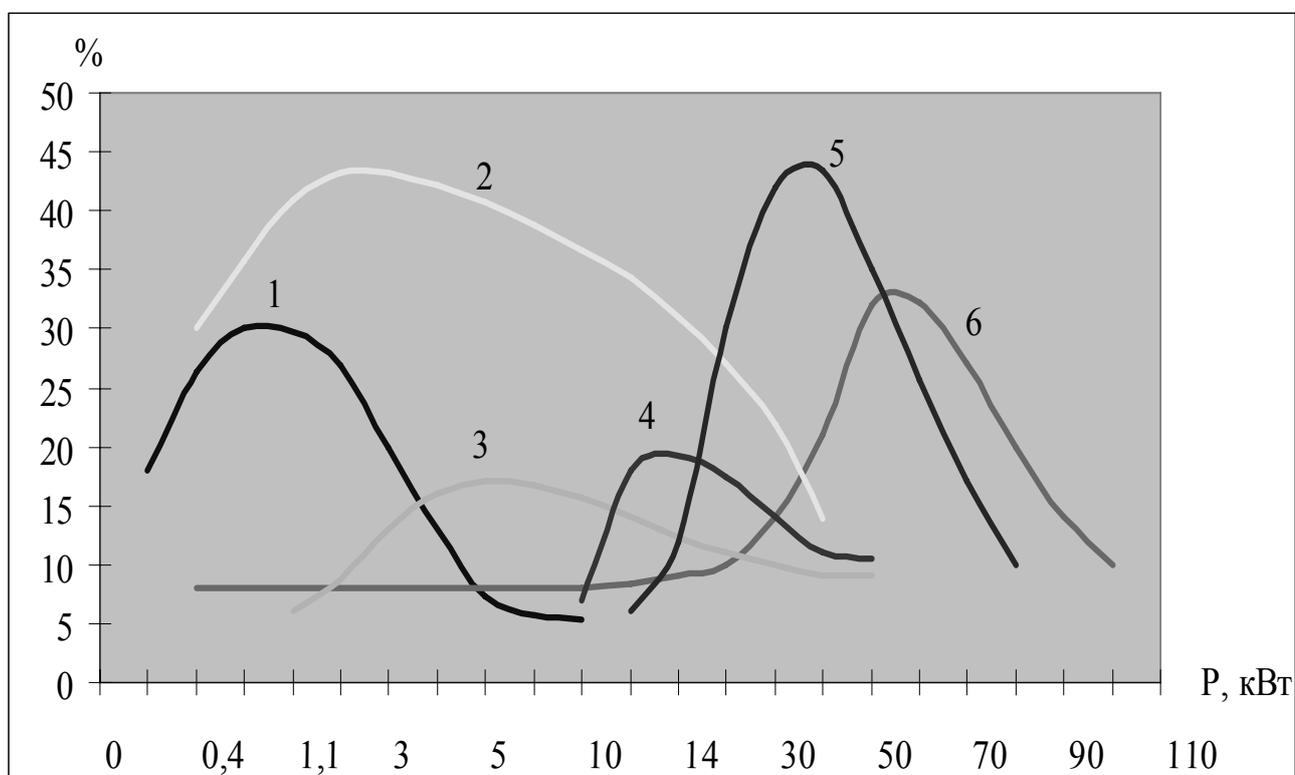


Рис. 1.2. Относительное применение асинхронных электродвигателей по технологическим агрегатам
1 – вентиляторы; 2 – насосы; 3 – транспортеры;
4 – воздуходувки; 5 – дробилки; 6 – станочное оборудование

Разработками энергоэффективных электродвигателей на базе серийных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей (АД) занимаются многие научные школы, в том числе, научная группа

О.О. Муравлевой (г. Томск). Повышение коэффициента полезного действия эта группа осуществляет за счет массы активных материалов (меди) при неизменной поперечной геометрии двигателя (осуществляется увеличение длины двигателя) или переход на двигатели с большей высотой оси вращения. В частности, приводятся изменение потерь в АД при увеличении расхода активных материалов при достижении уровней энергоэффективности EFF1 и EFF2. Снижение электрических потерь в АД (рис. 1.3, а) происходит за счет увеличения диаметра обмоточного провода фазы статора при уменьшении числа витков обмотки фазы статора. Однако с ростом номинальной мощности проектируемого энергоэффективного АД происходит рост магнитных потерь, что связано с перераспределением активной и реактивной составляющей мощностей АД. Таким образом, уровень энергоэффективности EFF2 достигается при снижении электрических потерь в статоре на 5...28 %, электрических потерь в роторе на 6... 15 %, и увеличении потерь в стали около 1...9 %. Уровень энергоэффективности EFF1 достигается при снижении электрических потерь в статоре на 34...55 %, электрических потерь в роторе на 26...45 %, и увеличении магнитных потерь в стали около 7...48 %. Таким образом, уровень энергоэффективности EFF2 достигается при суммарном снижении потерь на 5...21%, а EFF1 на 23...44 %.

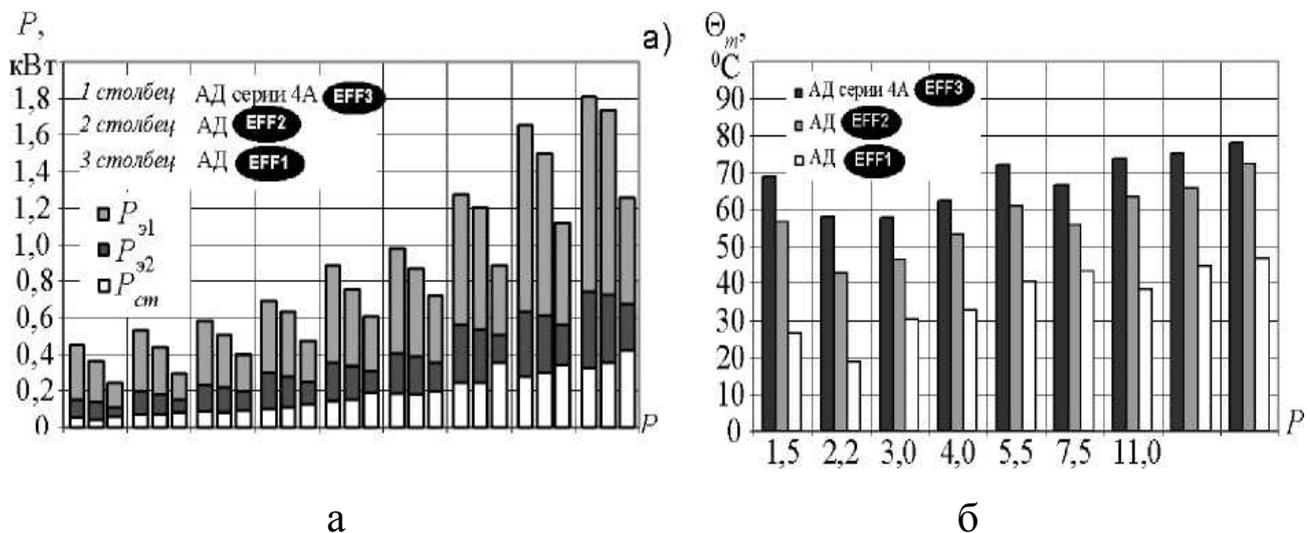


Рис. 1.3. Изменение потерь АД (а) и превышения температуры обмоток статора (б) при переходе на различные уровни энергоэффективности и сохранении поперечной геометрии

Снижение потерь при работе АД позволяет снизить также среднее превышение температуры обмотки статора. На рис. 1.3, б представлено изменение превышения температуры обмотки статора при переходе на различные уровни энергоэффективности, чем выше уровень энергоэффективности, тем, за счет снижения электрических потерь в статоре и роторе, больше оказывается снижение среднего превышения температуры обмотки статора. Значение среднего превышения температуры обмотки статора позволяет ориентировочно судить о надежности спроектированной электрической машины. В среднем при переходе на уровень EFF2 снижение превышения температуры обмотки статора происходит на 15,8 °С, а при проектировании АД с уровнем EFF1 на 39,9 °С.

В приводимой табл. 1.1 отражены сроки окупаемости затрат, связанных с разработкой энергоэффективных АД до уровней EFF1 и EFF2.

Т а б л и ц а 1.1

Диапазон изменения срока окупаемости

Тип АД	Мощность АД, кВт			
	11,0	18,5	30,0	45,0
Российский уровень цен, ежегодный рост 10 и 25 %				
Базовый АД	1,31-1,37	1,82-1,87	1,03-1,05	1,08-1,12
Энергоэффективный АД	1,22-1,28	1,72-1,77	0,94-0,95	0,98-1,02
Европейский уровень цен, ежегодный рост 5 %				
Базовый АД	0,34-0,36	0,48-0,49	0,27	0,28-0,29
Энергоэффективный АД	0,26-0,27	0,38-0,39	0,18	0,19-0,20

Сроки окупаемости при реализации различных законов управления получаются от одного до двух лет (российский уровень цен). За счет увеличения экономии электроэнергии при реализации европейского сценария происходит снижение срока окупаемости.

Учитывая диапазон изменения срока окупаемости при всех законах регулирования следует отметить, что закон регулирования не влияет на сроки окупаемости как для базового, так и для энергоэффективного АД. При европейском уровне цен период окупаемости значительно меньше, чем при российском, и, в среднем, составляет 0,35 года для базового АД и 0,26 года для энергоэффективного АД. При российском уровне цен сроки окупаемости, в среднем, получились следующие: для базового АД - 1,33 года, для энергоэффективного АД - 1,24 года.

Наличие граничных значений полезных свойств изделий для данного технологического способа производства отнюдь не означает, что эти значения являются предельными. Их надо улучшать и дальше, но другими технологическими способами их производства. Автором были выполнены исследования (1991 г.) по повышению численного значения коэффициента полезного действия мощных электродвигателей. На рис. 1.4 в качестве примера показано корреляционное поле, характеризующее взаимосвязь между оптовой ценой и коэффициентом полезного действия асинхронных двигателей трехфазных с короткозамкнутым ротором серии АДТ-2. Для исследования было взято 35 типов асинхронных двигателей. На корреляционном поле цифрами отмечены их порядковые номера. Эта взаимосвязь имеет нелинейный характер. Если повышение КПД с 95 до 96 % увеличивает оптовую цену приблизительно на 7500 руб., то увеличение с 96 до 97 % повышает оптовую цену более, чем на 30 тыс. руб. Увеличение КПД выше 96 % довольно резко повышает оптовую цену, а следовательно, и необходимые затраты. В этой связи целесообразно определить предельный уровень КПД, который целесообразно достичь при соответствующей технологии производства электродвигателей. Этот уровень равен тому значению, для которого экономический эффект, получаемый от экономии электроэнергии за счет увеличения КПД, равен затратам, необходимым для достижения этого уровня. Приближенные расчеты показывают, что увеличение КПД на 0,1 % обеспечивает экономию электроэнергии за весь срок эксплуатации двигателя мощностью 4000 кВт приблизительно в 3000 руб. Как видно на рис. 1.4, увеличение КПД на 0,1 % приводит к увеличению оптовой цены на 3000 руб. для двигателей с КПД, равным приблизительно 96,7 %.

Следовательно, для данного технологического способа производства увеличение его выше 96,7 % экономически нецелесообразно. Дальнейшее повышение КПД целесообразно лишь при разработке новых, более экономичных и технологических способов его увеличения.

Довольно часто функционально-стоимостной анализ (ФСА) позволяет выявить новые более эффективные технологические решения. Это бывает в тех случаях, когда исследователям удается абстрагироваться от привычных технологических решений, когда при поиске оптимальных технологических и конструкционных решений они руководствуются необходимостью достижения заданных параметров изделия и когда не имеет значения, из чего и каким образом изготовлено данное изделие.

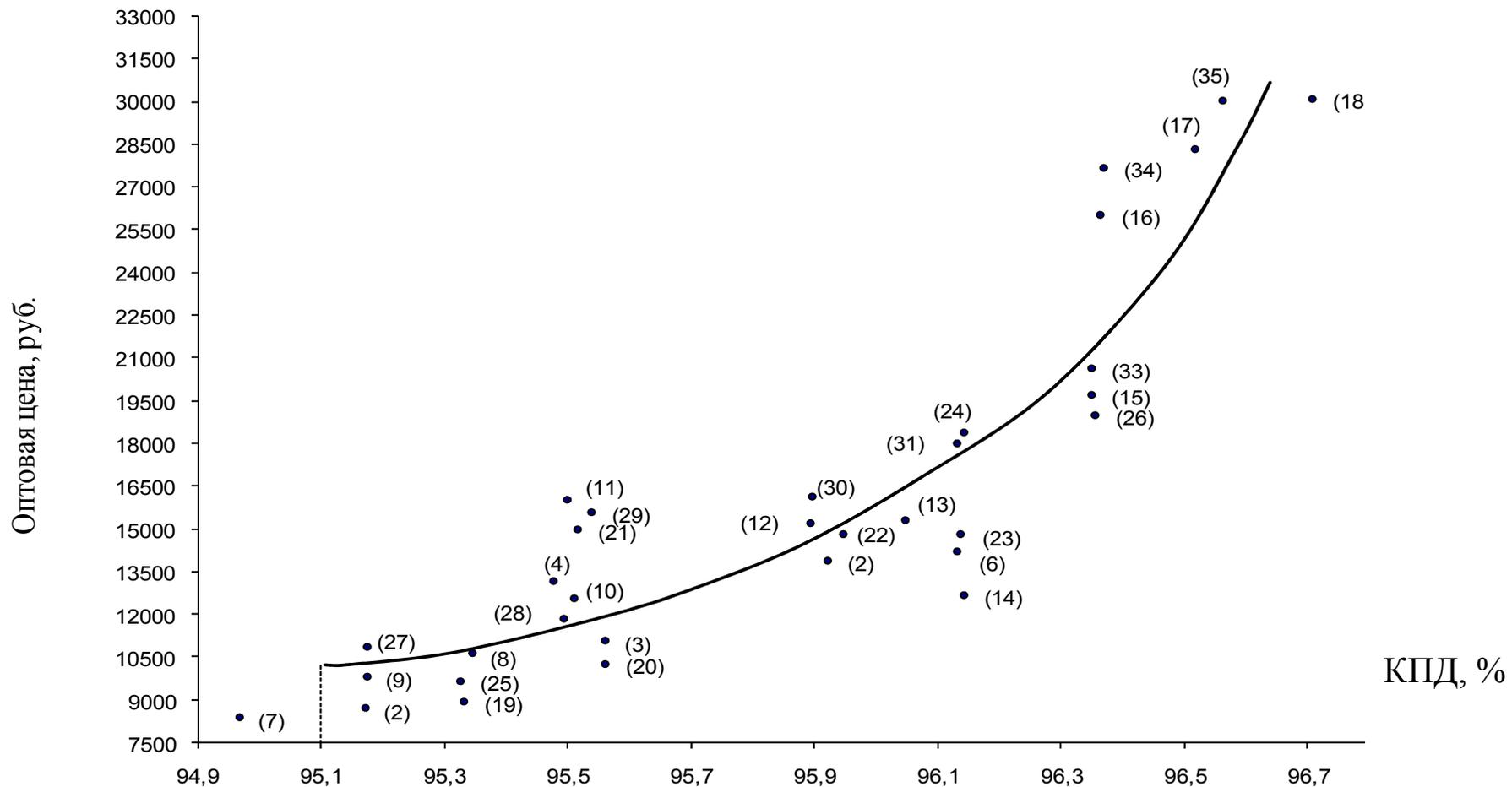


Рис. 1.4. Корреляционное поле, характеризующие взаимосвязь между оптовой ценой и КПД асинхронных электродвигателей

Вполне очевидно, что получить изделие, выполняющее необходимые функции, можно многими способами.

Как показывает практика применения ФСА, значительным резервом снижения себестоимости продукции и повышения ее полезных свойств является комплексное исследование затрат и полезных свойств отдельных узлов и деталей изделия. Главным при проведении этих исследований является комплексное согласование технико-экономических показателей отдельных узлов и деталей изделия.

При проведении ФСА следует помнить также, что не всякое улучшение того или иного параметра будет приводить к росту экономического эффекта у потребителя, а следовательно, и к росту потребительской стоимости изделия.

Довольно часто имеют место случаи, когда изготовители, стремясь повысить качество, повышают отдельные полезные свойства изделия выше необходимого для потребителя уровня. Поэтому при проведении ФСА следует определить наиболее рациональные уровни каждого из полезных свойств изделия. При этом особое внимание обращается на улучшение тех полезных свойств или потребительских стоимостей отдельных узлов и деталей, которые улучшают потребительскую стоимость изделия в целом.

При проведении ФСА нормативно-параметрические методы находят самое широкое применение. Дело в том, что многие группы изделий характеризуются, как правило, несколькими полезными параметрами. Причем эти параметры в большинстве случаев взаимосвязаны между собой. Поэтому при проведении ФСА необходимо исследовать «частное» влияние на численное значение ЭП одного из полезных параметров изделия при исключении влияния на эту взаимосвязь других параметров. Эта задача может быть решена применением нормативно-параметрических уравнений. Рассмотрим нормативно-параметрическое уравнение для расчета оптовых цен на тиристоры в зависимости от значений двух параметров – силы тока и напряжения.

$$\begin{aligned} Ц = 2,023 + 0,05X_1X_2 + 1,022X_1^2X_2^2 + 0,004X_1^2 + \\ + 1,101X_2 - 0,094X_1 + 0,0001X_1^2X_2, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где X_1 – сила тока, А; X_2 – напряжение, В.

Для исследования «частного» влияния на изменение оптовой цены прироста одного из исследуемых параметров необходимо в уравнение подставить численные значения остальных параметров, соответствующих тем значениям, при которых исследуется взаимосвязь между ценой и интересующим параметром. Так, если интересует изменение оптовой цены от напряжения при силе тока, равной 10 А, то уравнение (1.1) для исследования этого явления будет иметь вид

$$\begin{aligned} Ц &= 2,023 + 0,05 \cdot 10 X_2 + 1,022 \cdot 10^2 X_2^2 + 0,004 \cdot 10^2 + \\ &+ 1,101 X_2 - 0,094 \cdot 10 + 0,0001 \cdot 10^2 X_2 = \\ &= 1,483 + 0,611 X_2 + 102,2 X_2^2 . \end{aligned} \quad (1.2)$$

Следовательно, в зависимости от величины силы тока, уравнение (1.2), моделирующее взаимосвязь оптовой цены от напряжения, существенно изменяется.

Для более качественного отбора показателей, включаемых в уравнения регрессии, целесообразно исследовать взаимосвязь между ЭП и технико-экономическими показателями. Наиболее часто эти взаимосвязи исследуют путем расчета и изучения коэффициентов парной корреляции r , которые изменяются от - 1 до + 1. Если связь между показателями отсутствует, то коэффициент корреляции равен нулю. Чем ближе значение коэффициента корреляции к - 1, тем более существенна связь между исследуемыми показателями. Отрицательное значение коэффициента корреляции указывает на наличие обратной связи между исследуемыми показателями, т.е. при возрастании одного показателя второй снижается и наоборот (например, взаимосвязь между себестоимостью и объемом производства изделия).

Для удобства изучения взаимосвязей между всеми исследуемыми показателями коэффициенты корреляции удобно сводить в единую таблицу. В табл. 1.2 приведены коэффициенты корреляции между оптовой ценой и технико-экономическими показателями по электродвигателям асинхронным трехфазным с короткозамкнутым ротором серии АД-2. Из этой таблицы видно, что цена на асинхронные двигатели более жестко связана с массой ($r = 0,96$), достаточно жестко связана с мощностью ($r = 0,87$), менее жестко связана с КПД ($r = 0,66$). Следует отметить также наличие очень жесткой связи, практически функциональной, между полной себестоимостью и себестоимостью за вычетом материалов.

Т а б л и ц а 1.2

**Коэффициенты корреляций между оптовой ценой
и технико-экономическими показателями асинхронных электродвигателей**

Показатели	Мощность, X_1	КПД, X_2	Масса, X_3	Цена, X_4	Полная себестоимость, X_5	Себестоимость за вычетом материалов, X_6	Число оборотов, X_7
Мощность, X_1	1,000	0,850	0,760	0,870	0,860	0,860	0,260
КПД, X_2	0,850	1,000	0,500	0,660	0,640	0,640	0,210
Масса, X_3	0,760	0,500	1,000	0,960	0,970	0,970	0,260
Цена, X_4	0,870	0,660	0,960	1,000	0,998	0,998	0,330
Полная себестоимость, X_5	0,860	0,640	0,970	0,998	1,000	1,000	0,310
Себестоимость за вычетом материалов X_6 ,	0,860	0,640	0,970	0,998	1,000	1,000	0,310
Число оборотов, X_7	0,260	0,210	0,260	0,330	0,310	0,310	1,000

Таким образом, расчет матрицы коэффициентов парной корреляции позволяет получить достаточно ценный материал об исследовании взаимосвязей между оптовой ценой и показателями изделий.

Для более качественного изучения взаимосвязей между оптовой ценой и параметрами изделий с расчетом и изучением матрицы коэффициентов корреляции целесообразно бывает исследовать взаимосвязи с применением корреляционных полей.

На первом этапе построения корреляционного поля проводят оси координат и наносят на них шкалы для измерения исследуемых показателей. После этого на поле наносят точки, координаты которых соответствуют значениям исследуемых показателей, для более качественного исследования взаимосвязей рядом с точкой на поле целесообразно ставить порядковый номер соответствующего изделия (рис. 1.5 и рис. 1.6). Если точки, нанесенные на корреляционное поле, располагаются строго на линии регрессии, то это свидетельствует о том, что между показателями наблюдается очень жесткая (функциональная) зависимость. Чем больший разброс имеют точки относительно линии регрессии, тем слабее связи между показателями.

Наиболее ответственным этапом при построении корреляционных полей является нанесение на оси координат масштабных чисел. Для более качественного исследования взаимосвязей и отсева из параметрических рядов не характерных для него изделий следует так выбирать минимальные и максимальные значения на осях координат, чтобы точки по возможности располагались на всем корреляционном поле.

Опыт применения корреляционных полей при разработке нормативно-параметрических уравнений показывает, что применение их не только целесообразно, но и необходимо.

Широко применяются насосные агрегаты в трубопроводном транспорте (транспортировка нефти и газа), в которых используются, в настоящее время в основном, нерегулируемый электропривод. Уровень энергоэффективности транспортировки в таких системах определяется качеством обслуживания линейной части трубопровода, степенью использования паспортных характеристик установленного оборудования и реализацией программ по энергосбережению.

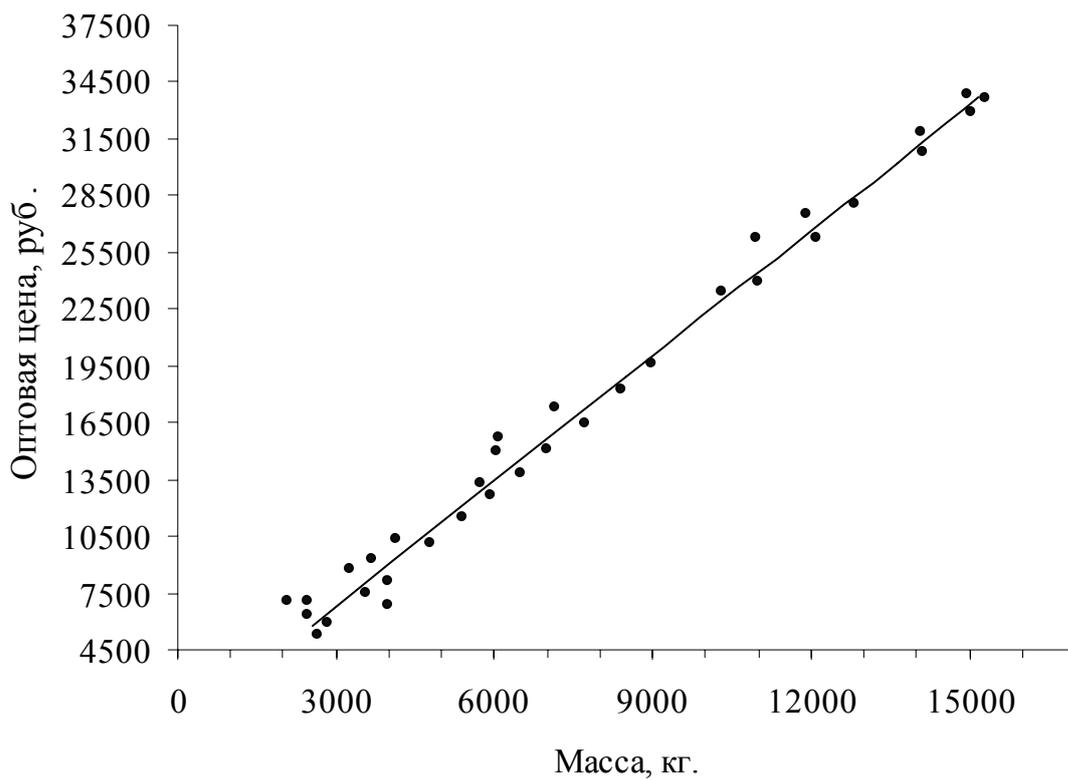


Рис. 1.5. Корреляционное поле, характеризующее взаимосвязь между оптовой ценой и массой АТД-2

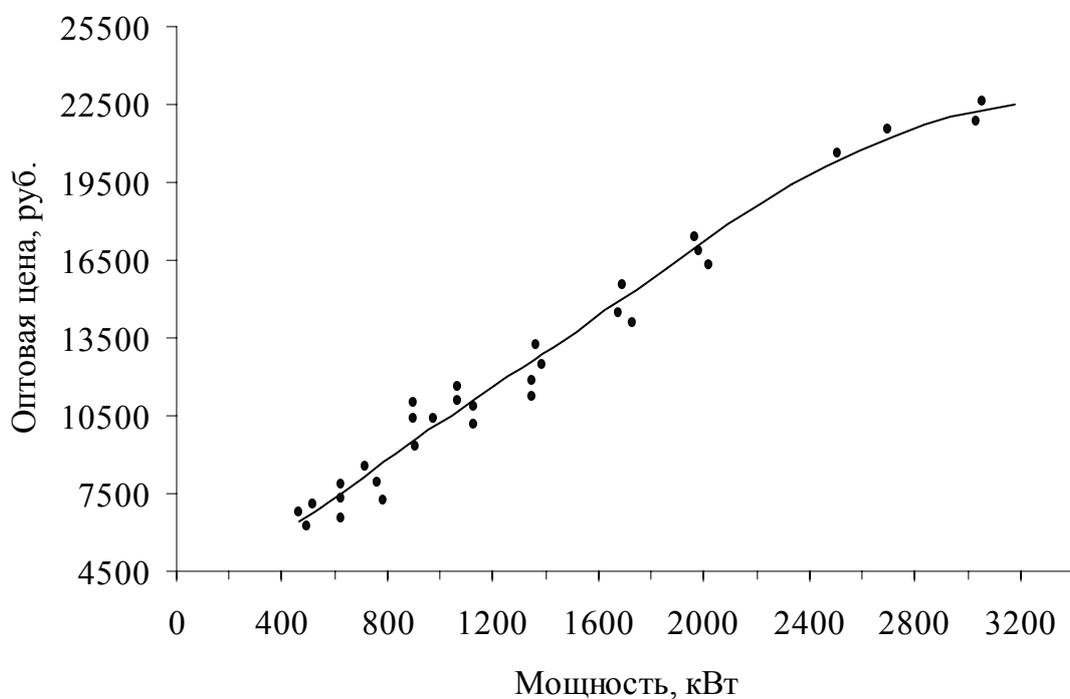


Рис. 1.6. Корреляционное поле, характеризующее взаимосвязь между оптовой ценой и мощностью АТД-2

взаимосвязь между ценой и мощностью АД-2

Участки таких трубопроводов являются энергоемкими объектами: основными технологическими единицами, потребляющими электроэнергию, являются насосные агрегаты. В качестве примера в табл. 1.3, приведен состав насосного оборудования одного из участков нефтепровода Республики Беларусь.

Т а б л и ц а 1.3

Состав и мощности насосного оборудования РУП «Гомельтранснефть Дружба»

Тип насоса	Электродвигатели		Кол-во, шт	Суммарная установленная мощность, кВт
	марка	мощность, кВт		
1	2	3	4	5
20 НДСН	АЗ-12-52-8-320	320	1	320
20 НДСН	ВАО-560L	320	1	320
24НДх14х1	АТД-2500	2500	4	10000
NG 300/450/100	ТДНР-1600-2	1600	2	3200
NG 300/450/100	2АЗМВ-1 1600	1600	4	6400
NG 300/460/100	ТДНР-1600-2	1600	14	22400
ZML 400/600	ВАО4-450LA	250	1	250
ZML 400/600	DNUB 83-450	250	1	250
HM 2500x230	СТД-2-2000	2000	2	4000
HM 3600x230	4АРМП-2500	2500	4	10000
HM 3600x230	СТД-2-2500	2500	2	5000
HM 7000-210	5АЗМВ -4000	4000	13	52000
HM 7000-210	СТД-5000-2	5000	8	40000
HM 7000-210	СТД -2-3150	3150	3	9450
HMП 2500x74	ДА-304-560Х-6У1	1000	2	2000
HMП 3600x78	ДА-304-560Х-6У1	1000	2	2000

НМП 3600x78	ВАО-800	800	3	2400
Всего			67	169990

Из этой таблицы видно, что суммарная установленная мощность насосных агрегатов достигает 170 МВт. Помимо расхода электроэнергии на электропривода насосных агрегатов, осуществляется расходы и на вспомогательные технологические операции.

Для Республики Беларусь (РБ) задачи по энергосбережению особо актуальны т. к. ее ресурсы ограничены. Валовое потребление топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в целом по республике за 2009 г. составило 36,8 млн т.у.т., а сама структура потребления этих ресурсов представлена на рис. 1.7.

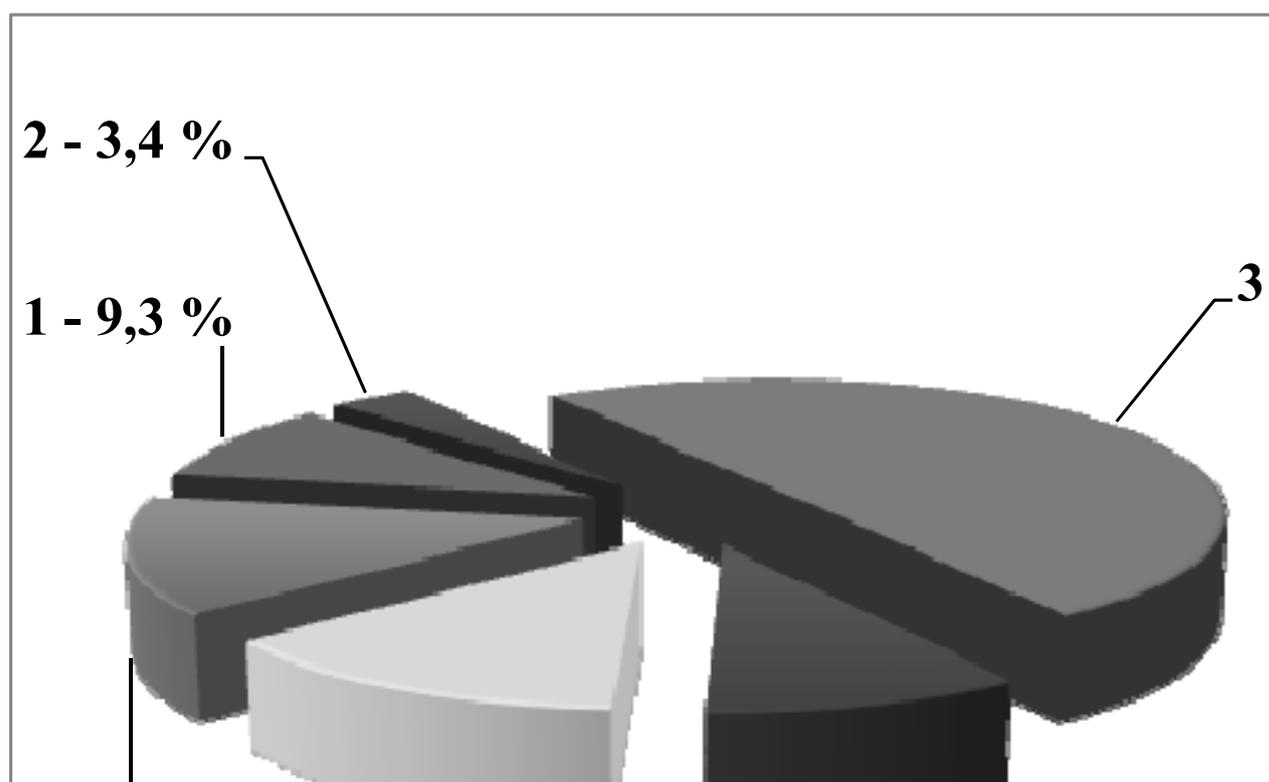


Рис. 1.7. Структура потребления ТЭР за 2009 г.
 1 – газ природный; 2 – мазут; 3 – светлые нефтепродукты;
 4 – другие виды топлива; 5 – возобновляемые виды топлива;
 6 – импорт электроэнергии

Доля потребления собственных энергоресурсов РБ (в том числе возобновляемых источников энергии) в балансе энергоресурсов при

производстве тепловой и электрической энергии за ряд последних лет представлена на рис. 1.8.

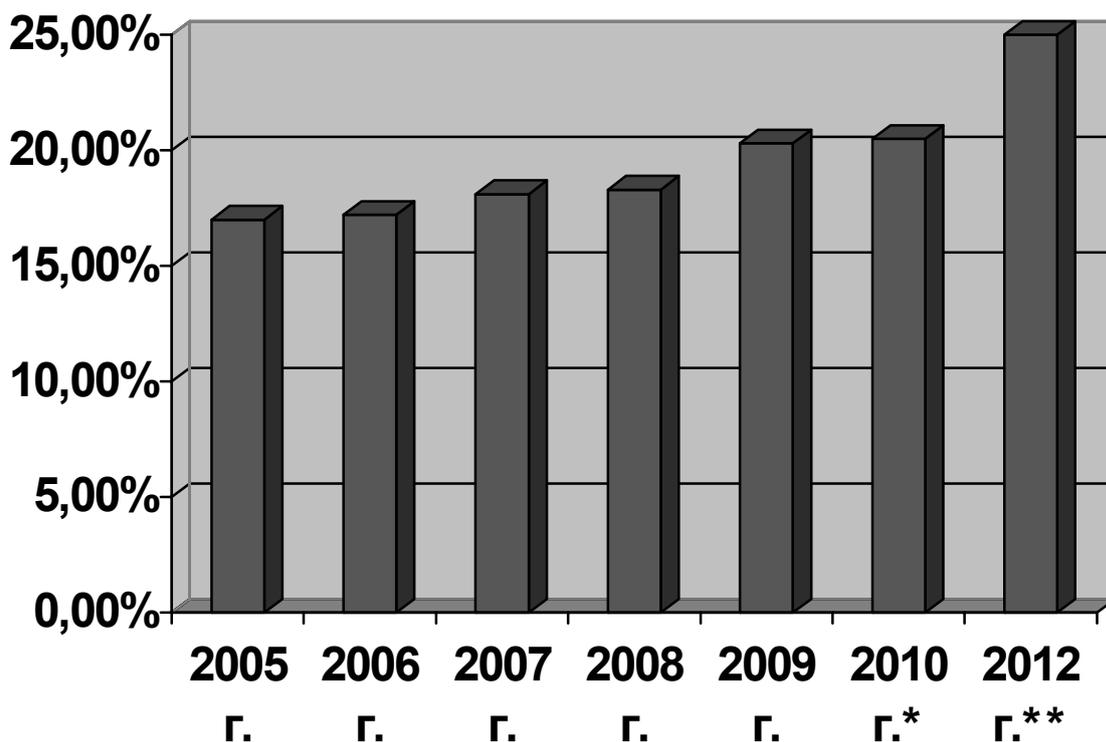


Рис. 1.8. Доля потребления собственных ТЭР
в Республике Беларусь
* оценка; ** план

Металлургические предприятия республики (как наиболее энергоемкие) проводят работы по снижению энергоемкости продукции, так РУП «Гомельский завод литья и нормалей» с 2005 по 2009 гг. снизил удельный расход электроэнергии на 1 тонну годного чугуна с 4773 до 2501 кВт ч/т, или в 1,9 раза. Расход электроэнергии на тонну жидкого литья в 2010 г. составил 1192,8 кВт ч/т при среднем расходе по предприятиям Министерства промышленности РБ 1490 кВт ч/т. В значительной мере эти результаты были достигнуты за счет внедрения регулируемых электроприводов на основе полупроводниковых преобразователей частоты в различных технологических установках.

Выполненный анализ структуры энергосберегающих мероприятий на Гомельского участка нефтепровода «Дружба» [8],

показал, что наибольший потенциал энергосбережения (ПЭ) осуществим за счет технологических мероприятий (60,4 %), а наименьший – за счет организационных мероприятий (рис. 1.9). Однако сроки окупаемости этих мероприятий различны, так в частности, общетехнические мероприятия в среднем окупаются за 3,8; технологические – 3,2; организационные – за 1,6 года. Длительность окупаемости в значительной мере зависит от соотношения затрат по энергосбережению и стоимости величины самого энергосбережения.

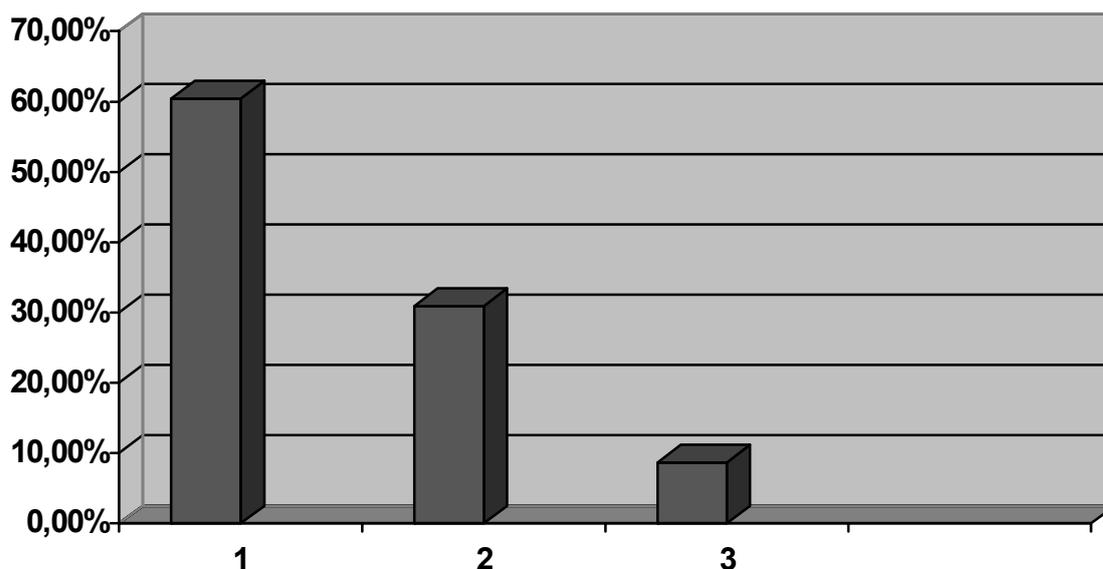


Рис. 1.9. Структура энергосберегающих мероприятий
 1 – технологические мероприятия; 2 – общетехнические мероприятия;
 3 – организационные мероприятия

Установленные и находящиеся в эксплуатации электродвигатели могут быть проверены на оптимальную величину коэффициента загрузки, который выводится из уравнения минимума приведенных затрат на 1 кВт номинальной мощности электродвигателя

$$K_{\text{зопт}} = \sqrt{\frac{pK + \Delta P_{\text{дд}} \gamma}{\Delta P_{\text{л}} \gamma}},$$

где p – суммарный коэффициент отчислений от капитальных затрат (K) на электродвигатель, учитывающий отчисления связанные с коэффициентом эффективности K , амортизацией и затратами на ремонт и обслуживание; ΔP_{xx} и $\Delta P_{\text{нн}}$ –соответственно потери

холостого хода и номинальные нагрузочные; γ – стоимость одного кВт года электроэнергии.

Получено аналитическое выражение $K_{30пт}$, позволяющее анализировать стоимостное соотношение цен на электродвигатель и электроэнергию, что особенно актуально в реально существующих рыночных отношениях. Проведенный анализ показал, что расчетные значения этого коэффициента значительно превышают единицу. Технически это невыполнимо. Совместный анализ уравнения $K_{30пт}$ и составляющих затрат позволяет утверждать, что в настоящее время существуют нарушения в соотношениях капитальных затрат на электрооборудование, образующее электропривод, и стоимости электроэнергии. Для достижения технически реализуемого численного значения этого оптимального коэффициента (меньше 1,0), необходимо, в первую очередь, снижать стоимость электрооборудования и составляющих затрат, определяющих капитальные затраты этого оборудования. На рис. 1.10 показана чувствительность $K_{30пт}$ (ось Z) к изменениям стоимости электродвигателя (ось X) и стоимости электроэнергии (ось Y).

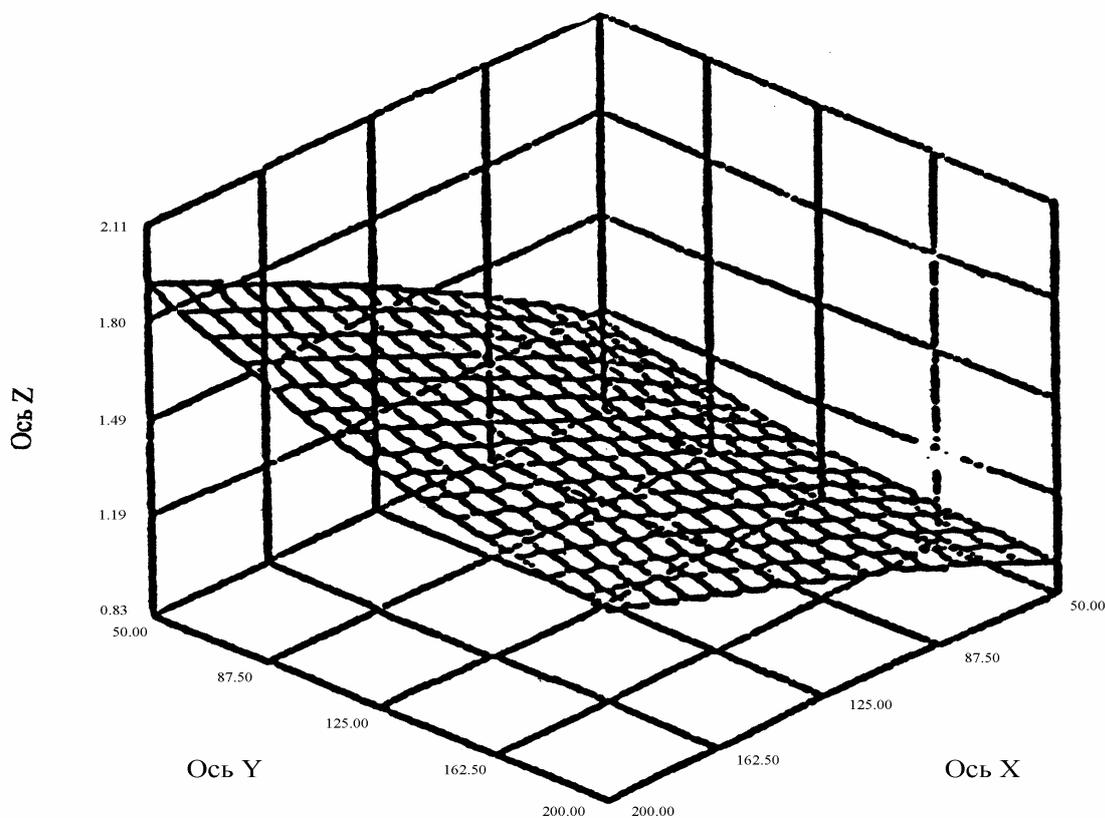


Рис. 1.10. Зависимость $K_{\text{зопт}}$ от относительных значений цены электродвигателя и основной ставки двухставочного тарифа на электроэнергию

§ 1.2. Тенденции развития электроприводов металлургического производства

Известно, что металлургические предприятия потребляют около 14 % топлива и 12 % электроэнергии, вырабатываемых в стране. В себестоимости продукции доля энергетических ресурсов за последние 15 лет увеличилась с 20 до 40 - 45 %, что существенно сказывается на конкурентоспособности металлургической продукции. На долю электропривода приходится около 70 % электроэнергии, потребляемой на предприятиях черной металлургии. Например, на Магнитогорском металлургическом комбинате (ОАО «ММК») совокупная установленная мощность электроприводов только насосов, вентиляторов и турбокомпрессоров составляет около 200 МВт и на их долю приходится до 30 % всей потребляемой электроэнергии. Имеются электропривода технологических механизмов значительной мощности. Оборудование по условиям технологии подразделяется по зонам: горячая и холодная.

К горячей зоне относят:

- транспортные рольганги района печей, гидросбива, клетки и холодильника, предназначенные для транспортировки полосы, а также обеспечения режима качения полосы, предотвращения, таким образом, перегрев роликов. Электропривод рольгангов включает в себя около трех тысяч электродвигателей в диапазоне мощностей от 5 до 90 кВт;

- электропривод поворотных столов включает 37 электродвигателей мощностью от 80 до 90 кВт;

- прокатная клетка стана несет на себе основную функцию деформирования металла и придания ему необходимого профиля. Главный привод клетки – два электродвигателя мощностью 12 МВт и привод эджеров – 1250 кВт. Вспомогательный привод клетки – электродвигатели 150 - 350 кВт;

- главный привод машины предварительной правки полосы – три электродвигателя мощностью 750 кВт;

- привод системы ускоренного ламинарного охлаждения – 10 тянущих роликов с электродвигателями мощностью 75,9 кВт каждый;
- привод машины горячей правки полосы – три электродвигателя мощностью 813 кВт.

К электрооборудованию холодной зоны относят:

- главный привод обрезных (концевых) ножниц – два электродвигателя мощностью 600 кВт, сдвоенных кромкообрезных ножниц и ножниц продольной резки – шесть электродвигателей мощностью 350 кВт и два по 400 кВт, делительных ножниц – два по 800 кВт каждый;
- машина холодной правки – пять электродвигателей по 239 кВт;
- электропривод гидростанции – электродвигатели мощностью 132 кВт в количестве от 4 до 13 штук;
- электропривод систем смазки (жидкая и густая). Каждая система жидкой смазки имеет по два электродвигателя мощностью 4-16 кВт. Системы густой смазки имеют электродвигатели меньшей мощности;
- электропривод станций заполнения маслом систем смазок включают в себя 12 электродвигателей мощностью 0,5 - 20 кВт;
- электропривод системы гидросбива состоит из четырех электродвигателей мощностью 250 кВт.

Все перечисленные электропривода различаются и режимом работы и используют электродвигатели переменного тока.

При переходе к регулированию частоты вращения механизмов на ОАО «ММК» резерв экономии электроэнергии оценивается порядка 500 млн кВт ч, что составляет около 500 млн руб. в год.

§ 1.3. Перспективы регулируемого электропривода

Наибольший эффект энергосбережения можно получить переведя мощные механизмы с электроприводом от высоковольтных асинхронных и синхронных двигателей в режим работы с регулированием скорости вращения посредством высоковольтных преобразователей частоты.

По данным IMS Research мировой объем продаж высоковольтных преобразователей частоты в 2007 г. составил 1550 млн. долларов (4600 преобразователей) и относительно 2006 г. возрос на 33,4 %. Прогнозируется, что рост объемов производства таких

преобразователей в последующем составит 21 % в год при их средневзвешенной стоимости 200 - 400 дол./кВт. Распределение высоковольтных электроприводов в отраслях промышленности, приведено в табл. 1.4.

Т а б л и ц а 1.4

Распределение высоковольтных электроприводов *

Отрасли промышленности	Объем использования, млн долл.
1	2
Нефтяная и газовая	330
Электроэнергетика	270
1	2
Металлургия	350
Судостроение	160
Водное хозяйство	115
Горнодобывающая	110
Химическая	70
Цементная	50
Прочие	100
ИТОГО	1555

* данные на 2007 год

Высоковольтные частотно-регулируемые электроприводы нашли применение, в первую очередь в электроэнергетике (конденсационные блоки – ТЭЦ, теплоэлектроцентрали – ТЭЦ), водном хозяйстве (насосные станции), централизованных насосно-перекачивающих станций систем централизованного теплоснабжения городов, металлургии, горной, нефтяной промышленности, в коммунальном хозяйстве (крупные районные теплоснабжающие станции) и т.п. Например, станциями теплоснабжения Московской объединенной энергетической компанией (общая установленная мощность в 2007 г. высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов 31890 кВт) было сэкономлено электроэнергии 120 млн кВт ч, топлива – 20000 т у.т., обеспечено снижение выбросов CO₂ – 30000 т.

Наиболее значимой отраслью для реализации программ энергосбережения является электроэнергетика. Вместе с тем значительная часть конденсационных энергоблоков ТЭС и ТЭЦ

эксплуатируется более 35 - 40 лет, и их оборудование нуждается в коренной реконструкции. Масштабное строительство новых энергоблоков и модернизация существующих предусмотрены Энергетической стратегией России до 2030 года.

Прогнозируемые объемы применения мощных РЭП на ТЭС на основании данных [1], представлены в табл. 1.5.

Применение высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов характерно для зарубежного трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и жидких химических продуктов. Такой электропривод насосных агрегатов на нефтеперекачивающих станциях магистральных и местных нефтепроводов позволяет избежать непроизводительных затрат энергии, связанных с дросселированием, сократить число пусков мощных насосных агрегатов и, что не менее важно, обеспечить их плавный пуск и останов, что существенно повышает надежность оборудования, вследствие исключения гидравлических ударов в трубопроводах. В настоящее время на 14 насосных станциях магистрального нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» устанавливаются высоковольтные преобразователи частоты для регулирования быстроходных двигателей магистральных нефтенасосов. Общее количество таких РЭП составляет 60 единиц мощностью 14000 кВт.

Т а б л и ц а 1.5

Прогнозные объемы применения электропривода на ТЭС

Объекты электроэнергетики	Кол-во объектов	Число механизмов на объекте, подлежащих оснащению РЭП*	Общая потребность в РЭП
1	2	3	4
ТЭС. Энергоблоки 200 МВт	80	7	560
ТЭС. Энергоблоки 300 МВт	40	5	200
ТЭС. Энергоблоки 500 и 800 МВт	25	3	75
ТЭС мощностью более 100 МВт	121	3x4**	1452

1	2	3	4
ТЭЦ общего пользования менее 100 МВт	123	2x4**	984
Промышленные и муниципальные ТЭЦ	242	2x2**	968
Всего			4240

* без сетевых насосов ** среднее число турбоагрегатов на ТЭЦ

Некоторые статистические данные приведены в табл. 1.6 – 1.12, заимствованные из [1, 4].

Объемы производства высоковольтного электрооборудования

ВЧРП

Высоковольтный частотно-регулируемый привод

ПРИВОДНАЯ
ТЕХНИКАОБЪЕМ МИРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА В 2007 г.

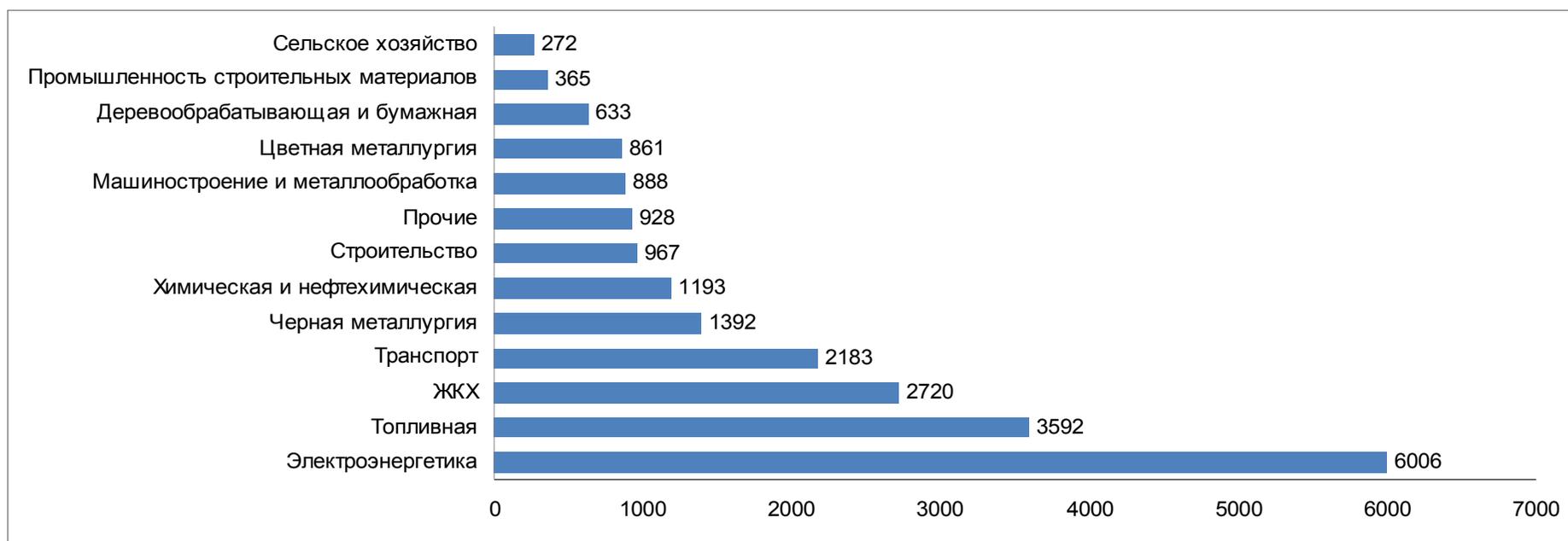
Мощность, кВт	Объем продаж в/в электроприводов в млн. долл.		Рост, %
	2006 г.	2007 г.	
Менее 500	57,6	78,4	36,1
500 – 3000	368,9	495,6	34,3
3100 – 7400	319,4	428,7	34,2
7500 – 10000	190,3	247,3	30,0
Более 10000	229,1	304,1	32,7
Всего	1165,4	1554,1 (4600 шт)	33,4



Распределение высоковольтного электрооборудования



Количество высоковольтных электроприводов по отраслям народного хозяйства, находящихся в эксплуатации в штуках (всего 22000)



Распределение по отраслям



Распределение по отраслям высоковольтных электроприводов

Отрасль народного хозяйства	Количество, шт.
Жилищно-коммунальное хозяйство	2720
Транспорт	2183
Строительство	976
Промышленность стройматериалов	365
Деревообрабатывающая и бумажная	633
Машиностроение и металлообработка	888
Химическая и нефтехимическая	1192
Цветная металлургия	881
Черная металлургия	1392
Топливная	3592
Электроэнергетика	6000
Прочие	1200
Всего	22000

Распределение потребности



Оценка потребности в в/в преобразователях частоты для электроприводов большой мощности на объектах промышленности и коммунального хозяйства до 2020 года

№	Рабочие машины	Шкала мощностей, кВт	Оценка потребностей	
			Штук	Мощность, МВт
1	Сетевые насосы ТЭЦ с турбогенераторами мощностью 110 и 250МВт	1250, 1500, 3150	420	630
2	Сетевые насосы ТЭЦ с турбогенераторами мощностью менее 110 кВт и районных котельных	500, 630, 800	600	380
3	Насосы НПС тепловых сетей	500, 630	450	225
Всего по теплоснабжению:			1470	1235
4	Насосы станций водоснабжения I и II подъемов	500-5000	360	900
5	Канализационные насосные станции	500-3200	140	250
6	Промышленные насосные станции водоснабжения, в т.ч. Обратного	500-3200	200	360
Всего в сфере водоснабжения и канализации:			700	1510
7	Доменные воздуходувки	12000-60000	20	300
8	Кислородные турбокомпрессоры	6000-12000	30	270
9	Экспаутеры, дымососы и воздуходувки	1200-8000	100	400
10	Насосы систем охлаждения металла	600-800	40	80
Всего по металлургической отрасли:			190	1050

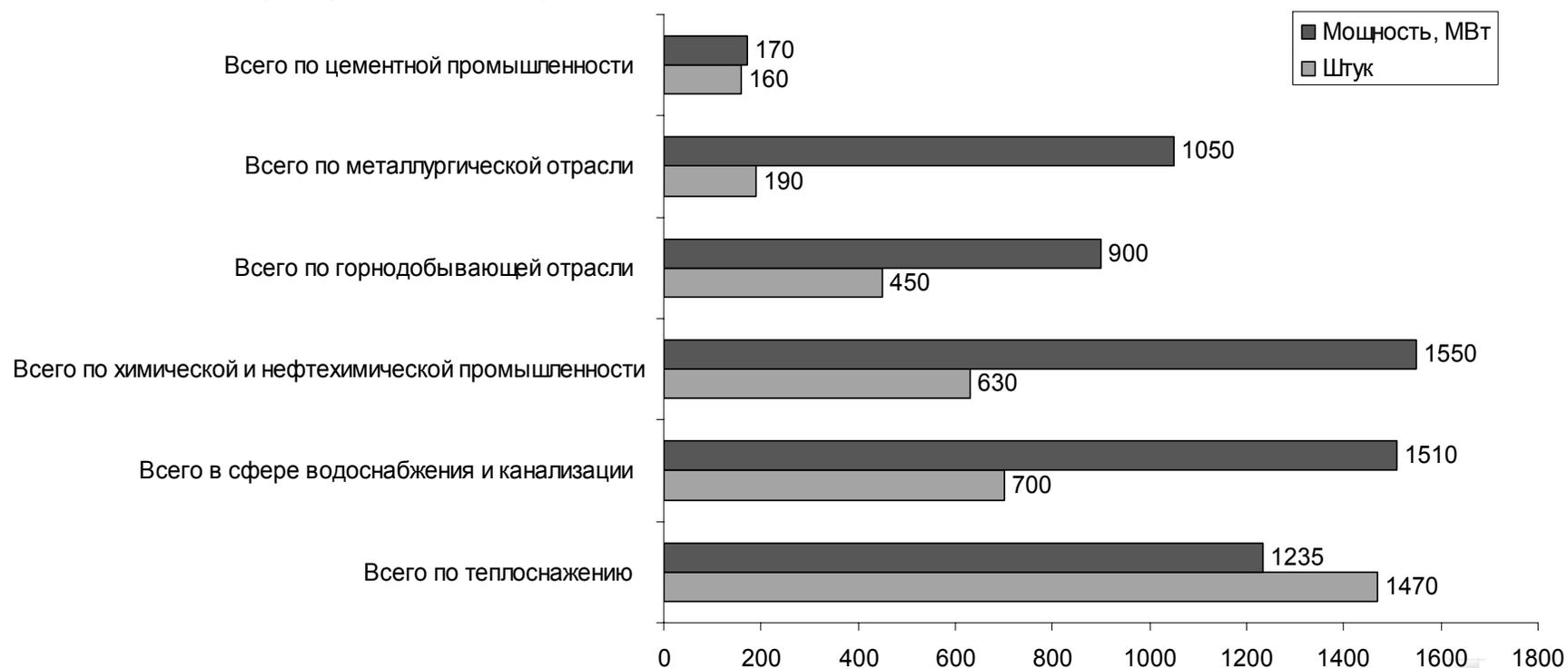
Оценка потребности в в/в преобразователях частоты для электроприводов большой мощности на объектах промышленности и коммунального хозяйства до 2020 года

№	Рабочие машины	Шкала мощности, кВт	Оценка потребностей	
			Штук	Мощность, МВт
11	Шахтные вентиляторы главного проветривания	600-5000	250	500
12	Рудоразмольное оборудование (дробилки, стержневые и шаровые мельницы)	800-5000	200	400
Всего по горнодобывающей отрасли:			450	900
13	Цементные мельницы	800-1250	100	90
14	Вращающиеся печи	800-3200	30	50
15	Вентиляторы	600-1600	30	30
Всего по цементной промышленности отрасли:			160	170
16	Технологические насосы химических производств	500-3200	200	360
17	Турбокомпрессоры	630-12000	100	600
18	Поршневые компрессоры	800-500	200	400
19	Мешалки полимерных материалов	600-3200	100	150
20	Резиносмесители	800-3500	30	40
Всего по химической и нефтехимической промышленности			630	1550
Всего по указанным отраслям			3600	6415

Потребность в электроприводах переменного тока



Оценка потребности в в/в преобразователях частоты для электроприводов переменного тока большой мощности до 2020 года



Прогноз потребности по отраслям в высоковольтных электроприводах

ОЦЕНКА ПОТРЕБНОСТИ ОТРАСЛЕЙ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА В РЕГУЛИРУЕМЫХ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

Отрасль	Потребность, шт.	Ориентировочная суммарная мощность, МВт
Энергетика	4416	3885
Теплоснабжение	1470	1235
Водоснабжение и канализация	700	1510
Металлургия	190	1000
Горнодобывающая	450	900
Цементная	160	170
Химическая	630	1550

Распределение по мощностям

ВЧРП

Высоковольтный частотно-регулируемый привод

ПРИВОДНАЯ
ТЕХНИКАРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО МОЩНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Мощность, кВт	Количество в/в преобразователей, шт.
500-1000	4560
1000-3000	1520
3100-7000	1040
Более 7000	880
Всего	8000



В заключение данной главы приведем количественную динамику только установленных электродвигателей и преобразователей за пятилетний период на одном из предприятий – ОАО «ММК» (табл. 1.13) из которой следует, что совершенствованием генеральной совокупности установленного оборудования необходимо заниматься. Из этой же таблицы следует, что в 2004 г. 4,13 %, 2005 г. 4,90 %, 2006 г. 5,92 %, 2007 г. 4,35 % и 2008 г. 4,52 % электроприводов имели в своей структуре преобразователи, используемые для регулирования скорости и облегчения пуска электропривода.

Т а б л и ц а 1.13

**Динамика изменений в структуре электрооборудования
ОАО Магнитогорского металлургического комбината**

Наименование	Года				
	2004	2005	2006	2007	2008
Общее количество электродвигателей:	63308	62279	59809	82063	82985
- из них постоянного тока	12799	12139	10913	13802	13804
- из них переменного тока	50509	50140	48896	68261	69180
Общее количество преобразователей:	2617	3052	3543	3574	3750
- из них отечественных	2161	2147	2095	2095	2044
- из них импортных	456	905	1448	1479	1706
- из них постоянного тока	2238	2256	2272	2288	2296
- из них переменного тока	379	796	1271	1286	1454
Общее количество контроллеров	454	484	563	604	633

В 2009 г. в ОАО «ММК» уже было 4962 преобразователя из них:

- отечественных 1911;
- импортных 3051;
- постоянного тока 2207;
- переменного тока 2755.

Из приведенных статистических данных видно, что в ОАО «ММК» наблюдается устойчивая тенденция увеличения электроприводов с преобразователями переменного тока.

Среди 445 преобразователей частоты применяемых в электроприводах на кранах ОАО «ММК» используются преобразователи фирм:

- ОбнинскЭнергоТех – 35 шт.;
- Vacon – 146 шт.;
- Control Technigues – 4 шт.;
- Siemens – 260 шт.

Большое разнообразие электроприводов по роду тока преобразователей различных фирм создает необходимость развития электроремонтной базы Магнитогорского металлургического комбината.

Глава 2. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕНТИЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Интенсификация производственных процессов, повышение производительности труда связаны с совершенствованием существующей и внедрением новой, передовой технологии. Этому процессу сопутствует широкое внедрение мощных вентильных преобразователей, электродуговых печей, сварочных установок и других устройств, которые при всей технологической эффективности оказывают влияние на качество электроэнергии в электрических сетях.

Проблема электромагнитной совместимости электроприемников с питающей сетью, которую в последнее время сравнивают с проблемой загрязнения окружающей среды, порождает новые научные и технологические проблемы при проектировании и эксплуатации промышленных электрических сетей. Ущерб от ухудшения качества электроэнергии в промышленных сетях превышает 1,8 млрд. руб. в год. В настоящее время принимаются меры для того, чтобы уменьшить влияние потребителей на качество электроэнергии в промышленных сетях.

Проблема может быть решена путем создания и промышленного освоения быстродействующих многофункциональных средств компенсации реактивной мощности, улучшающих качество электроэнергии сразу по нескольким параметрам. Внедрение этих устройств приводит также к уменьшению потерь электроэнергии.

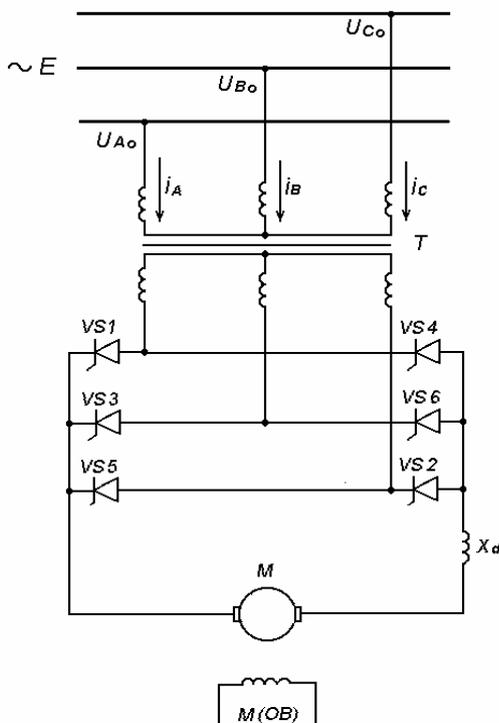
§ 2.1. Качество электроэнергии при работе электроприводов с полупроводниковыми преобразователями

Электрическая энергия – это продукт производства, и как всякий продукт он должен обладать определённым качеством. Применение нелинейных потребителей обострило проблему качества электроэнергии в связи с искажением синусоидальной формы напряжения сети и ухудшения коэффициента мощности потребителей. Страны Европейского Союза (ЕС), например, от некачественного электроснабжения теряют в год около 10 млрд. евро [10].

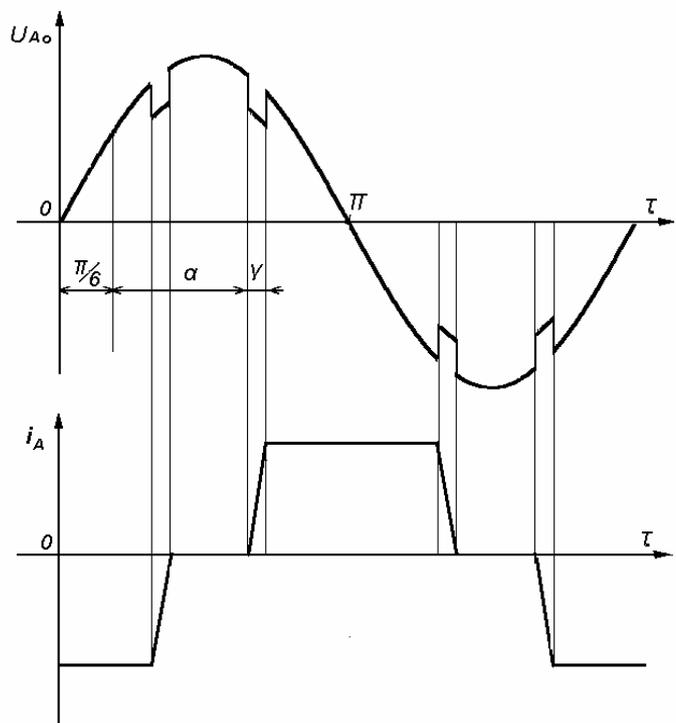
К потребителям, ухудшающим синусоидальную форму напряжения сети и коэффициент мощности, относятся электротехнические комплексы (ЭТК) многих объектов, которые характеризуются приме-

нением регулируемых электроприводов с полупроводниковыми преобразователями. Распространённым типом преобразователей, оказывающих существенное влияние на показатели качества электроэнергии систем электроснабжения, являются выпрямители. Выпрямители применяются для питания электродвигателей постоянного тока, используются в качестве звена постоянного тока преобразователей частоты при регулировании скорости электродвигателей переменного тока. Поэтому решение проблемы повышения энергетических показателей полупроводниковых преобразователей во многом зависит от методов и средств, применяемых для уменьшения отрицательного воздействия выпрямителей на питающую сеть [11].

Типичным примером является электропривод, выполненный по системе управляемый выпрямитель — двигатель постоянного тока (УВ — ДПТ) (рис. 2.1, а). В качестве управляемого выпрямителя (УВ) используется тиристорный преобразователь (ТП), выполненный по трёхфазной мостовой схеме. ТП подключён к сети через трансформатор T , соединённый линией электропередачи с источником питания E , который обеспечивает синусоидальную форму напряжения.



а



б

Рис. 2.1. Силовая схема (а) и формы напряжения и тока (б) системы тиристорный преобразователь-электродвигатель постоянного тока

Процесс преобразования электроэнергии в управляемом выпрямителе производится с помощью тиристоров, работающих в ключевом режиме. Следствием этого режима является значительное отклонение формы токов и напряжений на стороне переменного тока преобразователя от синусоидальной. Для иллюстрации сказанного на рис. 2.1, б приведены примерные графики изменения потребляемого фазного тока преобразователя i_A и фазного напряжения U_{Ao} в точке подключения УВ к сети. На интервалах коммутации тиристоров происходит резкое возрастание или спадание фазного тока. Длительность процесса коммутации определяется углом коммутации тиристоров γ . Во время коммутации из-за падения напряжения в линии происходит скачкообразное изменение фазного напряжения U_{Ao} . При отсутствии коммутации фазный ток практически не меняется и напряжение U_{Ao} изменяется по закону, близкому к синусоиде.

В установившемся режиме работы все токи и напряжения являются периодическими функциями времени и их можно разложить в ряды Фурье. Например, для схемы рис. 2.1 напряжение и ток УВ на стороне переменного тока для фазы А записывается в виде ряда Фурье в комплексной форме следующим образом:

$$U_{Ao}(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{v=-\infty}^{+\infty} \dot{U}_{ov} \exp(jv\tau);$$

$$i_A(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{v=-\infty}^{+\infty} \dot{I}_v \exp(jv\tau),$$

где: v – номер высшей гармоники; \dot{U}_{ov}, \dot{I}_v комплексные амплитуды высших гармоник напряжений и токов; $\tau = \omega_0 t$ – относительное время; t – реальное время, с; ω_0 – круговая частота сети.

Высшие гармоники разделяются на канонические и неканонические. Каноническими называются гармоники, которые возникают при работе идеализированного преобразователя. Для канонических гармоник трехфазного мостового управляемого выпрямителя справедливо соотношение:

$$v = mk \pm 1,$$

где m – пульсность преобразователя; $k = 1, 2, 3 \dots$

В случае трехфазных мостовых управляемых выпрямителей кривые тока и напряжения в трехфазной цепи не содержат ни постоянной составляющей, ни четных гармоник. Кроме того, гармоники, кратные трем, также отсутствуют в переменном токе преобразователя.

В случае, близком к идеализированному, когда можно считать, что выпрямленный ток полностью сглажен и угол коммутации равен нулю, значения канонических гармоник фазного тока преобразователя могут быть найдены по формуле:

$$I_v = \frac{I_1}{v},$$

где I_v, I_1 – действующие значения v -й и основной гармоник тока.

Из последнего выражения следует, что уровень гармоник тока затухает с ростом номера гармоники. Расчётные значения канонических гармоник тока, вычисляемые по последней формуле, являются завышенными по сравнению с их действительными значениями. В реальном случае амплитуды и фазы гармоник тока являются функциями углов управления и коммутации.

Неканоническими называют гармоники, обусловленные несимметрией параметров питающей сети или несимметрией управляющих импульсов систем управления преобразователей. Неканонические гармоники чётных номеров и кратные трём малы по сравнению с каноническими.

Отличие фазного тока преобразователя от синусоиды свидетельствует о том, что управляемый выпрямитель для питающей сети переменного тока является генератором высших гармоник тока. Другая особенность управляемого выпрямителя обусловлена фазовым способом регулирования выпрямленного напряжения. Это регулирование осуществляется за счёт задержки на угол управления тиристорами α момента включения тиристорov по отношению к сетевому напряжению. Результатом этого является отставание фазного тока преобразователя на некоторый угол относительно напряжения. Поэтому при фазовом управлении управляемый выпрямитель работает в режиме потребления реактивной мощности.

Для управляемых преобразователей угол сдвига первой гармоники тока относительно первой гармоники напряжения на стороне сети равен

$$\varphi_1 = \alpha + \gamma/2.$$

При допущении о пренебрежении углом коммутации вентиляей γ угол сдвига первой гармоники равен углу регулирования вентиляей преобразователя $\varphi_1 \approx \alpha$. В практических расчётах коэффициент мощности ТП по первой гармонике приближённо принимается равным $\cos \alpha$. В этом случае

- активная мощность ТП

$$P_{mn} = U_{я} I_{я},$$

где $U_{я}$, $I_{я}$ – средние значения напряжения и тока якоря двигателя;

- реактивная мощность ТП

$$Q_{mn} = P_{mn} \operatorname{tg} \alpha;$$

- полная мощность ТП

$$S_{mn} = \sqrt{P_{mn}^2 + Q_{mn}^2}.$$

Угол управления ТП находится по

$$\alpha = \operatorname{arc} \cos \frac{U_{я}}{U_{d0}},$$

где для трёхфазного мостового ТП $U_{d0} = 1,35 U_{л}$; $U_{л}$ – действующее значение линейного напряжения сети.

Максимальное значение реактивной мощности, потребляемой ТП, имеет место при углах управления вентилями, близких к 90 эл. град. Это соответствует скорости электропривода, равной или близкой к нулю. При скорости электропривода, близкой к номинальному значению, потребление реактивной мощности минимально.

Искажение формы напряжения сети из-за генерации полупроводниковыми преобразователями токов высших гармоник, возрастание потребления реактивной мощности приводит к ухудшению энергетических характеристик и качества электроэнергии в системе электроснабжения.

Искажение напряжения сети, ухудшая качество электроэнергии, приводит к ряду нежелательных воздействий на потребителей и на работу самой системы электроснабжения. Это проявляется в увеличении потерь электроэнергии в электрооборудовании, сокращении срока службы электроприёмников за счёт дополнительного старения изоляции, увеличении погрешности электроизмерительных приборов, ухудшении работы систем автоматики, телемеханики и связи и т.п.

Увеличение потребления реактивной мощности приводит к возрастанию потерь в питающей сети, дополнительным отклонениям и колебаниям напряжения сети. При значительных отклонениях напряжения происходит срабатывание релейной защиты и отключение электрооборудования, что приводит к нарушению технологических процессов, сокращению выпуска продукции и потерям сырья.

Искажения синусоидальной формы напряжения сети, возрастание потребления реактивной мощности особенно ощутимы, когда полупроводниковый преобразователь питается от сети, мощность которой соизмерима с мощностью, потребляемой преобразователем.

Качество электрической энергии (КЭ) регламентируется в соответствии с ГОСТ 13109-97. Чтобы избежать отрицательных последствий, вызванных ухудшением качества электроэнергии, ГОСТ 13109-97 устанавливает нормативные показатели качества электроэнергии (ПКЭ), на которые необходимо ориентироваться при разработке и эксплуатации электрооборудования, подключаемого к сети, в том числе электроприводов с полупроводниковыми преобразователями. ГОСТ устанавливает два значения для всех ПКЭ: нормально допустимое и предельно допустимое.

При нормально допустимом значении ПКЭ обеспечивается нормальное функционирование технических средств. В диапазоне от нормально допустимого значения ПКЭ до предельно допустимого нормальное функционирование ограничено во времени. Согласно ГОСТ это время не должно превышать 5 % в течение 24 часов. Если значение ПКЭ в точке подключения электроприёмника превышает предельно допустимое значение, то его нормальное функционирование нарушается.

Для оценки влияния регулируемого электропривода с полупроводниковым преобразователем на систему электроснабжения используются такие ПКЭ, как отклонение напряжения и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.

Отклонение напряжения. Согласно ГОСТ 13109-97 нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения δU_y на выводах приёмников электрической энергии равны соответственно ± 5 и $\pm 10\%$ от номинального напряжения электрической сети.

Значение установившегося отклонения напряжения δU_y в процентах вычисляют по формуле

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100,$$

где U_y – усреднённое напряжение, которое в условиях эксплуатации определяется по методике, изложенной в ГОСТ 13109-97; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное междуфазное (фазное) напряжение.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в i -м наблюдении в процентах вычисляется по формуле

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{\gamma=2}^{40} U_{(\gamma)i}^2}}{U_{(1)i}} \cdot 100,$$

где $U_{(1)i}$ – действующее значение междуфазного (фазного) напряжения основной частоты в i -ом наблюдении; $U_{(\gamma)i}$ – действующее значение γ -ой гармонической составляющей междуфазного (фазного) напряжения в i -ом наблюдении.

Оценка соответствия коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения установленным нормам в условиях эксплуатации проводится по методике, изложенной в ГОСТ 13109-97.

Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в точках общего присоединения к электрическим сетям с номинальным напряжением $U_{\text{НОМ}} = 0,38$ кВ равны соответственно 8 % и 12 %, а с номинальным напряжением $U_{\text{НОМ}} = 6 - 20$ кВ — соответственно 5 % и 8 %.

Показатели качества электроэнергии без дополнительных средств могут быть обеспечены, если отношение мощности короткого замыкания сети $S_{кз}$ в узле подключения преобразователя к его полной мощности S_{mn} , в зависимости от пульсности преобразователя, равно или больше значений, указанных в табл. 2.1 [11]. Если отношение $S_{кз}/S_{mn}$ меньше указанных в табл. 2.1, то необходимо применение дополнительных средств повышения качества электроэнергии.

Т а б л и ц а 2.1

Предельные значения отношения $S_{кз}/S_{mn}$

Пульсность схемы	$S_{кз}/S_{mn}$
------------------	-----------------

6	90
12	65
24	38
32	15

Распространены три основные группы методов повышения качества электроэнергии. В первую группу входят методы, основанные на рациональном построении схемы электроснабжения. Наиболее распространёнными являются: подключение нелинейных нагрузок к отдельным трансформаторам, подключение параллельно нелинейным нагрузкам синхронных и асинхронных электродвигателей и др. Методы второй группы направлены на совершенствование самих потребителей. К ним относятся: номинальная загрузка двигателей, использование многофазных схем выпрямления, применение усложнённых законов управления схемой управляемого выпрямителя и т. д. Третья группа предполагает использование регуляторов одного или нескольких показателей качества электроэнергии.

Наиболее экономически предпочтительной сегодня является третья группа методов, так как изменение структуры сети или обновление всех потребителей приведет к значительным затратам. В то же время проектирование новых сетей и преобразовательных устройств необходимо вести с учетом современных требований к качеству электроэнергии.

§ 2.2. Особенности компенсации реактивной мощности в сетях с полупроводниковыми преобразователями

Одним из основных вопросов, решаемых при проектировании электроприводов с полупроводниковыми преобразователями, является вопрос о компенсации реактивной мощности, включающий расчёт реактивной мощности преобразователя, расчёт и выбор компенсирующих устройств, их регулирование и размещение.

Передача значительной реактивной мощности по линиям и через трансформаторы невыгодна, так как: возникают дополнительные потери напряжения в сети; возникают дополнительные потери активной мощности и энергии во всех элементах системы электроснабжения,

обусловленные загрузкой их реактивной мощностью; загрузка реактивной мощностью линий электропередачи и трансформаторов уменьшает их пропускную способность и требует увеличения сечений проводов воздушных и кабельных линий, увеличения номинальной мощности или числа трансформаторов.

Основной целью автоматического регулирования реактивной мощности в распределительных сетях является обеспечение такого показателя качества электроэнергии у потребителей, как уровень напряжения при минимуме потерь в сетях.

Применение полупроводниковых преобразователей вызывает увеличение потребления реактивной мощности, генерацию токов высших гармоник и искажение формы питающего напряжения. Несинусоидальность напряжения и тока усложняет проблему компенсации реактивной мощности.

Строгое определение реактивной мощности имеется только для случая, когда токи и напряжения в цепях синусоидальны по форме. Понятие реактивной мощности при несинусоидальных режимах в течение многих лет является предметом научных дискуссий. Многие авторы рекомендуют при практических расчётах под реактивной мощностью понимать реактивную мощность по основной гармонике, которую и следует компенсировать. Одновременно необходимо осуществлять фильтрацию высших гармоник [12].

Для регулирования реактивной мощности в системах электропитания, содержащих электроприводы с полупроводниковыми преобразователями, применяются статические источники реактивной мощности. Простейшими статическими источниками реактивной мощности (ИРМ) являются конденсаторные батареи (КБ), которые имеют наибольшее распространение в промышленности. Они имеют ряд достоинств: схемная простота, малые потери, хорошие массогабаритные показатели, простота эксплуатации.

Для управления реактивной мощностью не только в установившихся режимах, но и в переходных процессах, разработаны быстродействующие источники реактивной мощности, которые называются статическими тиристорными компенсаторами (СТК) реактивной мощности. По принципу действия СТК делятся на устройства прямой и косвенной компенсации реактивной мощности.

При прямой компенсации специальное управляемое устройство генерирует необходимую реактивную мощность. В качестве управляемого устройства на практике могут применяться автоматически

управляемые секционированные КБ с тиристорными выключателями, обеспечивающими высокое быстродействие при дискретном регулировании реактивной мощности.

При косвенной компенсации с помощью батарей конденсаторов генерируется постоянная реактивная мощность, а избыток её, при необходимости, потребляется регулирующими устройствами, подключёнными параллельно конденсаторам. В качестве регулируемого устройства может применяться управляемый тиристорный преобразователь, нагруженный на реактор.

В сетях с повышенным содержанием высших гармоник, генерируемых нелинейными нагрузками, применение обычных средств компенсации реактивной мощности, рассчитанных на синусоидальные токи и напряжения, наталкивается на серьёзные технические трудности. В частности, применяемые для компенсации реактивной мощности конденсаторные батареи изменяют частотные характеристики систем и способствуют возникновению параллельного резонанса токов на частотах до 1000 Гц. Это, в свою очередь, приводит к дополнительному искажению формы напряжения сети и аварийным повреждениям конденсаторных батарей. Поэтому установка конденсаторных батарей в системах электроснабжения при наличии полупроводниковых преобразователей может оказаться недопустимой. В связи с этим в сетях с полупроводниковыми преобразователями применяются ИРМ совместно с фильтрами, которые обеспечивают фильтрацию высших гармоник тока нелинейной нагрузки. В этом случае система, состоящая из ИРМ и фильтров, представляет собой фильтро-компенсирующее устройство, которое обеспечивает одновременно компенсацию реактивной мощности основной частоты и фильтрацию высших гармонических.

Фильтро-компенсирующее устройство (ФКУ) представляет собой многофункциональный электротехнический комплекс, предназначенный для нормализации основных параметров качества электроэнергии по напряжению в точке присоединения преобразователя к питающей электрической сети путём компенсации реактивной мощности, потребляемой преобразователем, и локализации гармоник тока, генерируемых преобразователем [10]. ФКУ целесообразно размещать в узле подключения нелинейной нагрузки.

§ 2.3. Улучшение качества электроэнергии при работе электроприводов

с полупроводниковыми преобразователями

Уменьшение искажений синусоидальной формы кривой напряжения в точке присоединения полупроводникового преобразователя к сети может быть достигнуто за счёт применения многопульсных схем. Пульсность схемы определяется числом пульсаций выпрямленного напряжения за один период основной частоты. Трёхфазная мостовая схема является 6-пульсной. На основе трёхфазных мостовых схем выполняют схемы с большей пульсностью (применяются 12-, 24-, 36-пульсные схемы).

Повышение коэффициента мощности может быть достигнуто за счет применения схем преобразователей с уменьшенным потреблением реактивной мощности. Возможно два варианта решения этой задачи [11]. Первый связан с усложнением законов фазового управления схемой управляемого выпрямителя при естественной коммутации тиристоров. Во втором варианте используются компенсационные выпрямители. Силовая схема компенсационного выпрямителя содержит конденсаторы, которые осуществляют искусственную коммутацию тиристоров, что позволяет частично или полностью компенсировать реактивную мощность, потребляемую выпрямителем из сети.

Применение полупроводниковых преобразователей с усложнёнными законами фазового управления или компенсационных выпрямителей не может решить проблему уменьшения искажений синусоидальной формы кривой напряжения, так как в фазном токе преобразователя сохраняются высшие гармоники.

Основным средством улучшения качества электроэнергии в системе электроснабжения, содержащей электроприводы с полупроводниковыми преобразователями, является применение ФКУ. В состав ФКУ входит набор параллельно включенных фильтров, настроенных на фильтрацию начального спектра канонических высших гармоник, генерируемых полупроводниковыми преобразователями ($\nu = 5, 7, 11, 13$). Фильтры состоят из последовательно включенных конденсаторов и реакторов, образуя резонансные $L-C$ – цепочки, которые одновременно генерируют в сеть емкостной ток основной частоты (рис. 2.2). Каждая резонансная цепочка набирается по условию последовательного резонанса напряжения на частоте фильтруемой высшей гармоники:

$$\nu \cdot \omega_0 \cdot L_\phi = \frac{1}{\nu \cdot \omega_0 \cdot C_\phi}, \quad (2.1)$$

где ν – номер фильтруемой высшей гармоники; ω_0 – номинальная круговая частота сети; L_ϕ – индуктивность фильтрового реактора; C_ϕ – емкость конденсатора.

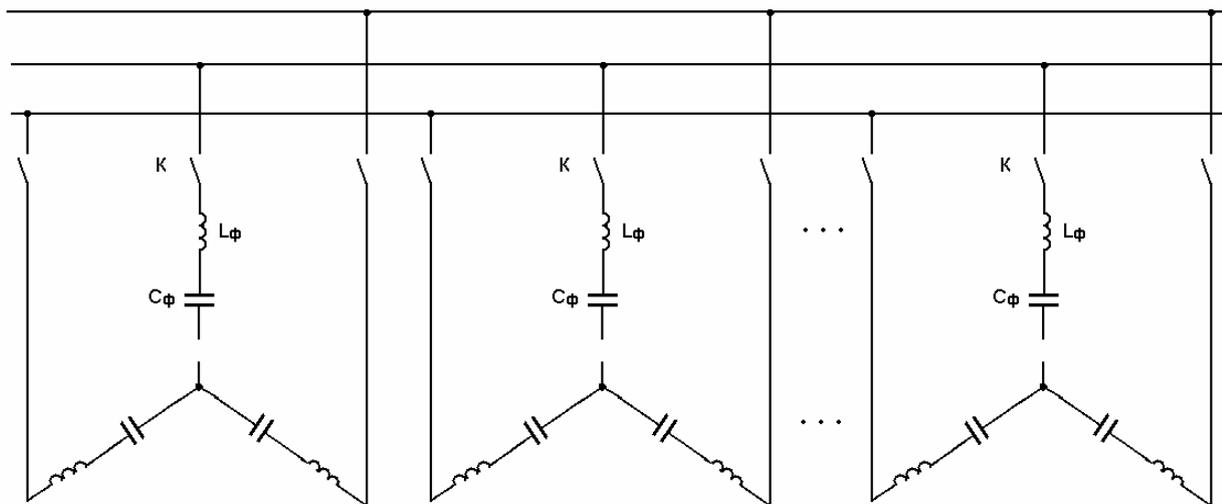


Рис. 2.2. Параллельно включенные фильтры, настроенные на фильтрацию начального спектра канонических высших гармоник

При выполнении данного условия осуществляется фильтрация ν -й гармоники напряжения.

На практике фильтр редко бывает точно настроенным на частоту гармоники, которую он должен подавить, по следующим причинам:

- частота питающей сети может измениться, что приводит к пропорциональному изменению частоты гармоники;
- индуктивность реактора и емкость конденсатора могут изменяться в процессе эксплуатации.

Реактивная мощность основной частоты Q_ϕ , генерируемая в сеть L - C – цепочкой фильтра, равна:

$$Q_\phi = \frac{U_n^2}{\left(\frac{1}{\omega_0 \cdot C_\phi} - \omega_0 \cdot L_\phi \right)},$$

где U_n – линейное напряжение сети в точке подключения фильтра.

В тех случаях, когда по условиям требований обеспечения качества напряжения требуется регулирование реактивной мощности, возможны два варианта схем ФКУ (рис. 2.3):

- ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности (ФКУ-С), содержащее несколько конденсаторно-реакторных групп (ступеней), включаемых в работу путем автоматического или ручного управления;

- ФКУ с непрерывным «косвенным» регулированием реактивной мощности (ФКУ-К), содержащее постоянно подключенную к сети фильтро-конденсаторную группу (ФКГ) и параллельно включенный управляемый регулятор реактивной мощности.

ФКУ ступенчатого типа. В ФКУ-С с помощью механических или быстродействующих тиристорных выключателей к сети подключаются или от неё отключаются отдельные ступени ФКУ и тем самым осуществляется дискретное регулирование реактивной мощности (рис. 2.3, а). Стандартное ФКУ-С обычно состоит из нескольких ступеней Ф1, Ф2, Ф3, Ф4, которые являются резонансными LC-фильтрами, настроенными, например, на 5-ю, 7-ю, 11-ю и 13-ю гармоники. ФКУ подключается к общим шинам (ОШ), от которых получают питание также регулируемые электроприводы с полупроводниковыми преобразователями.

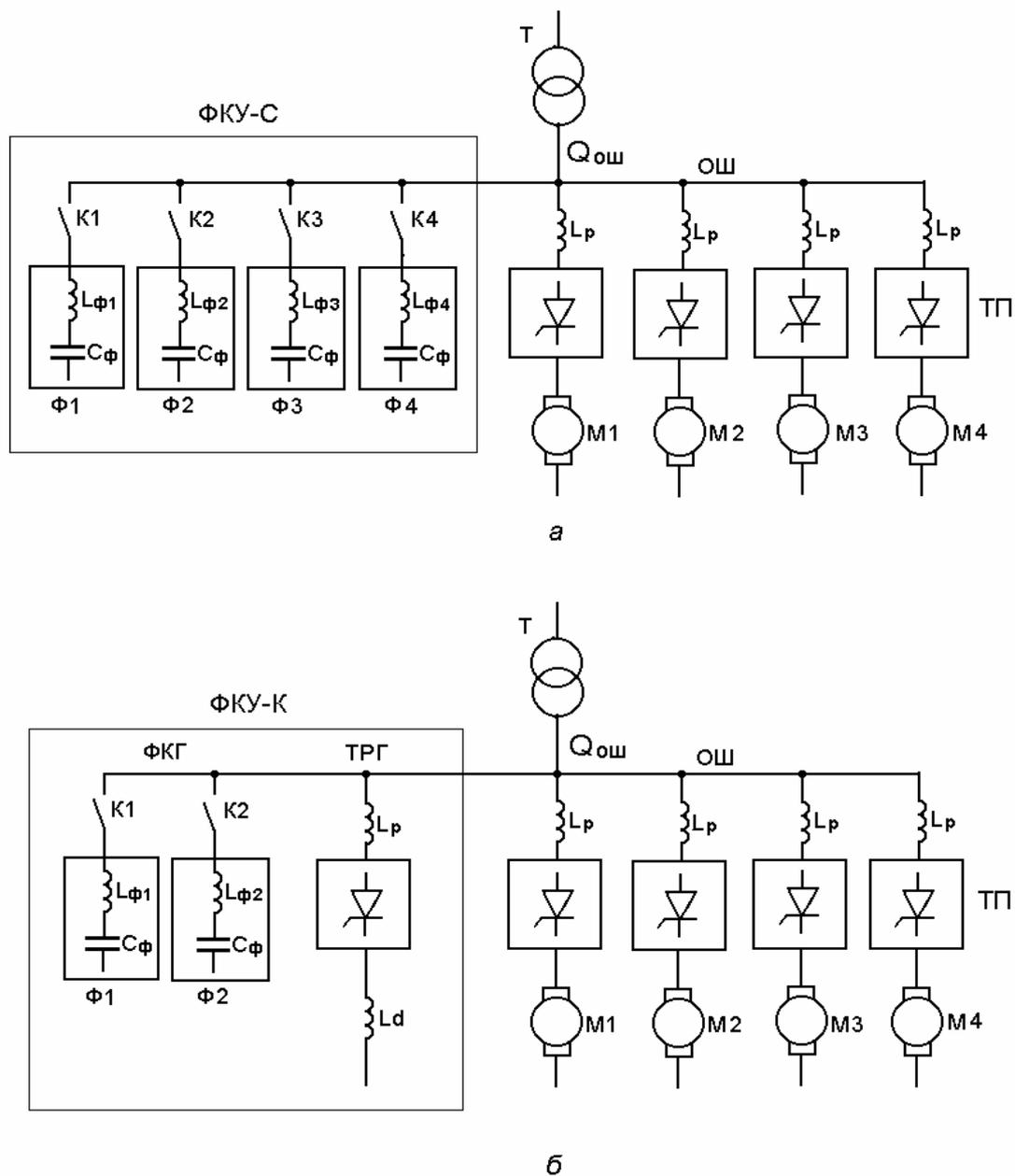


Рис. 2.3. Варианты схем ФКУ:
 а – со ступенчатым регулированием реактивной мощности;
 б – с непрерывным «косвенным» регулированием реактивной мощности

При включении ФКУ-С реактивная мощность на ОШ $Q_{\text{ш}}$ равна:

$$Q_{\text{ш}} = Q_{\text{пп}} - Q_{\text{фку-с}},$$

где $Q_{\text{пп}}$ – реактивная мощность, потребляемая полупроводниковыми преобразователями (в рассматриваемом случае – тиристорными преобразователями ТП); $Q_{\text{фкв-с}}$ – реактивная мощность, генерируемая ФКУ-С.

ФКУ с непрерывным «косвенным» регулированием. В данном варианте фильтры подключены к сети постоянно. Реактивная мощность, генерируемая ими в сеть, также постоянна. В качестве регулятора суммарной реактивной мощности такой установки могут служить различные варианты управляемых потребителей реактивной мощности.

Мощность управляемой части таких установок выбирается согласно требуемой глубине регулирования ФКУ по реактивной мощности основной частоты.

На рис. 2.3, б показана схема ФКУ с непрерывным «косвенным» регулированием реактивной мощности, содержащая постоянно подключенную к сети фильтро-конденсаторную группу (ФКГ) и тиристорно-реакторную регулирующую группу (ТРГ).

Работа данного типа ФКУ-К характеризуется следующим. Управляемым устройством ФКУ-К является тиристорно-реакторная регулирующая группа (ТРГ). Она представляет собой тиристорный преобразователь, в цепь выпрямленного тока которого включён сглаживающий реактор. Индуктивность сглаживающего реактора в ТРГ выбирается из условия обеспечения гранично-непрерывного режима при заданном выпрямленном токе. В случае, когда имеет место большая индуктивная мощность нагрузки, ТРГ «закрывается», и ёмкостная мощность ФКГ полностью отдается в сеть. Когда компенсация не требуется, ТРГ полностью «открывается» и развивает «индуктивную» мощность, при этом суммарная реактивная мощность ФКГ и ТРГ, т.е. общая реактивная мощность ФКУ-К, должна быть близка к нулю. В промежуточных режимах обеспечивается непрерывное регулирование реактивной мощности ФКУ-К по требуемому закону, причем регулирование осуществляется с высоким быстродействием. Таким образом, по условиям компенсации реактивной мощности в резко переменных режимах такая система имеет очевидные преимущества.

Реактивная мощность на ОШ при работе ФКУ-К равна:

$$Q_{\text{ш}} = Q_{\text{пп}} - Q_{\text{фкг}} + Q_{\text{трг}},$$

где $Q_{\text{пп}}$ – реактивная мощность, потребляемая полупроводниковыми преобразователями (в рассматриваемом случае – тиристорными преобразователями ТП); $Q_{\text{фкг}}$ – реактивная мощность, генерируемая ФКГ; $Q_{\text{трп}}$ – реактивная мощность, потребляемая ТРГ.

Существенным достоинством ТРГ в данном случае является то, что в целях унификации электрооборудования может быть использован тот же тип тиристорного преобразователя, какой применяется для регулируемых электроприводов.

Опытные устройства ФКУ-К с тиристорно-реакторной регулирующей группой проходили промышленные испытания на крупном карьерном экскаваторе ЭКГ-20. Такие системы используются на буровых установках. Их применение обеспечило нормальную работу буровых установок при питании от «слабых» линий электропередач до 9 - 11 км, что превышает общепринятые в настоящее время нормы (6 - 8 км) [13]. Некоторые предположительные недостатки ФКУ-К (потери в тиристорной регулирующей группе ТРГ и дополнительные искажения напряжения) в количественном отношении несущественны и поэтому практически не должны являться препятствием для применения.

Перспективным средством компенсации реактивной мощности являются полупроводниковые источники реактивной мощности, в которых применяются запираемые полупроводниковые приборы: двухоперационные тиристоры, силовые транзисторы. Регулирование напряжения в таких преобразователях осуществляется методами широтно-импульсной модуляции. Это позволяет работать как в режиме генерирования реактивной мощности, так и в режиме её потребления. Кроме того, при соответствующем законе управления, полупроводниковые ИРМ пригодны для генерирования управляемых высших гармоник в противофазе с фактическими гармониками вентильных преобразователей. Таким образом, полупроводниковый ИРМ может работать не только в режиме управляемого компенсатора реактивной мощности, но и в режиме активного фильтра высших гармоник.

§ 2.4. Методы повышения качества электроэнергии при работе частотно-регулируемого электропривода переменного тока

Значительный интерес представляет наиболее часто встречающийся на практике случай питания электродвигателя переменного тока от преобразователя частоты со звеном постоянного тока.

Применение ФКУ. В большинстве случаев выпрямитель преобразователя частоты выполнен по трёхфазной мостовой схеме. При этом необходимо различать два варианта выполнения выпрямителя: на тиристорах и диодах. В случае выполнения выпрямителя на тиристорах он является управляемым. В этом случае закономерности влияния частотно-регулируемого электропривода переменного тока на питающую сеть не отличаются от закономерностей влияния на сеть тиристорного электропривода постоянного тока. Поэтому основным способом улучшения качества электроэнергии здесь является ФКУ. При выполнении выпрямителя на диодах коэффициент мощности выпрямителя близок к единице, и потребление реактивной мощности минимально. Отсюда может быть сделан вывод, о том что применение частотно-регулируемого электропривода с неуправляемым выпрямителем позволит обойтись без ФКУ. Однако этот вывод не является бесспорным.

При передаче по питающей линии активной P и реактивной Q мощностей полупроводникового преобразователя потери напряжения составят в ней

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U},$$

где R и X – активное и реактивное сопротивления линии.

Отсюда следует, что даже в идеальном случае, когда реактивная мощность $Q = 0$, передача активной мощности может привести к значительным потерям напряжения в питающей линии, и соответственно к недопустимому отклонению напряжения на вводе электротехнического комплекса (ЭТК) с полупроводниковыми преобразователями, например, при питании мощных преобразователей от линии, имеющей значительную длину. Чтобы обеспечить требуемое отклонение напряжения на вводе ЭТК, необходимо включение ФКУ.

Применение преобразователя частоты с неуправляемым выпрямителем не решает проблемы искажения формы напряжения сети. Для получения нормативного коэффициента искажения синусоидальной формы напряжения сети также необходимо применение ФКУ.

Применение активного выпрямителя. Другим способом улучшения качества электроэнергии при работе частотно-регулируемого электропривода переменного тока является применение

преобразователей частоты с активным выпрямителем. Под активным выпрямителем понимается выпрямитель на полностью управляемых полупроводниковых приборах (например, силовые транзисторы), работающих в релейном режиме или в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Это даёт возможность обеспечить требуемые значения таких показателей качества электроэнергии, как отклонение напряжения на вводе электротехнического комплекса и коэффициент искажения синусоидальной формы напряжения сети, получить коэффициент мощности, равный единице.

Требуемые показатели качества электроэнергии обеспечиваются за счёт алгоритмов управления полупроводниковыми приборами в релейном режиме или режиме ШИМ.

Активные выпрямители позволяют реализовать двухсторонний обмен энергией с питающей сетью и тем самым улучшить энергетические показатели электропривода, обеспечить практически синусоидальный сетевой ток, регулировать коэффициент мощности.

При управлении преобразователем частоты используется прямое микропроцессорное управление. Поэтому усложнение системы управления преобразователем частоты с активным выпрямителем будет касаться только программного обеспечения.

Проблема «длинного» кабеля. В современных преобразователях частоты для регулирования скорости электродвигателей переменного тока широко применяются транзисторные автономные инверторы напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения. Регулирование скорости электродвигателей переменного тока посредством широтно-импульсной модуляции выходного напряжения порождает проблему «длинного» кабеля.

Выходное напряжение АИН представляет собой последовательность прямоугольных импульсов высокой частоты. Импульсы имеют различную полярность и длительность. Амплитуда импульсов одинакова и равна постоянному напряжению на входе АИН. Высокая крутизна импульсов напряжения отрицательно влияет на качество переходных процессов в цепи АИН – соединительный кабель – асинхронный двигатель. Прохождение импульсного сигнала с крутым фронтом вызывает колебательные процессы в кабеле, приводящие к появлению перенапряжений на зажимах АД. С увеличением длины кабеля импульсы напряжения, прикладываемого к обмоткам АД, значительно возрастают (примерно в 2 раза). Импульсные перенапряжения приводят к снижению срока службы изоляции обмоток двигателя.

На практике применяются два эффективных способа ограничения перенапряжений на обмотках АД: установка последовательного *LC*-фильтра на выходе АИН и установка параллельного *RC*-фильтра непосредственно у зажимов двигателя.

§ 2.5. Математические модели электротехнических комплексов, содержащих электроприводы с полупроводниковыми преобразователями

Выводы об эффективности применения ФКУ можно сделать только после выполнения расчётов ПКЭ для конкретной схемы электроснабжения. Поэтому необходимо иметь математические модели, позволяющие судить о качестве электроэнергии при различных режимах работы электроприводов. Ввиду сложности математических моделей электроприводов с полупроводниковыми преобразователями, рассчитать их характеристики можно только на ЭВМ.

При расчётах энергетических показателей ЭТК для наиболее часто встречающегося на практике случая, когда полупроводниковый преобразователь является выпрямителем, применяется математическая модель, в основу которой положен метод гармонических составляющих. Суть этого метода заключается в переходе от дифференциальных уравнений относительно мгновенных значений токов и напряжений к алгебраическим относительно высших гармоник искомых токов и напряжений. Математическая модель, описание которой дано в [14, 15], учитывает одновременную работу нескольких электроприводов, процессы коммутации в преобразователях, пульсации выпрямленного тока, структуру системы электроснабжения. Данная математическая модель может быть использована для расчёта энергетических показателей при работе тиристорных электроприводов постоянного тока и электроприводов переменного тока, получающих питание от преобразователей частоты со звеном постоянного тока. Методика расчёта энергетических показателей по методу гармонических составляющих состоит из ряда этапов: составление схемы замещения электротехнического комплекса; написание уравнений установившегося режима работы по методу узловых потенциалов и уравнений связи между высшими гармониками фазного тока ТП и напряжением сети; решение уравнений; определение ПКЭ. Этапы данной методики поясняются на следующем примере.

1. Схема электротехнического комплекса. На рис. 2.4, а приведена однолинейная схема участка электрической сети, питающей тиристорные электроприводы постоянного тока. Электроснабжение установки осуществляется от воздушной линии электропередачи ВЛ напряжением 6 кВ. Электроэнергия от силового трансформатора Т поступает на общие шины с номинальным напряжением 660 В. От общих шин питаются все тиристорные преобразователи электроприводов. Используется ФКУ ступенчатого типа ФКУ–С, содержащее 2 ступени – Ф1 и Ф2. Работают также вспомогательные электропотребители ЭВ.

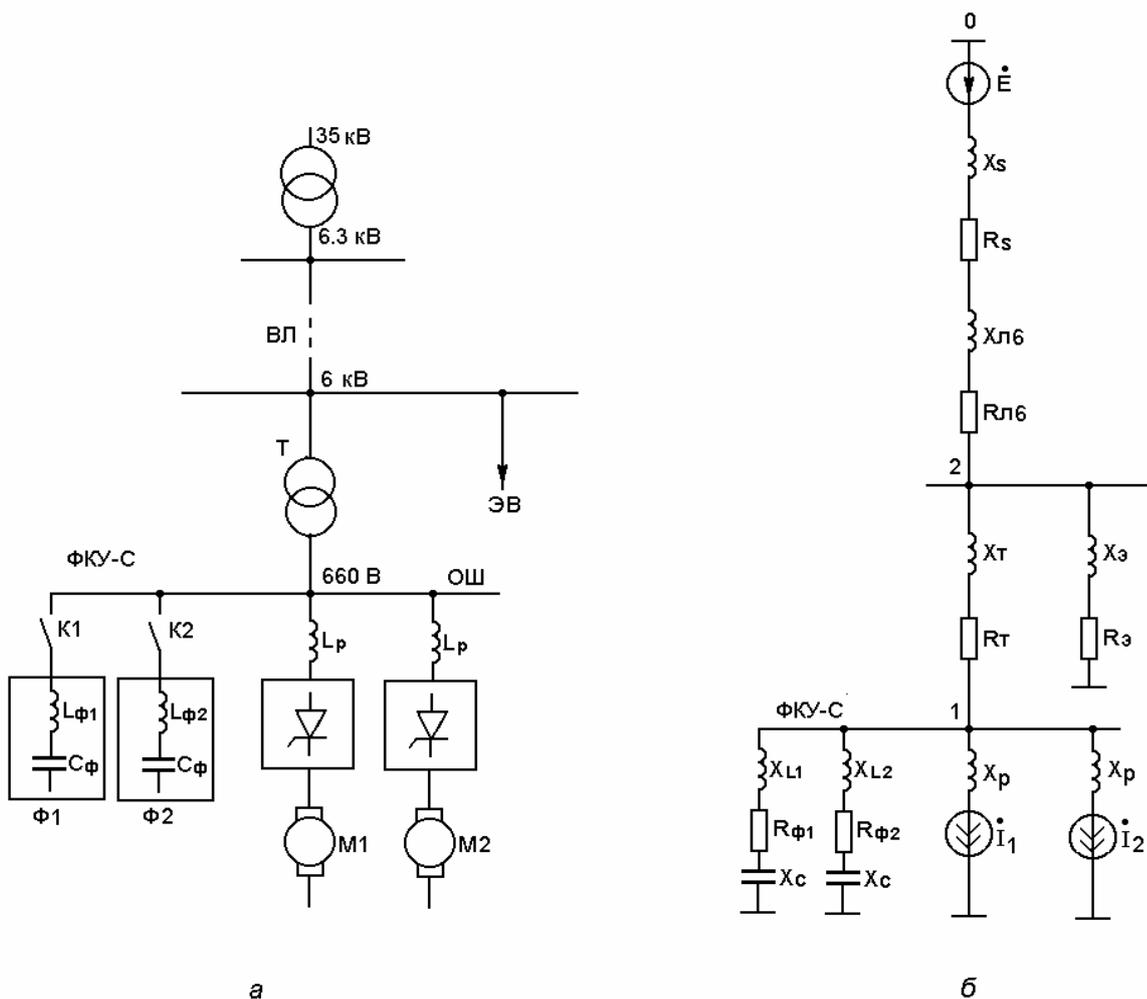


Рис. 2.4. Однолинейная схема участка электрической сети, питающей тиристорные электроприводы постоянного тока (а) и её схема замещения (б)

2. Уравнения установившегося режима работы. На рис. 2.4, б показана схема замещения электротехнического комплекса. Параметры всех элементов схемы замещения приведены к напряжению 6 кВ. Данная схема содержит следующие основные элементы: источник синусоидальной ЭДС E , комплексные сопротивления: элементов системы электроснабжения до линии электропередачи 6 кВ $Z_s = R_s + jX_s$, линии электропередачи 6 кВ $Z_{л6} = R_{л6} + jX_{л6}$, силового трансформатора $Z_m = R_m + jX_m$, вспомогательных электропотребителей $Z_3 = R_3 + jX_3$, ступеней ФКУ–С $Z_{\phi 1} = R_{\phi 1} + j(X_{L1} - X_C)$ и $Z_{\phi 2} = R_{\phi 2} + j(X_{L2} - X_C)$, сетевых реакторов X_p ; источники тока I_1, I_2 , которые моделируют работу тиристорных электроприводов постоянного тока и определяют их влияние на сеть.

В установившемся режиме все токи и напряжения являются периодическими функциями времени, их можно разложить в ряды Фурье в комплексной форме. Если предположить, что внешняя по отношению ко всем преобразователям трёхфазная электрическая сеть обладает линейными параметрами и симметрична, то, согласно принципу наложения, расчёт схемы производят для каждой комплексной амплитуды ряда Фурье отдельно, после чего можно найти реальные токи и напряжения в системе.

Для схемы замещения рис. 2.4, б можно составить по методу узловых потенциалов уравнения, решение которых позволяет найти токи и напряжения в исследуемой системе. Данная схема содержит два независимых узла – 1 и 2. Потенциал узла 0 принимается равным нулю. В общем случае для произвольной гармоники с номером ν могут быть записаны следующие уравнения для узловых потенциалов:

$$\text{для узла 1} \quad \phi_{1\nu} \cdot G_{11\nu} + \phi_{2\nu} \cdot G_{12\nu} = \dot{I}_{11\nu}; \quad (2.2)$$

$$\text{для узла 2} \quad \phi_{1\nu} \cdot G_{21\nu} + \phi_{2\nu} \cdot G_{22\nu} = \dot{I}_{22\nu}, \quad (2.3)$$

где $\phi_{1\nu}, \phi_{2\nu}$ – комплексные амплитуды гармоник потенциалов 1-го и 2-го узлов; $G_{11\nu}, G_{22\nu}$ – сумма проводимостей ветвей, сходящихся в узлах 1 и 2; $G_{12\nu} = G_{21\nu}$ – сумма проводимостей ветвей, соединяющих узлы 1 и 2, взятая со знаком минус; $\dot{I}_{11\nu}, \dot{I}_{22\nu}$ – комплексные амплитуды узловых токов узла 1 и узла 2.

Проводимости в уравнениях (2.2) – (2.3) вычисляются по следующим формулам:

$$G_{11\nu} = \frac{1}{R_m + j \cdot \nu \cdot X_m} + \frac{1}{R_{\phi 1} + j \cdot \left(\nu \cdot X_{L1} - \frac{X_C}{\nu} \right)} + \frac{1}{R_{\phi 2} + j \cdot \left(\nu \cdot X_{L2} - \frac{X_C}{\nu} \right)};$$

$$G_{22\nu} = \frac{1}{(R_{\lambda 6} + R_s) + j \cdot \nu \cdot (X_{\lambda 6} + X_s)} + \frac{1}{R_m + j \cdot \nu \cdot X_m} + \frac{1}{R_9 + j \cdot \nu \cdot X_9};$$

$$G_{12\nu} = G_{21\nu} = -\frac{1}{R_m + j \cdot \nu \cdot X_m}.$$

Узловые токи вычисляются по формулам:

$$\dot{I}_{11} = -\sum_{i=1}^M \dot{I}_{i\nu} ; \dot{I}_{22\nu} = \dot{E}_\nu \cdot \left(\frac{1}{(R_{\lambda 6} + R_s) + j \cdot \nu \cdot (X_{\lambda 6} + X_s)} \right),$$

где $\dot{I}_{i\nu}$ – комплексные амплитуды гармоник фазных токов со стороны переменного напряжения тиристорных преобразователей; M – число работающих преобразователей; \dot{E}_ν – комплексная амплитуда гармоники ЭДС системы.

В рассматриваемом ЭТК применяются трёхфазные мостовые преобразователи. Поэтому токи и напряжения в трёхфазной цепи содержат гармоники, номера которых удовлетворяют условию $\nu = 6k \pm 1$, где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. Указанные уравнения записываются для всех гармоник, для которых справедливо данное условие. Полученная система уравнений полностью описывает установившиеся процессы в системе. При решении уравнений заданным является источник синусоидальной ЭДС E . Все высшие гармоники ЭДС в узле 0 равны нулю.

Решая полученные уравнения, можно найти реальные токи и напряжения в системе. Однако, в уравнениях, кроме узловых потенциалов, неизвестными величинами также являются высшие гармонические составляющие фазных токов тиристорных преобразователей $\dot{I}_{i\nu}$, т. е. число неизвестных здесь превышает число уравнений. Поэтому необходимо иметь уравнения связи между неизвестными $\dot{I}_{i\nu}$ и потенциалами тех узлов, к которым подключены преобразователи.

В качестве уравнений связи рекомендуется использовать уравнения, приведённые в [14, 15], которые получены при совместном применении метода гармонических составляющих и преобразования Лапласа. Уравнения связи выведены в общем виде и могут применяться для исследования систем, содержащих тиристорные электроприводы.

3. Уравнение связи между высшими гармониками фазного тока ТП и напряжением сети. Комплексные амплитуды фазных токов со стороны питания каждого i -го ТП с учётом пульсаций выпрямленных

токов находятся по формуле [10, 11]:

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{i\nu} = & \frac{(1 - \exp(-j\nu\rho))(1 - \exp(-j\nu\pi))}{4\pi\nu X_{pi}} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \dot{U}_{mk} \left[\frac{(-1 + \exp(jk\rho))}{k - \nu} \right. \\
 & (\exp(j(k - \nu)(\tau_o + \alpha_i + \gamma_i) - \exp(j(k - \nu)(\tau_o + \alpha_i))) - \\
 & \left. \frac{(1 - \exp(-j\nu\rho))(1 - \exp(-j\nu\pi))}{4\pi\nu j} \right] \\
 & \cdot \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{+\infty} \dot{I}_{\text{яин}} \frac{\exp(j(6n - \nu)(\tau_o + \alpha_i)) \cdot 6n(1 + \exp(j(6n - \nu)\gamma_i))}{6n - \nu},
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

где $\dot{I}_{i\nu}$ – комплексная амплитуда ν -ой гармоники фазного тока i -го ТП, подключённого к узлу сети переменного тока, номер которого равен m (в нашем случае узел 1); \dot{U}_{mk} – комплексная амплитуда k -й гармоники фазного напряжения в узле сети, номер которого равен m ; $\dot{I}_{\text{яин}}$ – комплексная амплитуда n -й гармоники выпрямленного тока i -го ТП; X_{pi} – индуктивное сопротивление сетевого реактора i -го ТП; α_i – угол управления i -го ТП; γ_i – угол коммутации i -го ТП; $\tau_o = \pi/6$ – момент прохождения через ноль линейной ЭДС системы, относительно которого ведётся отсчёт угла α_i ; $\rho = \frac{2\pi}{3}$ – сдвиг фаз напряжений в трёхфазной системе.

Комплексная амплитуда $\dot{I}_{\text{яин}}$ выпрямленного тока $I_{\text{яи}}$ равна:

$$\dot{I}_{\text{яин}} = \sum_{\nu=-\infty}^{+\infty} \dot{U}_{m\nu} \frac{2 \cdot \exp(-j6n \cdot (\tau_o + \alpha_i))}{T} \cdot [S_{u1} + A_{1\nu} \cdot S_{i1} + (S_{u2} + A_{2\nu} \cdot S_{i2}) \cdot \exp(-j6nT_1)],$$

где $A_{1\nu} = \frac{[(\exp(j\nu T_1) - \exp(-p_1 T_1)) \cdot \exp(-p_2 T_2) \cdot B_{1\nu} + (\exp(j\nu T_2) - \exp(-p_2 T_2)) \cdot B_{2\nu}]}{(1 - E_1 \cdot E_2)}$;

$$A_{2\nu} = \frac{[(\exp(j\nu T_2) - \exp(-p_2 T_2)) \cdot \exp(-p_1 T_1) \cdot B_{2\nu} + (\exp(j\nu T_1) - \exp(-p_1 T_1)) \cdot B_{1\nu}]}{(1 - E_1 \cdot E_2)};$$

$$B_{1\nu} = \frac{\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \exp(j\nu\rho) - \exp(-j\nu\rho)\right) \exp(j\nu(\tau_o + \alpha_i))}{2 \cdot (j\nu \left(\frac{3}{2} X_{pi} + X_{\text{яи}}\right) + R_{\text{яи}})}; \quad B_{2\nu} = \frac{\exp(j\nu(\tau_o + \alpha_i + \gamma_i))(1 - \exp(-j\nu\rho))}{2 \cdot (j\nu(2X_{pi} + X_{\text{яи}}) + R_{\text{яи}})};$$

$$S_{i1} = -\frac{(\exp(-T_1(p_1 + j6n)) - 1)}{p_1 + j6n}; S_{i2} = -\frac{(\exp(-T_2(p_2 + j6n)) - 1)}{p_2 + j6n};$$

$$S_{u1} = B_{1v} \cdot \frac{\exp((j\ell - j6n)T_1) - 1}{j\ell - j6n} - B_{1v} \frac{\exp(-T_1(p_1 + j6n)) - 1}{p_1 + j6n};$$

$$S_{u2} = B_{2v} \frac{(\exp((j\ell - j6n)T_2) - 1)}{j\ell - j6n} - B_{2v} \frac{(\exp(-T_2(p_2 + j6n)) - 1)}{p_2 + j6n};$$

$$E_1 = \exp(-p_1 T_1); E_2 = \exp(-p_2 T_2); \quad p_1 = \frac{R_{яi}}{\frac{3}{2}X_{pi} + X_{яi}}; \quad p_2 = \frac{R_{яi}}{2X_{pi} + X_{яi}};$$

$T_1 = \gamma_i$ – длительность коммутации тиристоров; $T_2 = (\rho/2) - \gamma_i$ – длительность участка отсутствия коммутации; $T = T_1 + T_2$ – период пульсаций выпрямленного тока; $X_{яi}, R_{яi}$ – индуктивное и активное сопротивления цепи выпрямленного тока i -го ТП.

4. Методика решения уравнений. При решении уравнений (2.2) и (2.3) совместно с уравнениями связи (2.4) возникает трудность, связанная с тем, что коэффициенты в уравнениях связи зависят от углов управления α_i и коммутации γ_i всех ТП. Эти углы в общем случае неизвестны. В то же время заданными величинами являются средние значения выпрямленных токов и напряжений всех тиристорных электроприводов, так как их значения определяются условиями технологии работы электроприводов. С другой стороны, средние значения выпрямленных токов и напряжений для каждого i -го ТП с учётом пульсаций выпрямленных токов являются функциями углов управления α_i и коммутации γ_i и находятся по формулам, приведённым в [14, 15]:

Среднее значение выпрямленного тока равно:

$$I_{di} = \frac{1}{4X_{pi}} \sum_{v=-\infty}^{+\infty} U_{mv} \frac{(1 - \exp(jv\rho))}{jv} \cdot (\exp(jv(\tau_o + \alpha_i + \gamma_i)) - \exp(jv(\tau_o + \alpha_i))) -$$

$$- \frac{1}{4} \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{+\infty} I_{яin} (\exp(j6n\gamma_i) + 1) \exp(j6n(\tau + \alpha_i)). \quad (2.5)$$

Среднее значение выпрямленного напряжения U_{di} равно:

$$\begin{aligned}
U_{di} = & \sum_{\nu=-\infty}^{+\infty} \frac{U_{m\nu}}{2j\rho\nu} (\exp(j\rho\nu) - 1) \cdot \exp(j\nu(\tau_0 + \alpha_i)) \cdot (1 + \exp(j\nu\gamma_i)) + \\
& + \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{+\infty} \frac{X_{pi}}{2\rho} \exp(j6n(\tau_0 + \alpha_i)) (\exp(j6n\gamma_i) - 1) \cdot I_{\text{яин}}.
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Следовательно, при нахождении высших гармоник напряжения необходимо совместно решать систему уравнений, состоящую из уравнений (2.2), (2.3) и уравнений для средних значений выпрямленных токов и напряжений (2.5) и (2.6).

Так как система уравнений является нелинейной, то в качестве метода их совместного решения рекомендуется метод Ньютона. При этом предварительно необходимо задаваться углами γ_i и α_i всех ТП и потенциалами во всех узлах схемы.

Следует отметить, что уравнения узловых потенциалов (2.2), (2.3) записываются для каждой высшей гармоники и поэтому общая система уравнений содержит бесконечное число неизвестных. В этом случае необходимо ограничиться конечным числом высших гармоник узловых потенциалов без ущерба для точности вычисления энергетических показателей.

При решении составленной системы уравнений находятся основная и высшие гармоники узловых потенциалов. Далее, по закону Ома находятся гармоники токов, протекающих через каждый элемент и гармоники напряжений на каждом элементе. По известным значениям токов и напряжений определяются активные и реактивные мощности в системе, потери мощности в элементах системы, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.

На основании предложенной математической модели разработана программа расчета на ЭВМ уравнений, учитывающая структуру энергетических систем, одновременную работу нескольких ТП и наличие ФКУ.

5. Пример расчёта. Созданная математическая модель позволяет выполнить расчеты различных электроэнергетических показателей для системы электроснабжения, например, рассчитать зависимость их изменения от какой-либо величины, принимаемой за независимую переменную. В качестве независимой переменной удобно принять длину питающей высоковольтной линии 6 кВ $L_{л6}$; с увеличением длины линии отклонение напряжения не должно выходить за допустимый предел. Находились следующие величины: отклонение напряжения на

вводе от номинального значения V , %; коэффициент искажения синусоидальности напряжения на вводе K_u , %; потери мощности в системе электроснабжения соизмеримой мощности P_n , кВт. Все величины рассчитываются при отсутствии и при включении ФКУ.

Графики, иллюстрирующие результаты расчетов приведены на рис. 2.5. На каждом графике штриховой линией показаны кривые при работе без ФКУ, сплошной линией – при работе с ФКУ. Приведенные зависимости построены от длины высоковольтной линии питания 6 кВ для электротехнического комплекса (а – отклонение напряжения на вводе установки; б – коэффициент искажения синусоидальности напряжения сети; в – суммарные потери мощности в системе).

Анализ графиков, приведённых на рис. 2.5, позволяет сделать следующие выводы.

Отклонение напряжения (рис. 2.5, а). По критерию допустимого отклонения напряжения $V=10$ % использование ФКУ позволяет увеличить длину линии от 5,5 до 8 км.

Коэффициент искажения синусоидальности напряжения (рис. 2.5, б). Коэффициент искажения синусоидальности напряжения K_u , благодаря действию ФКУ, значительно снижается и во всех случаях не превышает нормально допустимого значения 5 %.

Потери мощности в системе (рис. 2.5, в). Применение ФКУ обеспечивает весьма существенную экономию электроэнергии главным образом в питающей линии. Так при длине питающей линии 6 км суммарная мощность потерь уменьшается на 20 %.

В случае, когда полупроводниковый преобразователь нельзя представить со стороны системы электроснабжения в виде трёхфазного мостового выпрямителя (например, при исследовании влияния на сеть тиристорного преобразователя напряжения или преобразователя частоты с непосредственной связью), удобно воспользоваться прикладными компьютерными программами, специально предназначенными для анализа и расчёта силовых полупроводниковых схем, содержащих такие вентильные элементы, как диоды, тиристоры, транзисторы. Задачи анализа и расчёта таких схем могут решаться при помощи пакета MatLab, который содержит систему визуального моделирования Simulink и пакет расширения Power System Blockset

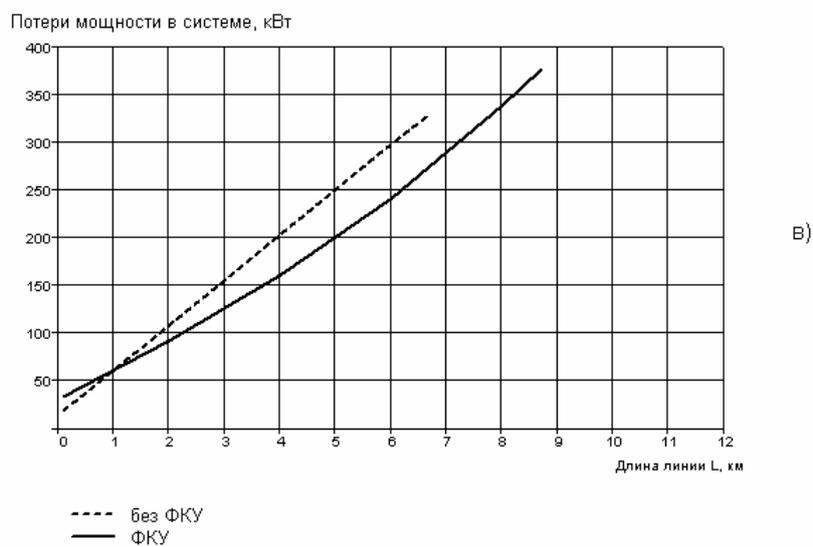
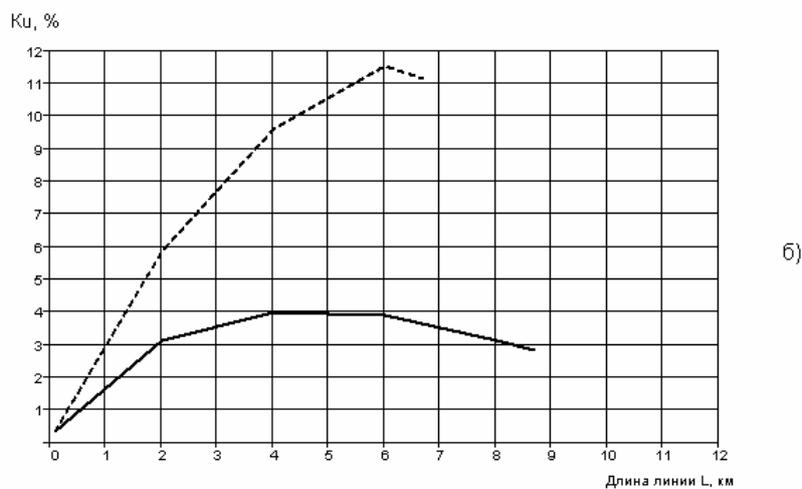
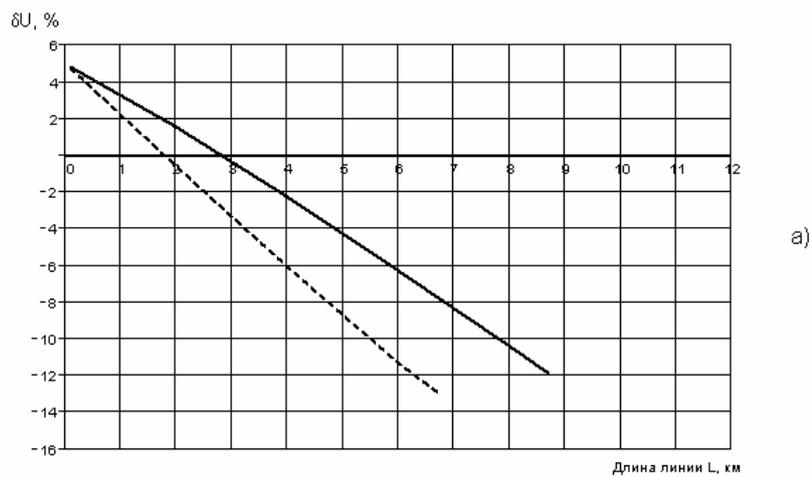


Рис. 2.5. Графики изменения показателей качества электроэнергии

Библиотека пакета Simulink представляет собой набор визуальных объектов, используя которые, можно исследовать практически любую систему электропривода с полупроводниковым преобразователем. Практически для всех блоков существует возможность настройки параметров. Параметры настройки отражаются в панели окна настройки выбранного блока. Пакет Simulink основан на построении блочных схем путём переноса блоков из библиотеки компонентов в окно редактирования создаваемой блок–диаграммы модели. Затем модель запускается на выполнение.

Пакет расширения Power System Blockset служит для моделирования электротехнических систем, содержащих силовые вентильные ключи, преобразовательные устройства, электродвигатели различного типа, устройства управления и т. п. Пакет связан с системой Simulink, имеет свою библиотеку компонент и позволяет проектировать и моделировать электроприводы с полупроводниковыми преобразователями на уровне их функциональных и даже принципиальных электрических схем.

Модели электропривода, разработанные в среде Simulink при использовании пакета расширения Power System Blockset, учитывают особенности элементов реального полупроводникового преобразователя и системы управления, позволяют определить токи и напряжения в системе, активную и реактивную мощности, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения сети.

§ 2.6. Условия возникновения резонансных явлений в системе «сеть – ФКУ»

При произвольном выборе параметров элементов ЭТК из-за наличия конденсаторов на стороне переменного тока возможно возникновение резонанса токов на высших гармониках. Это приводит к значительному искажению формы напряжения сети. Тем самым нормальная работа электроприводов и другого электрооборудования становится невозможной.

На рис. 2.6, а приведена расчётная схема для определения условий возникновения резонансных режимов для случая одноступенчатого ФКУ, которое получено из схемы замещения, приведённой на рис. 2.4, б для идеализированного случая, когда активные сопротивления элементов системы электроснабжения равны нулю, а нагрузка вспомогательных электроприводов ЭВ намного меньше нагрузки электроприводов.

Из расчётной схемы следует, что параллельный резонанс токов на высшей гармонике, номер которой равен ν_p , наступает при выполнении условия:

$$\nu_p \cdot (X_s + X_{л6} + X_m + X_L) = \frac{X_C}{\nu_p}.$$

Номер высшей гармоники, на которой наступает резонанс (относительная резонансная частота ОРЧ), равен

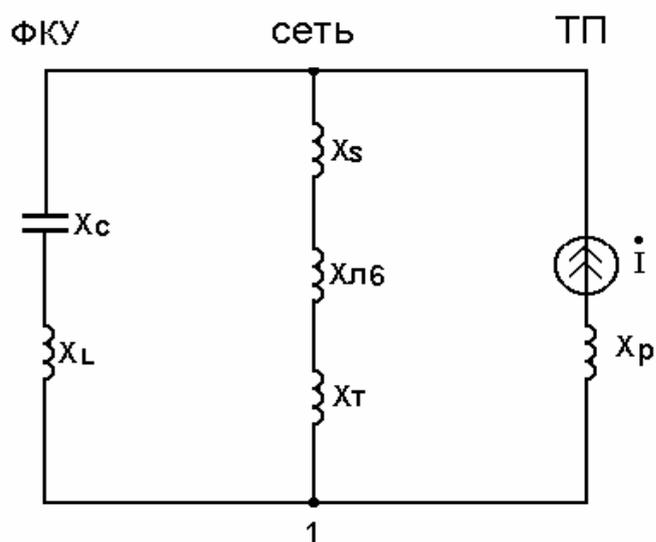
$$\nu_p = \sqrt{\frac{X_C}{X_s + X_{л6} + X_m + X_L}}. \quad (2.7)$$

Из приведённых выражений следует, что резонансная частота уменьшается при увеличении ёмкости конденсаторов (что соответствует уменьшению ёмкостного сопротивления конденсаторов), и увеличивается при уменьшении эквивалентного индуктивного сопротивления сети. При совпадении резонансной частоты с частотой одной из гармоник тока, генерируемых преобразователем, происходит усиление гармоник тока и напряжения в питающей сети.

Настройка ступеней ФКУ на фильтрацию начального спектра канонических высших гармоник исключает возникновение опасных резонансных режимов.

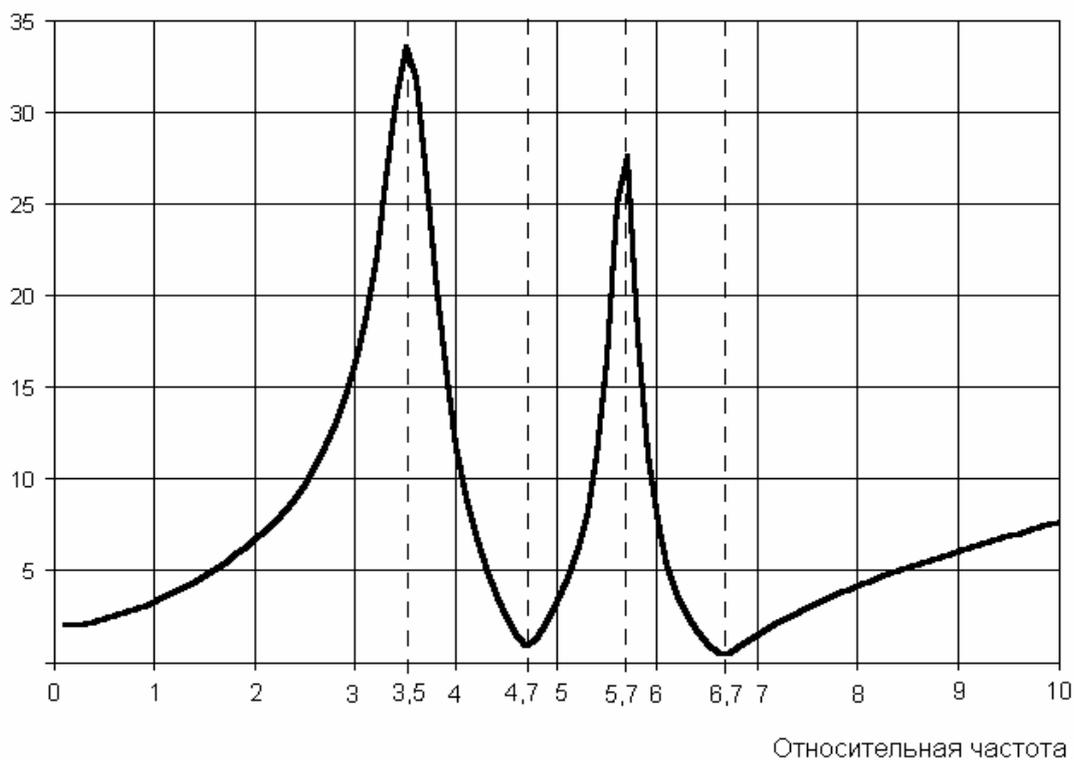
Из условия последовательного резонанса напряжения (2.1) следует, что номер фильтруемой высшей гармоники равен:

$$\nu_\phi = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{L_\phi} \cdot C_\phi} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.8)$$



а

Модуль сопротивления, Ом



б

Рис. 2.6. Расчётная схема для определения условий возникновения резонансных режимов (а) и частотная характеристика сети (б)

Сравнение выражений (2.7) и (2.8) позволяет сделать следующий вывод: резонансная частота всегда ниже частоты настройки фильтра, независимо от индуктивности сети. Следовательно, настройка ступени ФКУ на фильтрацию низшей по номеру канонической гармоники ν_{\min} (для 6-пульсной схемы $\nu_{\min} = 5$, для 12-пульсной $\nu_{\min} = 11$) позволяет исключить возникновение опасных резонансных режимов.

В общем случае расчётная схема замещения для определения условий возникновения резонансных режимов имеет более сложную структуру, чем на рис. 2.6, а. В этом случае для определения условий возникновения резонансных режимов удобно пользоваться частотной характеристикой сети. При исследовании резонансных режимов под частотной характеристикой сети понимается зависимость модуля входного сопротивления сети относительно точки присоединения преобразователя к сети от частоты.

Зная зависимость комплексного входного сопротивления от частоты, можно построить частотную характеристику сети. Максимумы графика частотной характеристики соответствуют частотам, при которых наступает параллельный резонанс токов, минимумы – частотам, при которых наступает последовательный резонанс напряжений в ФКУ.

В качестве примера на рис. 2.6, б построена частотная характеристика сети для схемы рис. 2.4. Ступень ФКУ Ф1 настроена на фильтрацию 5-й гармоники, ступень Ф2 – на фильтрацию 7-й гармоники.

Параллельный резонанс токов наступает при относительных частотах $\nu = 3,5$ и $\nu = 5,7$. При работе трёхфазного шестипульсного мостового преобразователя в системе присутствуют высшие гармоники с номерами $\nu = 5; 7; 11 \dots$. Поэтому в рассматриваемом случае параллельный резонанс токов не наступает.

При выбранных параметрах конденсаторов и реакторов ФКУ последовательный резонанс напряжений наступает при относительных частотах $\nu = 4,7$ и $\nu = 6,7$. Однако близость данных частот к каноническим гармоникам с номерами $\nu = 5$ и 7 позволяет значительно уменьшить содержание высших гармоник в кривой напряжения сети.

§ 2.7. Аналитические зависимости для показателей качества электроэнергии

Для количественной оценки влияния ФКУ и тиристорных электроприводов на отклонение напряжения питания, коэффициент мощности и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на вводе ЭТК удобно воспользоваться аналитическими зависимостями данных показателей от параметров элементов системы электропитания. Для получения этих зависимостей рекомендуется воспользоваться методами теории планирования эксперимента (ТПЭ).

Эксперименты проводились на математической модели, рассмотренной в разделе 2.5, для двух случаев: ФКУ отключено и ФКУ включено. Это сделано с целью сравнения электроэнергетических показателей системы электроснабжения при отсутствии и наличии ФКУ. В обоих случаях работают одновременно два тиристорных электропривода. Токи электроприводов, также как и противо-ЭДС электродвигателей, принимаются равными друг другу.

При отсутствии ФКУ эксперименты проводились для трёх факторов по схеме ПФЭ 2^3 . Варьировались следующие факторы: длина питающей линии 6 кВ, средние значения токов электродвигателей, противо-ЭДС электродвигателей.

При наличии ФКУ эксперименты проводились для четырёх факторов по схеме ПФЭ 2^4 . Варьировались следующие факторы: длина питающей линии 6 кВ, средние значения токов электродвигателей, противо-ЭДС электродвигателей, число включённых ступеней ФКУ. Все ступени ФКУ настроены на фильтрацию 5-й гармоники.

В обоих случаях функциями отклика являются коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения сети K_u в %, отклонение напряжения питания от номинального δU в %, коэффициент мощности по первой гармонике $\cos \varphi$ на вводе ЭТК. Значения выбранных уровней для всех исследуемых факторов и их обозначения в кодированном виде, приведены в табл. 2.2 и 2.3.

Т а б л и ц а 2.2

**Пределы изменения варьируемых факторов
при отсутствии ФКУ**

Факторы	Обозначения	Уровни факторов		
		-1	0	+1
$L_{л6}$, км	$\tilde{\ell}_{л6}$	1	2,8	4,6
I_d , о.е.	\tilde{I}_d	0,5	0,75	1
$E_{\partial в}$, о.е.	$\tilde{E}_{\partial в}$	0,5	0,75	1

Т а б л и ц а 2.3

**Пределы изменения варьируемых факторов
при наличии ФКУ**

Факторы	Обозначения	Уровни факторов		
		- 1	0	+1
$L_{л6}$, км	$\tilde{\ell}_{л6}$	1	4,5	8
I_d , о.е.	\tilde{I}_d	0,5	0,75	1
$E_{\partial в}$, о.е.	$\tilde{E}_{\partial в}$	0,5	0,75	1
Число ступеней ФКУ	\tilde{q}	2	3	4

После вычисления коэффициентов и отбрасывания незначимых эффектов уравнения регрессии принимают следующий вид:

- отсутствие ФКУ.

1) Коэффициент искажения синусоидальности напряжения сети

K_u в %:

$$K_u = 12,99 + 3,04\tilde{\ell}_{л6} + 2,32\tilde{I}_d - 2,21\tilde{E}_{\partial в} - 0,16\tilde{\ell}_{л6}\tilde{I}_d - 1,20\tilde{\ell}_{л6}\tilde{E}_{\partial в} - 1,54\tilde{I}_d\tilde{E}_{\partial в} - 0,63\tilde{\ell}_{л6}\tilde{I}_d\tilde{E}_{\partial в}$$

2) Отклонение напряжения питания от номинального δU в %:

$$\delta U = -4,61 - 3,81\tilde{\ell}_{\text{л6}} - 2,52\tilde{I}_d + 0,60\tilde{E}_{\text{дв}} - 0,94\tilde{\ell}_{\text{л6}}\tilde{I}_d + 0,19\tilde{\ell}_{\text{л6}}\tilde{E}_{\text{дв}} + 0,36\tilde{I}_d\tilde{E}_{\text{дв}} + 0,18\tilde{\ell}_{\text{л6}}\tilde{I}_d\tilde{E}_{\text{дв}}$$

3) Коэффициент мощности по первой гармонике $\cos \varphi$:

$$\cos \varphi = 0,73 + 0,03\tilde{\ell}_{\text{л6}} + 0,16\tilde{E}_{\text{дв}} + 0,02\tilde{I}_d\tilde{E}_{\text{дв}}$$

- наличие ФКУ.

1) Коэффициент искажения синусоидальности напряжения сети

K_u в %:

$$K_u = 5,42 + 1,24\tilde{\ell}_{\text{л6}} + 1,45\tilde{I}_d - 0,78\tilde{E}_{\text{дв}} - 1,10\tilde{q} + 0,1\tilde{\ell}_{\text{л6}}\tilde{I}_d - 0,66\tilde{\ell}_{\text{л6}}\tilde{E}_{\text{дв}} - 0,29\tilde{\ell}_{\text{л6}}\tilde{q} - \\ - 0,76\tilde{I}_d\tilde{E}_{\text{дв}} - 0,12\tilde{I}_d\tilde{q} + 0,39\tilde{E}_{\text{дв}}\tilde{q}$$

2) Отклонение напряжения питания от номинального δU в %:

$$\delta U = -2,94 - 5,23\tilde{\ell}_{\text{л6}} - 3,94\tilde{I}_d + 0,44\tilde{E}_{\text{дв}} + 1,76\tilde{q} - 2,22\tilde{\ell}_{\text{л6}}\tilde{I}_d + 0,12\tilde{\ell}_{\text{л6}}\tilde{E}_{\text{дв}} + 0,69\tilde{\ell}_{\text{л6}}\tilde{q} + \\ + 0,49\tilde{I}_d\tilde{E}_{\text{дв}} - 0,34\tilde{I}_d\tilde{q} - 0,34\tilde{E}_{\text{дв}}\tilde{q}$$

3) Коэффициент мощности по первой гармонике $\cos \varphi$:

$$\cos \varphi = 0,90 - 0,02\tilde{I}_d + 0,06\tilde{E}_{\text{дв}} + 0,02\tilde{q} + 0,04\tilde{I}_d\tilde{E}_{\text{дв}} + 0,03\tilde{I}_d\tilde{q} - 0,04\tilde{E}_{\text{дв}}\tilde{q}$$

Анализ уравнений регрессии позволяет сделать следующие выводы.

Увеличение длины линии и рост тока электродвигателя приводят к возрастанию искажения напряжения сети и к увеличению отклонения напряжения сети от номинального. С ростом против-ЭДС электродвигателя уменьшается коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения сети и увеличивается коэффициент мощности системы. Включение ФКУ и увеличение числа его ступеней приводит к уменьшению коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения сети и к уменьшению отклонения напряжения от номинального, при этом происходит увеличение коэффициента мощности.

Наличие уравнений регрессии позволяет сделать не только качественные выводы о влиянии тех или иных факторов на величину искажения напряжения сети, но и оценить это влияние количественно. При этом необходимо помнить, что полученные уравнения регрессии и все выводы по ним справедливы только в том случае, если значения всех факторов не выходят за границы их варьирования, приведённые в табл. 2.2 и 2.3.

Применение методов ТПЭ позволяет получить простые аналитические зависимости для коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, отклонения напряжения, коэффициента мощности по первой гармонике на вводе установки. На стадии проектирования электротехнического комплекса, содержащего тиристорные электроприводы, полученные зависимости дают возможность оценить правильность предварительного выбора параметров ФКУ.

§ 2.8. Методика выбора ФКУ

Выбор ФКУ должен осуществляться на основе расчёта ПКЭ в точке присоединения преобразователя к сети с учётом взаимозависимости работы всех элементов системы электроснабжения. Только такой подход позволит выбрать ФКУ, которое обеспечит требуемое качество электроэнергии при минимальных стоимости и массогабаритных показателях.

При проектировании ФКУ следует иметь в виду, что необходимость полного снижения уровней гармоник практически отсутствует; достаточно снизить их до предела, определяемого техническими требованиями, например до значения, допустимого согласно ГОСТ 13109-97.

В связи с тем, что расчет режимов и нахождение параметров ФКУ представляет собой сложную многофакторную задачу, при практических разработках целесообразно проводить исследования систем электропривода с ФКУ в два этапа.

На первом этапе, на основе упрощенных расчетов и инженерных соображений, выбираются один – два типовых режима, наиболее тяжелых по отклонению напряжения питания на вводе установки, реактивной мощности и коэффициента искажения синусоидальности напряжения, и для них предварительно выбираются параметры ФКУ.

На втором этапе на ЭВМ выполняются точные расчеты для каждого типового режима работы электроприводов по всем интересующим энергетическим показателям. В случае неудовлетворительного результата следует скорректировать параметры ФКУ и выполнить повторные расчеты, которые требуют уже небольших затрат времени.

На основании сказанного предлагается следующая методика выбора ФКУ для ЭТК с регулируемым электроприводом.

1. Анализ проблемы качества электроэнергии в рассматриваемой системе и разработка технических требований к ФКУ как регулятору качества электроэнергии.

2. Выделение типовых режимов работы установок. Для каждого типового режима работы установок выполняются расчёты активной, реактивной и полной мощностей электроприводов, находится коэффициент мощности.

3. Предварительный выбор реактивной мощности и параметров ФКУ. На основе упрощенных расчетов и инженерных соображений выбираются один - два режима, наиболее тяжелых по отклонению напряжения питания на вводе установки, реактивной мощности и коэффициента искажения синусоидальности напряжения, и для них предварительно выбираются общие параметры и число ступеней ФКУ. Если преобразователь имеет переменный график потребления реактивной мощности, то максимальная реактивная мощность регулируемого ступенчатого ФКУ должна выбираться по режиму максимального потребления реактивной мощности. После выбора числа ступеней и распределения реактивной мощности между ступенями находятся ёмкость и индуктивность для каждой ступени ФКУ.

Далее выбираются конденсаторы и реакторы со значениями ёмкости и индуктивности, близкими к расчётным. Все дальнейшие расчёты выполняются для выбранных конденсаторов и реакторов.

При выборе ФКУ для систем электроснабжения, содержащих полупроводниковые преобразователи, фильтры настраивают на частоты гармоник канонического ряда, начиная с минимального номера. Например, для 6-пульсного преобразователя необходимо устанавливать фильтры, начиная с 5 -й гармоники.

4. Составление схемы замещения и системы уравнений для расчёта энергетических характеристик. Составляется схема замещения для расчёта энергетических характеристик, содержащая источники ЭДС и комплексные сопротивления линий электропередач, силовых трансформаторов, ФКУ и других элементов. Полупроводниковые преобразователи со стороны переменного тока представляются в виде источников тока, которые учитывают влияние преобразователей на сеть. По методу узловых потенциалов для схемы замещения составляются уравнения относительно высших гармоник узловых потенциалов.

5. Точный расчёт энергетических характеристик и проверка соответствия энергетических характеристик требованиям ГОСТ 13109-97 и технического задания.

Для каждого типового режима решается составленная система уравнений. По найденным значениям токов и напряжений для каждого типового режима работы выполняются точные расчёты отклонения первой гармоники напряжения от номинальной величины, значения активной, реактивной и полной мощностей в точках подключения электроприводов, коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, потерь мощности. Далее для каждого типового режима работы осуществляется проверка соответствия отклонения напряжения и коэффициента искажения синусоидальности напряжения сети требованиям ГОСТ 13109-97 и технического задания. Если для определённого режима требования не выполняются, то увеличивается число ступеней ФКУ и заново осуществляется решение уравнений, после чего опять находятся показатели качества электроэнергии и осуществляется их проверка. Этот процесс осуществляется до тех пор, пока не будет обеспечено требуемое качество электроэнергии. Если при данном числе ступеней показатели качества электроэнергии далеки от предельных значений, то количество ступеней ФКУ может быть уменьшено.

6. Проверка правильности выбора элементов ФКУ. Для всех типовых режимов работы и числа ступеней ФКУ осуществляется расчёт токов и напряжений для каждого элемента ФКУ, потерь в ФКУ, осуществляется проверка правильности выбора элементов ФКУ по току и напряжению.

7. Разработка технической документации, необходимой для изготовления ФКУ, его наладки и эксплуатации.

Глава 3. ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Частотно-регулируемые электропривода в своей структуре содержат различные полупроводниковые преобразователи, стоимость которых, как правило, значительна, в силу этого необходимо производить оценки целесообразности применения таких электроприводов для конкретных механизмов и условий их работы.

§ 3.1. Оценка спектрального состава тока и напряжения электропривода подъемной машины

Широкое применение вентильных преобразователей обусловлено высокими технико-экономическими показателями и эксплуатационными достоинствами, соответствующими современным требованиям технологических процессов и поэтому становятся главным средством управляемого преобразования электрической энергии в механическую.

Среди неблагоприятных особенностей вентильных преобразователей, применяемых, в частности, в регулируемых электроприводах (ЭП), ухудшающих их электромагнитную совместимость с примыкающими сетями электроснабжения, наиболее существенными являются потребление реактивной мощности на основной частоте и искажение формы напряжения, сопровождающееся генерированием в сеть высших гармоник.

Обе эти особенности обусловлены коммутацией вентилей, но имеют разный механизм происхождения [22].

Потребление преобразователями реактивной мощности на частоте основной гармоники напряжения происходит из-за того, что коммутация тиристоров приводит к отставанию первой гармоники тока от коммутирующих электродвижущих сил, а искажение формы напряжения – из-за того, что эти же коммутации приводят к появлению высших гармоник в кривой тока.

Высшие гармоники напряжения и тока неблагоприятно влияют на электрооборудование, системы автоматики, релейной защиты, телемеханики и связи: появляются дополнительные потери в электрических машинах, трансформаторах и сетях; затрудняется компенсация реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов; сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов; возрастает ава-

рийность в кабельных сетях; ухудшается качество работы, а иногда появляются сбои в работе систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи.

При работе асинхронных двигателей в условиях несинусоидальности напряжения снижается их коэффициент мощности и вращающий момент на валу. Так, если амплитуды 5^й и 7^й гармоник составляют соответственно ~20 % и 15 % амплитуды основной гармоники, то коэффициент мощности двигателя уменьшается в среднем на 2,6 % в сравнении с его значением при синусоидальном напряжении. Моменты, развиваемые высшими гармониками, незначительны, однако во избежание недопустимого превышения температуры изоляции асинхронных двигателей при наличии дополнительных потерь от высших гармоник необходимо уменьшать нагрузку на валу.

Добавочные потери мощности, обусловленные высшими гармониками, возникают в обмотках, а также в стали статора и ротора асинхронных двигателей.

В тоже время искажения формы напряжения заметно сказываются на возникновении и протекании ионизационных процессов в изоляции электрических машин и трансформаторов. При наличии газовых включений в изоляции возникает ионизация, сущность которой заключается в образовании объемных зарядов и последующей их нейтрализации. Нейтрализация зарядов связана с рассеянием энергии, следствием которого является электрическое, механическое и химическое воздействие на диэлектрик. В результате в изоляции возникают местные дефекты, что приводит к снижению ее электрической прочности, возрастанию диэлектрических потерь и в конечном счете к сокращению срока службы.

Подробные многолетние исследования показывают, что наличие высших гармоник в сетях электроснабжения промышленных предприятия при «заостренной» форме кривой напряжения по сравнению с синусоидальной приводит к ускоренному тепловому старению изоляции электрических машин и трансформаторов [23].

При несинусоидальном напряжении сети происходит ускоренное старение изоляции силовых кабелей. Для подтверждения этого были сопоставлены результаты замеров токов утечки силовых кабелей, проложенных практически одновременно и работающих в сходных температурных условиях [23]. Часть обследованных кабелей работала при синусоидальном напряжении, другая – при уровне высших гармоник в кривой напряжения в пределах $6\% \leq K_{нсв} \leq 8,5\%$ (преобладали 5^я и 7^я гар-

моники). Токи утечки кабелей при несинусоидальном напряжении через 2,5 года эксплуатации оказались в среднем на 36 %, а через 3,5 года – на 43 % больше, чем у кабелей при синусоидальном напряжении.

Опыт эксплуатации свидетельствует о том, что в сетях со значительным удельным весом вентиляльных преобразователей часто возникают однофазные замыкания в кабелях.

При наличии высших гармоник в кривой напряжения процесс старения диэлектрика конденсаторов протекает также более интенсивно, чем в случае, когда конденсаторы подключены к сети с синусоидальной формой напряжения.

Это объясняется тем, что физико-химические процессы в диэлектриках, обуславливающие старение их, значительно ускоряются при высоких частотах электрического поля. Аналогично влияет и дополнительный нагрев, вызванный протеканием высших гармоник тока. При несинусоидальном напряжении на зажимах батареи конденсаторов в их диэлектрике появляются дополнительные активные потери, обусловленные высшими гармониками.

Обычно в сетях электроснабжения промышленных предприятий подключение батареи конденсаторов возможно по одной из трех схем: батарея конденсаторов подключается непосредственно к шинам подстанций, в цепи конденсаторов устанавливается реактор, защищающий батарею от проникновения высших гармоник, по схеме реактор - батарея, используемой в качестве силового резонансного фильтра высших гармоник, иначе называемого фильтрокомпенсирующим устройством.

Отметим также, что в соответствии с ГОСТ 1282 батареи конденсаторов могут длительно работать при перегрузке их токами высших гармоник не более чем на 30 %. Допустимое повышение напряжения составляет 10 %. Однако при длительной эксплуатации конденсаторов в этих условиях срок их службы также сокращается. Кроме того, в условиях промпредприятий конденсаторы часто оказываются в режиме, близком к резонансу токов на частоте какой-либо из гармоник, что приводит нередко к их быстрому выходу из строя.

Учет электроэнергии индукционными счетчиками при несинусоидальных режимах сопряжен со значительными погрешностями, приводящими к «переучету» или «недоучету» потребляемой электроэнергии. При больших искажениях напряжения ($7\% < K_{ncv} \leq 10\%$) и преобладании в спектре 5^й, 7^й, 11^й и 13^й гармоник токов положительные погрешности измерения индуктивными счетчиками энергии, потребляемой тиристорными преобразователями электропривода (ЭП), могут

достигать 3 - 4 %. При этом в наибольшей мере влияние несинусоидальности на погрешности индукционных счетчиков проявляется на частотах 11^й и 13^й гармоник. В тоже время при $K_{НСУ} \leq 5\%$ дополнительные погрешности измерения оказываются пренебрежимо малыми.

Высшие гармоники создают также помехи на системы управления преобразователем, которые приводят к сбоям и последующим их отказам, возможности возникновения гармонической неустойчивости при неправильной работе системы импульсно-фазового управления, сопровождающейся появлением четных гармоник или третьей гармоники и ей кратных. Важно отметить, что гармоническая неустойчивость может возникнуть, если мощность к.з. сети, к которой подключены преобразователи, соизмерима или близка с их мощностью.

На рис. 3.1 приведена принципиальная схема электроснабжения подземного горного предприятия. По этой схеме можно сказать, что высокий уровень гармоник на секциях 6,3 кВ генерируемых преобразователями регулируемых ЭП, негативно влияет не только на работу надземного электрооборудования, но из-за электромагнитной связи между обмотками трансформатора и на работу электрооборудования подземной части.

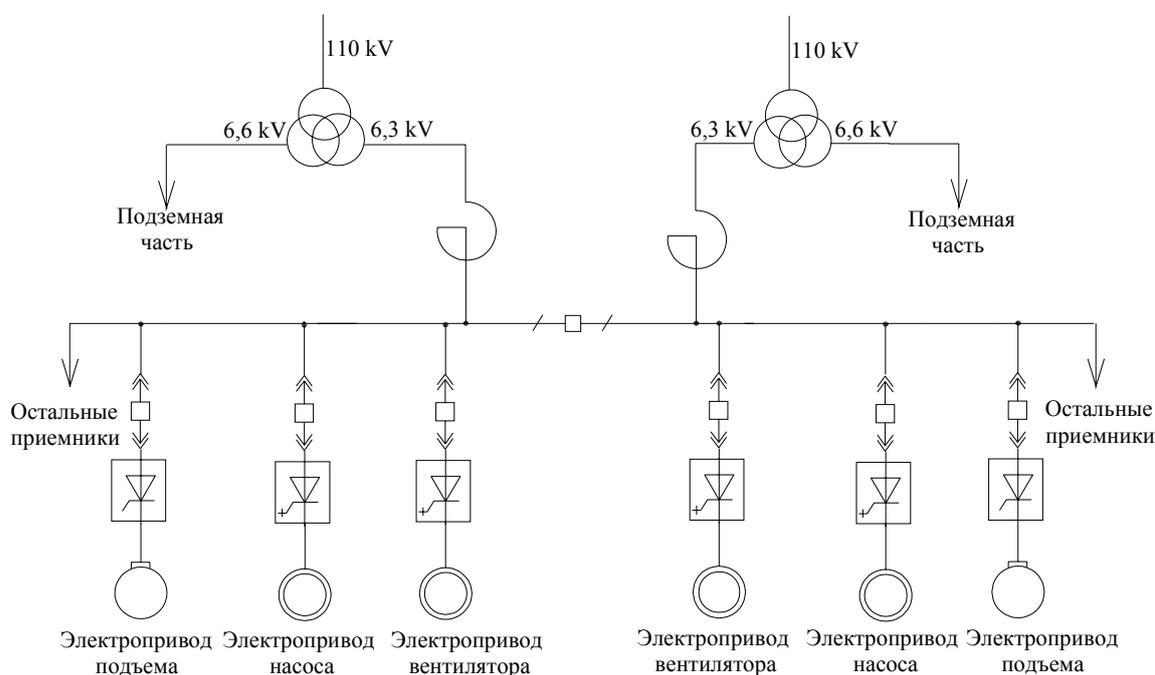


Рис. 3.1. Принципиальная схема электроснабжения подземного горного предприятия

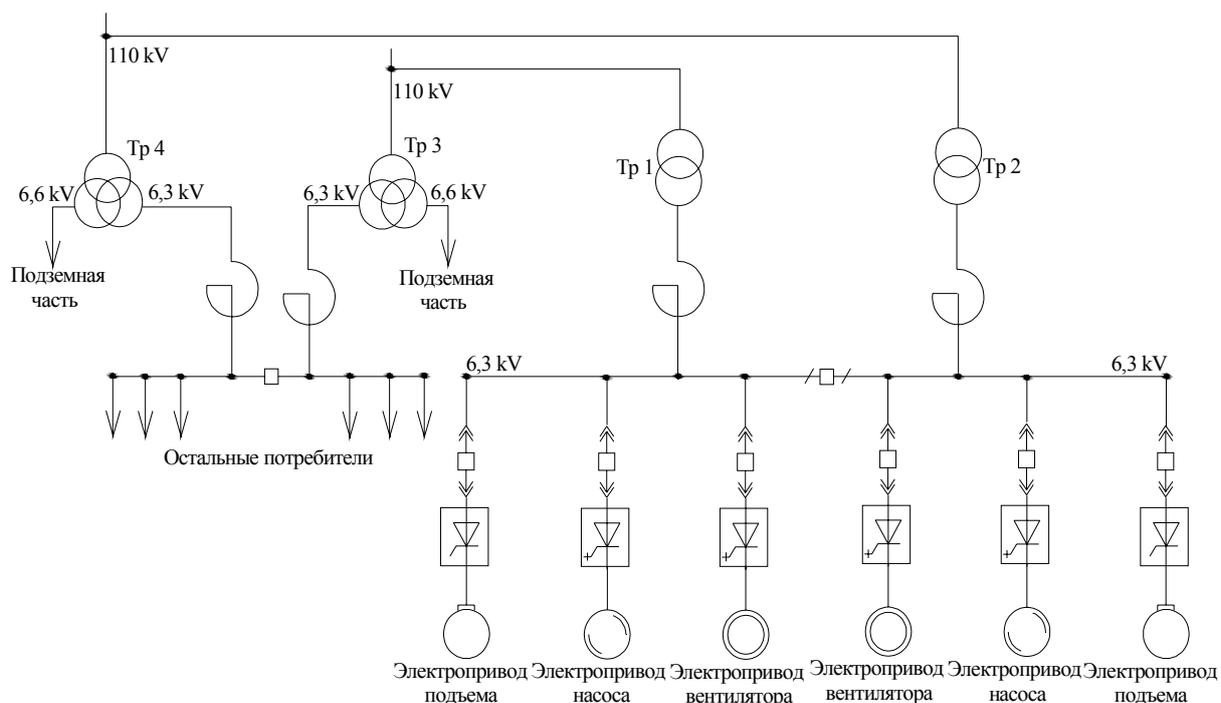


Рис. 3.4. Принципиальная схема электроснабжения при разделении потребителей

Метод применения специальных технических средств, прежде всего, предусматривает применение различного рода фильтров и фильтрокомпенсирующих устройств, которые регулируются на определенные гармоники, особенностью работы фильтров является возможность беспрепятственно пропускать к приемникам тока одних частот и задерживать или пропускать, но с большим затуханием, токи других частот.

§ 3.2. Оценки свойств надежности электроприводов с полупроводниковыми преобразователями

Если варианты системы ЭП различаются по уровню надежности, то к приведенным затратам следует добавить составляющую ущерба Y_n (вероятностная величина годового ущерба от ненадежности системы ЭП).

В общем случае этот ущерб включает в себя следующие составляющие:

1. Ущерб, связанный с неиспользованием основного производственного механизма за время аварийного перерыва в работе, при выходе из строя любого элемента системы ЭП – Y_a ;

2. Ущерб, связанный с восстановлением (ремонт или заменой) вышедшего из строя элемента ЭП, – Y_B ;

3. Ущерб, связанный с расстройством технологического процесса, браком продукции, поломкой основного технологического оборудования и др., при выходе из строя элемента системы ЭП – $Y_{\text{техн}}$:

$$Y_H = Y_A + Y_B + Y_{\text{техн}}.$$

Ущерб Y_A может быть определен следующим образом:

$$Y_A = Z_o^{\wedge} \frac{t_a}{T_r}, \quad (3.1)$$

где Z_o^{\wedge} – постоянная часть затрат на производственный механизм, определяемая по формуле

$$Z_o^{\wedge} = EK^{\wedge} + C_o^{\wedge};$$

t_a – время перерыва в работе технологического оборудования из-за аварийного повреждения элементов системы ЭП, $t_a = \sum_{i=1}^m t_i \lambda_i$ (t_i – вероятная длительность перерыва i -го элемента);

λ_i – интенсивность отказов элементов системы ЭП. По данным экспертного опроса специалистов по эксплуатации, ориентировочные значения параметра для основных элементов системы ЭП приведены в табл. 3.1;

T_r – годовое время работы ЭП;

K^{\wedge} – капитальные затраты на производственный механизм (агрегат, стан, станок);

C_o^{\wedge} – годовые эксплуатационные расходы производственного механизма, не зависящие от производительности.

Т а б л и ц а 3.1

Интенсивность отказов основных элементов электроприводов

Элементы электропривода	λ_i , 1/год	t_i , ч, при мощности		
		до 100 кВт	до 600 кВт	до 1000 кВт

Асинхронные двигатели	0,06	8	16	24
Синхронные двигатели	0,08	8	16	24
Машины постоянного тока	0,1	8	16	24
Трансформаторы, дроссели, реакторы	0,015	8	12	16
Неуправляемые выпрямители	0,02	4	8	12
Управляемые выпрямители и инверторы	0,1	4	8	12

Если отсутствуют данные по величине Z_o^{\wedge} , то для ее определения можно воспользоваться косвенным методом, используя ущерб от недополученной электроэнергии,

$$Z_o^{\wedge} = Y_y W, \quad (3.2)$$

где Y_y и W – удельный ущерб на 1 кВт·ч недополученной электроэнергии и годовое потребление электроэнергии.

Ущерб Y_B , связанный с ремонтом или заменой вышедшего из строя элемента ЭП, можно определить по формуле

$$Y_B = \sum_{i=1}^m K_{pi} \lambda_i,$$

где K_{pi} – вероятная стоимость ремонта i -го элемента системы ЭП.

Ущерб $Y_{\text{техн}}$, связанный с расстройством сложного технологического процесса, с поломкой технологического оборудования, браком продукции и т. п., характерен только для некоторых отраслей промышленности в единичных частных случаях.

При этом следует рассматривать также ущерб для последующих звеньев технологической цепочки, связанных со звеном, вышедшим из строя.

В тех случаях, когда сопоставляемые варианты электрооборудования различаются по уровню надежности, в технико-экономических расчетах необходимо учитывать дополнительный экономический эффект

(ущерб) от отдельных свойств надежности (безотказности, ремонтпригодности и долговечности).

Для оценки экономической эффективности повышения надежности электрооборудования используют следующие основные технико-экономические показатели: технический ресурс $T_{\text{рес}}$, срок службы $T_{\text{сл}}$, среднее время восстановления работоспособного состояния $T_{\text{в}}$, поток отказов λ , дополнительные капитальные затраты ΔK .

Дополнительный экономический эффект от повышения надежности нового электрооборудования по сравнению с базовым определяется по формуле

$$\Delta \mathcal{E} = T_{\text{э}}(R_1 \lambda_1 - R_2 \lambda_2) - \Delta K, \quad (3.3)$$

где $T_{\text{э}}$ – эквивалентный срок службы, определяемый по табл. 3.2 (численные значения $T_{\text{э}}$ определены при коэффициенте дисконта $E = 0,15$);

R_1, R_2 – величины ущербов сравниваемых вариантов.

$$R_{1(2)} = T_{\text{В1(2)}} = (H_{\text{п}} + B_0) + H_0,$$

где $H_{\text{п}}$ – среднее значение составляющей ущерба от отказа, обусловленного недопуском продукции за время вынужденного простоя;

H_0 – среднее значение составляющей ущерба от отказа, обусловленного непосредственно фактом отказа (ликвидаций аварий и поломок);

B_0 – условно–постоянные расходы, отнесенные к технологическому процессу, реализуемому с помощью данного электрооборудования, $B_0 = v_0 S_{\text{н}}$ ($S_{\text{н}}$ – номинальная полная мощность электрооборудования; v_0 – удельные условно–постоянные расходы). Численные значения v_0 зависят от отрасли промышленности и экономической ситуации в стране. В табл. 3.3 приведены соотношения v_0 ряда отраслей промышленности, характерные для 90-х гг. Для отсутствующих в этой таблице отраслей промышленности следует пользоваться средневзвешенным по отраслям значением v_0 .

Т а б л и ц а 3.2

Значения эквивалентного срока службы

Срок службы $T_{сл}$, лет	$T_s = \frac{1 - (1 + \lambda)^{-\lambda \tilde{n}}}{\lambda}$ год	Технический ресурс $T_{рес}$, ч	$T_s = \frac{1 - (1 + E)^{-T_{сл} / 8700 \cdot K_{исп}}}{E}$, год							
			Коэффициент использования по времени $K_{исп}$							
			0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2	1,62	10000	2,75	1,82	1,55	1,35	1,21	1,08	0,98	
4	2,85	20000	4,36	3,14	2,74	2,44	2,19	1,99	1,82	
6	3,78	25000	4,90	3,66	3,24	2,89	2,62	2,39	2,19	
8	4,49	30000	5,30	4,10	3,66	3,30	3,00	2,75	2,54	
10	5,02	40000	5,87	4,81	4,36	3,99	3,66	3,39	3,14	
12	5,42	50000	6,20	5,31	4,90	4,53	4,21	3,92	3,66	
15	5,85	60000	6,39	5,68	5,31	4,97	4,65	4,37	4,11	
20	6,26	80000	6,57	6,14	5,87	5,59	5,31	5,05	4,81	
25	6,45	100000	6,63	6,39	6,20	5,97	5,76	5,53	5,31	

Формула (3.3) является общей для расчета дополнительного экономического эффекта за весь срок службы оборудования при повышении свойств надежности. Эти свойства могут улучшаться различными методами (табл. 3.4).

Т а б л и ц а 3.3

**Удельные условно-постоянные расходы
по отраслям промышленности**

Отрасль промышленности	v_0 , руб./кВА·час
Автомобилестроение	0,5
Электротехническая	1,0
Машиностроение	1,25
Металлургическая	1,5
Строительных материалов	2,2
Текстильная	2,9
Химическая	7,0

Методы повышения надежности

Свойства надежности	Методы повышения надежности
1	2
Безотказность	<p>Замена недостаточно надежных комплектующих элементов наиболее надежными.</p> <p>Снижение коэффициентов нагрузки комплектующих элементов.</p> <p>Введение резервных элементов.</p> <p>Снижение влияния дестабилизирующих факторов внешней среды (температуры, влажности, запыленности и т. д.).</p> <p>Введение в технологический процесс изготовления специальных мероприятий (входной контроль отдельных технологических мероприятий).</p> <p>Введение в технологический процесс изготовления технологического прогона (приработки) составных частей или оборудования в целом</p>
1	2
Ремонтопригодность	<p>Изменение конструкции оборудования или его составных частей с целью обеспечения удобства обслуживания и ремонта.</p> <p>Введение средств диагностики (микроЭВМ, микропроцессоров).</p> <p>Применение в комплекте ЗИП составных частей более высокого уровня сложности (ячеек, модулей, блоков и т. п.)</p>
Долговечность	Замена комплектующих элементов и составных частей на более долговечные

Для частных случаев повышения отдельных свойств надежности (3.3) может быть записана:

- при повышении безотказности

$$\Delta \mathcal{E} = (\lambda_1 - \lambda_2) R T_{\mathcal{E}} - \Delta K; \quad (3.4)$$

- при повышении ремонтпригодности

$$\Delta \mathcal{E} = \lambda T_{\text{э}} (T_{\text{В1}} - T_{\text{В2}}) (B_0 + H_{\text{п}}) - \Delta K; \quad (3.5)$$

- при повышении долговечности

$$\Delta \mathcal{E} = K_1 \frac{T_{\text{э2}}}{T_{\text{э1}}} - K_2; \quad (3.6)$$

- при повышении безотказности и ремонтпригодности

$$\Delta \mathcal{E} = (R_1 \lambda_1 - R_2 \lambda_2) T_{\text{э}} - \Delta K; \quad (3.7)$$

- при повышении безотказности и долговечности

$$\Delta \mathcal{E} = (\lambda_1 - \lambda_2) R T_{\text{э2}} - (K_2 - K_1 \frac{T_{\text{э2}}}{T_{\text{э1}}}); \quad (3.8)$$

- при повышении ремонтпригодности и долговечности

$$\Delta \mathcal{E} = \lambda T_{\text{э}} (T_{\text{В1}} - T_{\text{В2}}) (B_0 + H_{\text{п}}) + (K_2 - K_1 \frac{T_{\text{э2}}}{T_{\text{э1}}}). \quad (3.9)$$

В качестве примера рассмотрим экономическую целесообразность замены импортного преобразователя (вариант 1) электропривода оперативной лебедки земснаряда проекта 1-517-01 на отечественный (вариант 2). Эта замена позволяет повысить надежность работы земснаряда и сократить время простоев по причине отказа преобразователя. Исходные данные приведены в табл. 3.5.

Т а б л и ц а 3.5

Исходные данные для расчета экономического эффекта

Показатель	Обозначение	Единица измерения	Значение показателя	
			Вариант 1	Вариант 2
Мощность привода	$S_{\text{п}}$	кВА	212	212
Дополнительные капитальные затраты	ΔK	руб.	–	17280
Поток отказов	λ	ч^{-1}	$3386 \cdot 10^{-6}$	$2358 \cdot 10^{-6}$

Среднее время восстановления рабочего состояния	$T_{\text{в}}$	ч	23	23
Срок службы привода	$T_{\text{сл}}$	г.	10	10
Ущерб от отказа, обусловленного недовыпуском продукции	$H_{\text{п}}$	руб./г.	63	63
Ущерб от отказа, обусловленного непосредственным фактом отказа	H_0	руб.	13,4	13,4

Поскольку в процессе замены преобразователя изменяется только показатель безотказности, то расчет дополнительного экономического эффекта производим по (3.4). В соответствии с табл. 3.2 $T_3 = 5,02$ года.

Данную в табл. 3.5 размерность параметра потока отказов необходимо привести к размерности год^{-1} с учетом продолжительности навигации (200 суток) и фактического значения коэффициента использования рабочего времени оперативной лебедки $K_{\text{исп}} = 0,7$.

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = (3386 \cdot 10^{-6} - 2358 \cdot 10^{-6}) \cdot 24 \cdot 200 \cdot 0,7 = 3,45 \text{ года}^{-1}.$$

Значения T_3 и $\Delta\lambda$ позволяют вычислить дополнительный экономический эффект от повышения надежности преобразователя ЭП лебедки за весь срок службы.

$$\Delta\mathcal{E} = 3,45 \cdot [23 \cdot (2,2 \cdot 212 - 63) - 13,4] \cdot 5,02 - 17,8 - 1728 = 164,08 \text{ тыс. руб.}$$

Окончательное решение об экономической целесообразности замены импортного преобразователя ЭП на отечественный принимается после расчета экономического эффекта, определяемого с учетом величины

$$\mathcal{E} = (Z_1 - Z_2) + \Delta\mathcal{E},$$

где Z_1 и Z_2 – приведенные затраты по сравниваемым вариантам за весь срок службы. Для земснаряда проекта 1-517-01 они соответственно равны 161,5 и 179,5 тыс. руб. Тогда

$$\mathcal{E} = (161,5 - 179,5) + 194,08 = -18,0 + 194,08 = 176,08 \text{ тыс. руб.}$$

Значение $\Xi > 0$, следовательно, экономически эффективно повысить безотказность оперативной лебедки земснаряда путем замены импортного преобразователя на отечественный.

§ 3.3. Частотно-регулируемый электропривод аппаратов воздушного охлаждения установки гидроочистки дизельного топлива

На сегодняшний день нефтяная компания ООО «ЛУКОЙЛ» имеет крупнейший нефтехимический сектор в России и странах Восточной Европы, удовлетворяет значительную часть внутрироссийского спроса на ряд нефтехимических продуктов, одновременно являясь крупным экспортером своей продукции более чем в 50 стран мира, включая страны Европы, Азии, Африки и Америки. В настоящее время компания занимает ведущее место в нефтехимической отрасли России, стран СНГ и Восточной Европы, являясь:

- крупнейшим в Восточной Европе производителем олефинов (более 1 млн т/год);
- крупнейшим в Восточной Европе производителем полиэтилена (480 тыс. т/год);
- крупнейшим в Восточной Европе и единственным в России производителем нитрила акриловой кислоты – сырья для производства синтетических волокон (4-ое место в Европе);
- единственным в России производителем полиакрилнитрилового волокна;
- владельцем крупнейшего в Европе завода винилхлорида-мономера (более 370 тыс. т/год).

Кроме того, компания производит на предприятиях России и Украины продукцию пиролиза, органического синтеза, топливные фракции и полимерные материалы.

ОАО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» является одним из крупнейших нефтехимических предприятий Нижегородской области и России. Первоначально предприятие предназначалось для удовлетворения нужд в нефтепродуктах промышленного Волго-Вятского экономического региона, но с развитием и внедрением новых технологии стало поставщиком высококачественных нефтепродуктов во многие регионы страны и зарубеж. На предприятии производятся керосин, бензины с различным октановым числом соответствующие

стандартам Евро-3, Евро-4, а с 2010 г. пущена в работу установка по производству бензина, соответствующего стандарту Евро-5. Кроме того, на предприятии производят масла, дизельные топлива, мазут, гудрон, битумы, парафины и прочее. Созданы и работают установки для улучшения качества получаемых нефтепродуктов. Одновременно с этим, предприятие является и одним из наибольшим энергопотребителем в регионе.

Тема проекта – расчет и установка преобразователей частоты (ПЧ) фирмы Siemens типа Micromaster 440 на электроприводы аппаратов воздушного охлаждения (АВГ) установки гидроочистки дизельного топлива Л-24/7.

Аппараты АВГ широко применяются на установках нефтепереработки. Они функциональны и достаточно разнообразны, имеют различные массогабаритные показатели, производительность и условия обслуживания. Из-за недостаточного охлаждения или, наоборот, большого перегрева сырья, идущего на обработку или в конденсат, могут возникнуть проблемы неправильного ведения технологического процесса и, как следствие, увеличение брака, несоответствие стандартам качества выпускаемой продукции, ухудшение глубины переработки. Повышение эффективности работы подобных аппаратов позволяет сократить расход топлива и энергии, затрачиваемой на тот или иной процесс, и оказывает существенное влияние на его технико-экономические показатели. Так как аппараты воздушного охлаждения имеют длительный режим работы, то выход из строя преобразователей частоты не должен заметно влиять на ведение технологического процесса, т. е. АВГ должны работать непрерывно. Таким образом, помимо основной задачи проекта (внедрение преобразователей частоты и описание различных положительных моментов от их применения) планируется рассмотреть и внедрение и резервной схемы. Основная ее цель – обеспечить работоспособность АВГ при выходе из строя преобразователя частоты.

Аппараты АВГ расположены на открытом воздухе и имеют длительный режим работы. Нефтепродукт протекает по трубам и охлаждается за счет потока воздуха, нагнетаемого аппаратом. Двигатель при этом круглый год работает на номинальных оборотах. Однако в зимний период времени, когда имеется естественное охлаждение вследствие понижения температуры окружающего воздуха, такой режим работы электродвигателя не требуется. Охлаждению нефтепродукта «помогает» окружающая среда. Следовательно, в зимний период вре-

мени с помощью частотного преобразователя Micromaster 440 можно установить такую частоту вращения электродвигателя, при которой будет обеспечиваться необходимое охлаждение продукта и при меньшей скорости вращения вентилятора. Достигается это за счет регулирования скорости приводного электродвигателя. При этом, соответственно, будет и меньшее потребление электроэнергии.

Для осуществления вышеперечисленного необходимо знать годовой график изменения температуры окружающей среды (рис. 3.5).

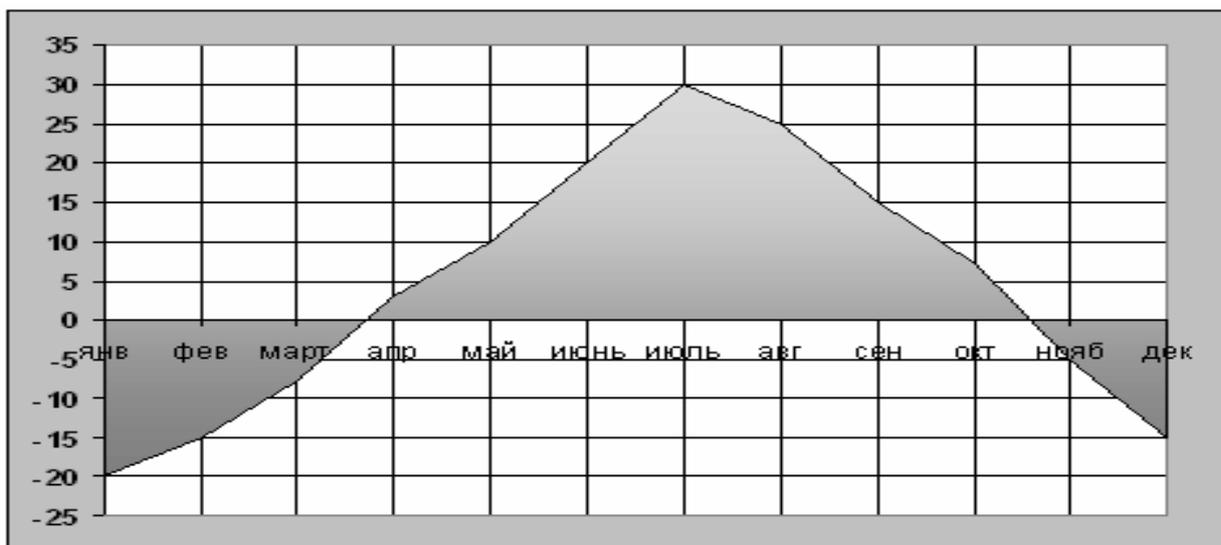


Рис. 3.5. Среднегодовой график изменения температуры

В летний период приводной электродвигатель работает на номинальной скорости вращения ($\omega = 44,87$ рад/с, $P_n = 37$ кВт). В зимний период необходимо снизить скорости вращения до значения $38,5$ рад/с., при этом мощность привода:

$$\begin{aligned} (44,87 \text{ рад/с})^3 &\rightarrow 37 \text{ кВт} \\ (38,5 \text{ рад/с})^3 &\rightarrow x \end{aligned} \quad (3.10)$$

За величину «X» в данной пропорции принята мощность привода при работе на скорости $38,5$ рад/с. Так как нагрузка вентиляторного типа, то момент изменяется пропорционально квадрату скорости, а мощность изменяется, соответственно, кубу скорости (т. к. $P = M \cdot \omega$).

$$x = \frac{(38,5)^3 \cdot 37}{(44,87)^3} = 23,4 \text{ кВт}.$$

Таким образом, мощность, потребляемая электродвигателем на скорости $38,5$ рад/с, составляет $23,4$ кВт.

Аналогично определим мощность, потребляемую электродвигателем за период «зима/лето». В этот период скорость двигателя должна быть несколько больше, чем в зимний период (т. к. температура окружающей среды повышается), но меньше номинальной и составляет 40 рад/с.

$$(44,87 \text{ рад/с})^3 \rightarrow 37 \text{ кВт}$$

$$(40 \text{ рад/с})^3 \rightarrow x$$

$$x = \frac{(40)^3 \cdot 37}{(44,87)^3} = 26 \text{ кВт}$$

График изменения потребляемой мощности за год представлен на рис. 3.6. Определим годовое число часов использования максимума нагрузки (T_M). Как видно из рис. 3.6, максимум нагрузки приходится с апреля по сентябрь включительно. Это составляет 183 дня или 4392 часа. Следовательно, $T_M = 4392$ ч/год.

Фактическая стоимость 1 кВт часа электроэнергии составляет $C_{уэ} = 3,8$ руб./кВт ч.

Продолжительность зимнего периода – 4 месяца или 120 дней (2880 часов). Следовательно, экономия за зимний период составит:

$$\mathcal{E}_{ЗИМ} = 13,6 \cdot C_{уэ} \cdot 2880 = 13,6 \cdot 3,8 \cdot 2880 = 148838 \text{ руб.}$$

Аналогично определим экономию за период «зима-лето». Период составляет 2 месяца (март, октябрь) или 62 дня (1488 часов), тогда

$$\mathcal{E}_{ЗИМ/ЛЕТО} = 11 \cdot C_{уэ} \cdot 1488 = 11 \cdot 3,8 \cdot 1488 = 62498,4 \text{ руб.}$$

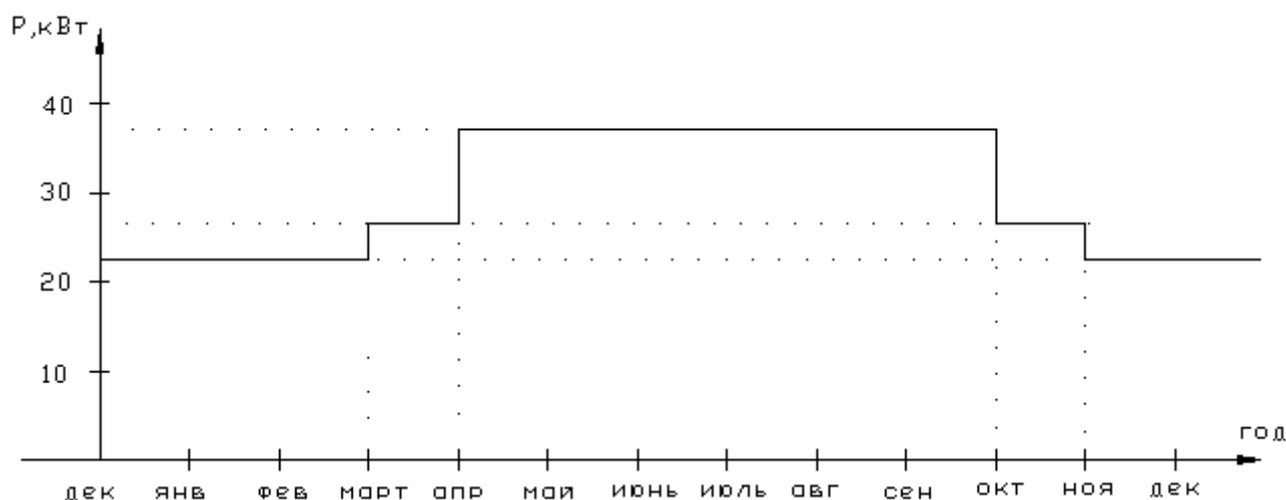


Рис. 3.6. Годовой график изменения мощности

Общая экономия за год составит:

$$\mathcal{E}_{\text{ОБЩ}}^{\text{ГОД}} = \mathcal{E}_{\text{ЗИМ}} + \mathcal{E}_{\text{ЗИМ/ЛЕТО}} = 148838 + 62498,4 = 211336,4 \text{ руб.}$$

С учетом того, что в производство внедряются пять аналогичных преобразователей, найденное значение необходимо умножить на пять и экономия в целом по производству составит

$$\mathcal{E}_{\text{ПРОИЗ}} = 5 \cdot \mathcal{E}_{\text{ОБЩ}}^{\text{ГОД}} = 5 \cdot 211336,4 = 1056682 \text{ руб.}$$

Согласно данным начальника производства смазочных масел, внедрение преобразователей частоты Micromaster 440 на электроприводах позволили сократить общее потребление электроэнергии в целом по производству на 471,5 кВт (один преобразователь частоты позволяет экономить в среднем до 52,5 кВт).

Суммарная экономия электроэнергии за год одним преобразователем составляет 24,6кВт.

В итоге, годовой график изменения потребляемой мощности соответствует рис. 3.7.

Экономия затрат на потери электроэнергии при начале внедрения преобразователя Micromaster 440 с 2011 г. представлена на рис. 3.8.

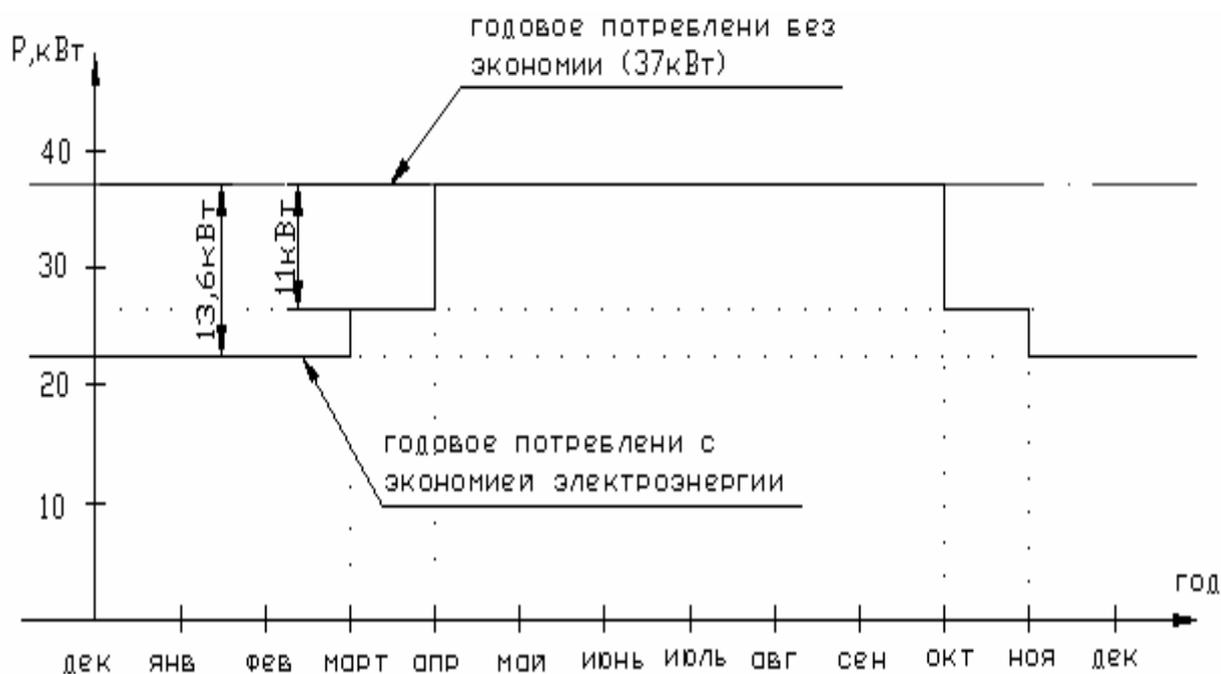


Рис. 3.7. Годовой график изменения потребляемой мощности с учетом экономии за зимний период

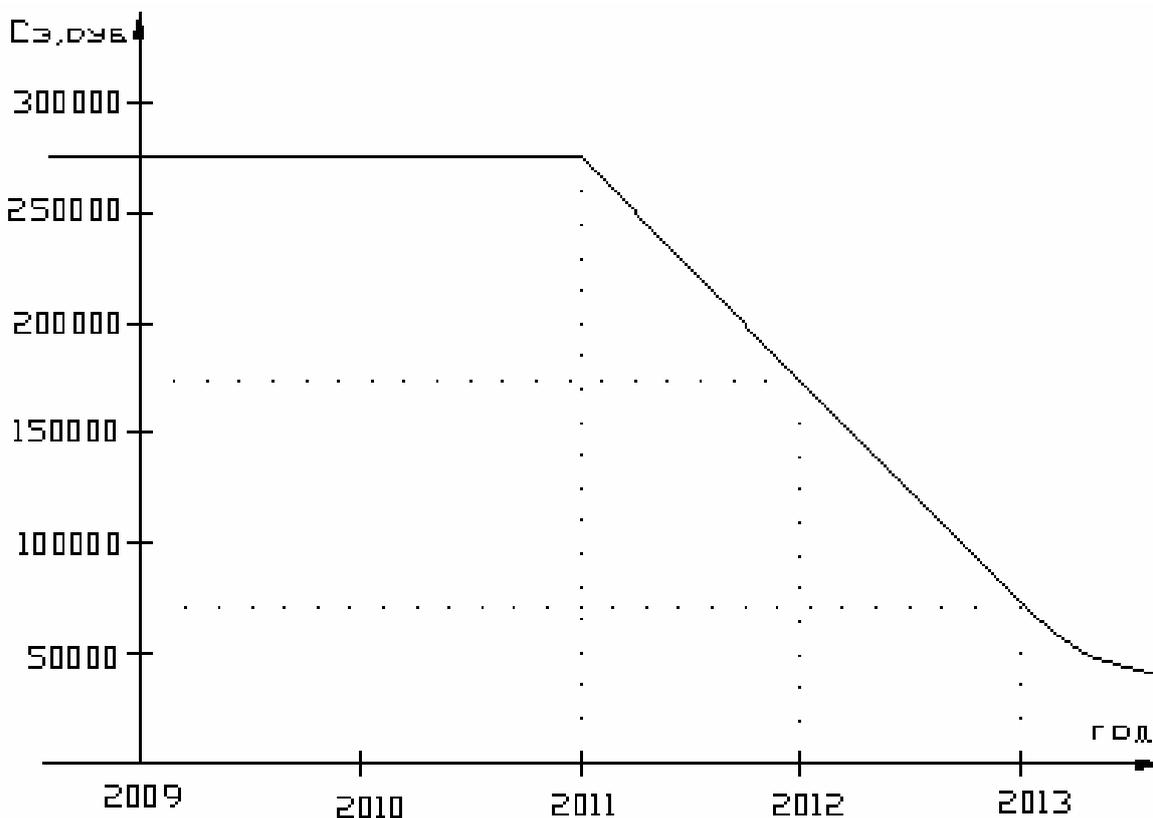


Рис. 3.8. Экономия затрат на потери электроэнергии

Величины затрат на внедрение преобразователя приведены в табл. 3.6.

Т а б л и ц а 3.6

Затрат на внедрение Micromaster 440

Наименование затрат	Сумма, руб.
Капитальные затраты	1151260,0
Амортизационные отчисления	73680,6
Смета	13589,2
Годовой фонд заработной платы	36150,4
Годовые затраты на потери электроэнергии	274376,0
ИТОГО	1549056,2

Расчетный срок окупаемости ($PВ$) определяем по формуле:

$$PB = \frac{\zeta\grave{\alpha}\delta\delta\grave{\alpha}\delta\grave{\alpha}\grave{\alpha}}{\acute{y}\acute{e}\acute{i}\acute{i}\grave{\alpha}\grave{\alpha}} = \frac{1549056,2}{1056682} = 1,5\grave{\alpha}\grave{\alpha}\grave{\alpha}.$$

Таким образом, все затраты проекта окупаются за 1,5 года.

В целом можно отметить, что расчетный экономический эффект достигнут. А, учитывая технические способности преобразователя в области регулирования производительности аппаратов воздушного охлаждения, внедрение преобразователей на электропривода данных аппаратов выглядит весьма привлекательным.

§ 3.4. Регулируемые электропривода в структуре ТЭЦ

Тепловые электроцентралы характеризуются большим разнообразием установленных электроприводов как по мощности так и по напряжению. Определенное количество этих электроприводов обеспечивают технологический процесс непосредственно на самой ТЭЦ. Так, в частности, на Новогорьковской ТЭЦ около 18 % вырабатываемой электроэнергии потребляется на собственные нужды, поэтому руководство ТЭЦ с целью собственного электросбережения проводит реконструкцию установленных электроприводов.

§ 3.4.1. Электропривода механизмов собственных нужд

Неравномерность потребления электрической и тепловой энергии и, как следствие, изменение режимов работы ТЭЦ (вовлечение энергоблоков в маневренные режимы с глубокой разгрузкой, сокращением выработки электроэнергии по конденсационному циклу из-за снижения нагрузки и т. п.) сопровождается дополнительными потерями электроэнергии из-за неоптимальных режимов работы механизмов собственных нужд и необходимостью увеличения дросселирования теплоносителя, воздуха и газа. В этих режимах существенно ухудшаются свойства надежности технологических механизмов собственных нужд, их приводных асинхронных электродвигателей. При этом:

- увеличивается износ проточной части насосов, лопаток дымососов, дутьевых вентиляторов;

- увеличивается повреждаемость электродвигателей из-за частых пусков с 5 - 7-кратными пусковыми токами;

- частые пуски механизмов с электродвигателями неблагоприятно воздействуют на гидравлическую систему и электрическую сеть, сопровождаются повреждениями задвижек и клапанов.

Оснащение питательных насосов средствами частотного регулирования имеет ряд принципиальных особенностей и связано с рациональным формированием водопитательной установкой котла. Применение такого электропривода позволяет не только изменить подход к определению числа насосов, но и оптимально выбирать параметры насосных агрегатов.

Оснащение подпиточных насосов регулируемым электроприводом должно осуществляться с оптимизацией ввода подпитки в теплофикационной системе бойлерных. Мощность таких подпиточных насосов находится в диапазоне 30-315 кВт. При оценке экономичности оснащения подпиточных насосов регулируемым электроприводом, необходимо учитывать экономию электроэнергии (как важную составляющую экономии) за счет уменьшения расхода воды через бойлерную.

Для дутьевых вентиляторов дымососов на ТЭЦ применяются только системы электроприводов с электродвигателями переменного тока. Как правило, это полюсопереключаемые двухскоростные электродвигатели.

Мощность электродвигателей выбирается из условия сокращения времени пуска и самозапуска «тяжелых» вентиляторов со значительным запасом (до 35 %). Этот запас необходим также из-за возможного увеличения при эксплуатации аэродинамического сопротивления газозадушного тракта.

Для котлов турбоустановок мощностью до 320 МВт включительно средствами регулирования частоты вращения должны оснащаться центробежные дутьевые вентиляторы. Регулируемым электроприводом без реконструкции самого дымососа можно осуществлять только с центробежным рабочим колесом. Осевые дымососы не предназначены для работы с переменной частотой вращения из-за возможности возникновения резонансных явлений в диапазонах регулирования скорости. Резонансные явления приводят к разрушению лопаток рабочего колеса.

На рис. 3.9 приведена диаграмма, иллюстрирующая типичные средневзвешенные потери мощности на собственные нужды по группам механизмов, оснащенных традиционными асинхронными электроприводами с постоянной частотой вращения, энергоблока 200 МВт.

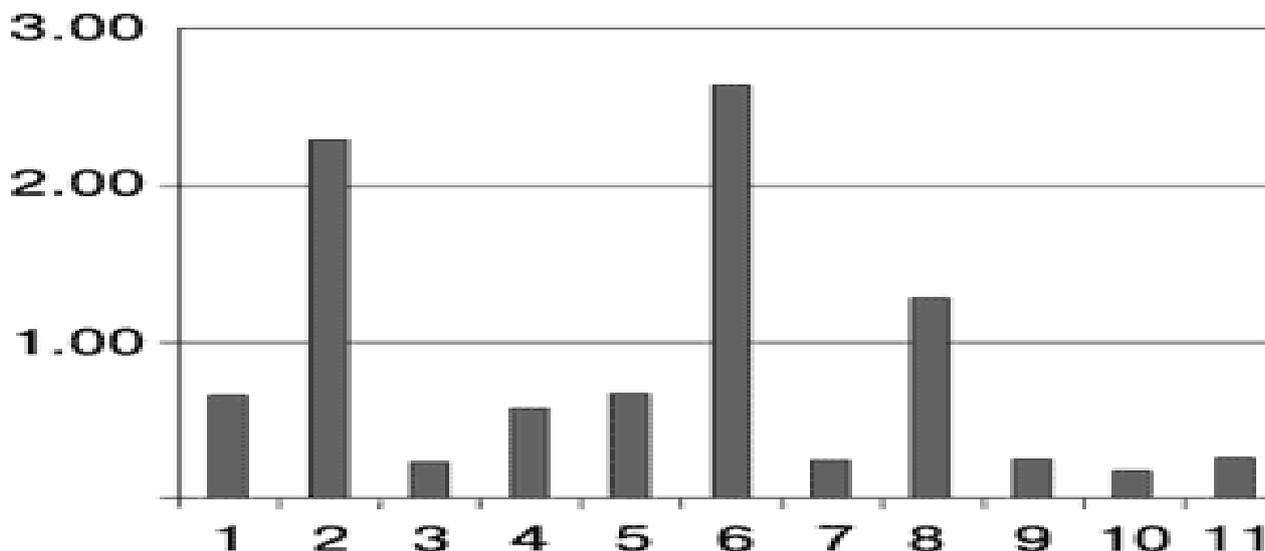


Рис. 3.9. Уровни потерь на собственные нужды ТЭЦ по группам потребителей

- 1 – топливоподача; 2 – мельницы, вентиляторы; 3 – насосы гидрозолоудаления; 4 – дутьевые вентиляторы; 5 – дымососы; 6 – питательный насос котла; 7 – конденсатные насосы; 8 – циркуляционные насосы охлаждающей воды; 9-11 – вспомогательные механизмы энергоблока (маслонасосные установки, насосы газоохладителей, и т. п.)

Как видно из диаграммы, наибольшую мощность потребляют механизмы собственных нужд, непосредственно участвующих в производстве энергии – питательные и циркуляционные насосы, мельничные вентиляторы, дутьевые вентиляторы и дымососы.

Значительно усилены требования по количеству пусков электродвигателей. За срок службы электродвигатели мощностью до 5 МВт включительно должны допускать до 10000 пусков, а свыше 5 МВт – 7500 пусков. При этом за календарный год электродвигатели должны допускать не менее:

- питательные насосы – 400 – 700 пусков;
- прочие насосы – 300 – 500;
- тягодутьевые механизмы – 500 – 700;
- механизмы топливоприготовления – 800 – 1000;
- механизмы топливоподачи – до 2500.

§ 3.4.2. Дутьевой вентилятор котлоагрегата

Регулирование производительности дутьевых вентиляторов на ТЭЦ за счет изменения электрических параметров имеет ряд уже известных преимуществ, таких как:

- исключение дросселирования механическими регуляторами, снижающее потребление энергии;
- исключение гидро- и электродинамических ударов при пуске механизмов и других переходных процессов, уменьшают износ тепломеханического и электрического оборудования.

Сравнительная оценка рассмотренных способов регулирования скорости электродвигателя применительно к тягодутьевым механизмам Новогорьковской ТЭЦ показывает, что:

- при модернизации с заменой исполнительного двигателя или вводе новых мощностей конкурентно способным может оказаться вариант регулируемого электропривода на базе машины двойного питания с бесконтактным исполнением электрической машины с фазным ротором;

- вариант ПН - АД может быть рекомендован для реализации «легкого» пуска асинхронного двигателя с целью ограничения пусковых токов и провалов напряжения.

Система ПЧ - АД по сравнению с предыдущей системой имеет ряд преимуществ:

- плавное регулирование частоты вращения вентилятора;
- сокращение сроков проектирования (модульность компоновки);
- предотвращение работы регулируемых агрегатов в зоне перегрузок и зоне низких КПД;
- более высокая надежность;
- осуществление ручного управления частотой вращения любого из регулируемых вентиляторов;
- относительная простота монтажа (модульность исполнения).

Поэтому при модернизации электропривода единственно приемлемым вариантом регулирования скорости является система ПЧ - АД.

Кроме вышеперечисленных достоинств, применение преобразователей частоты на тепловых электростанциях позволяет обеспечить новые важные в эксплуатации энергоблоков возможности:

- позволяет оптимизировать уровни нагрева поверхностей парогенераторов при разгрузках энергоблоков за счет уменьшения температурных перекосов, что не только повышает надежность их работы, но и увеличивает ресурс;

- позволяет экономично проходить энергоблокам режим «скользящих» параметров пара, что обеспечивает маневренность и высокую эффективность топливоиспользования в этом режиме;

- облегчает режим самозапуска (рестарта) электроприводов собственных нужд при глубоких колебаниях напряжения в системе электропитания или его кратковременных исчезновениях с последующим восстановлением;

- в часы максимальной нагрузки в энергосистеме обеспечивает дополнительное повышение мощности энергоблока вследствие исключения дросселирования;

- повышает в целом ресурс тепломеханического и электрического оборудования, увеличивает межремонтные периоды;

- снижает уровень выбросов загрязняющих веществ в атмосферу за счет оптимизации процесса сжигания топлива.

До модернизации на ТЭЦ в составе дутьевого вентилятора был установлен электродвигатель ДАЗО4-400У-6МУ1 ($P_H = 400$ кВт; $U_H = 6000$ В; $n_H = 1000$ об/мин, $\eta_H = 85$ %).

После модернизации в состав частотно-регулируемого электропривода будет входить:

- преобразователь частоты ATV61HC40N4 ($S_H = 419,3$ кВА, $I_H = 759$ А);

- электродвигатель Sh355H6Ds ($P_H = 355$ кВт, $U_H = 380$ В, $n_H = 1000$ об/мин, $\eta_H = 96,2$ %);

- трансформатор ТМ-400/6/0,4.

На рис. 3.10 и 3.11, соответственно, приведены структуры приведенных затрат до модернизации и после модернизации дутьевого электропривода.

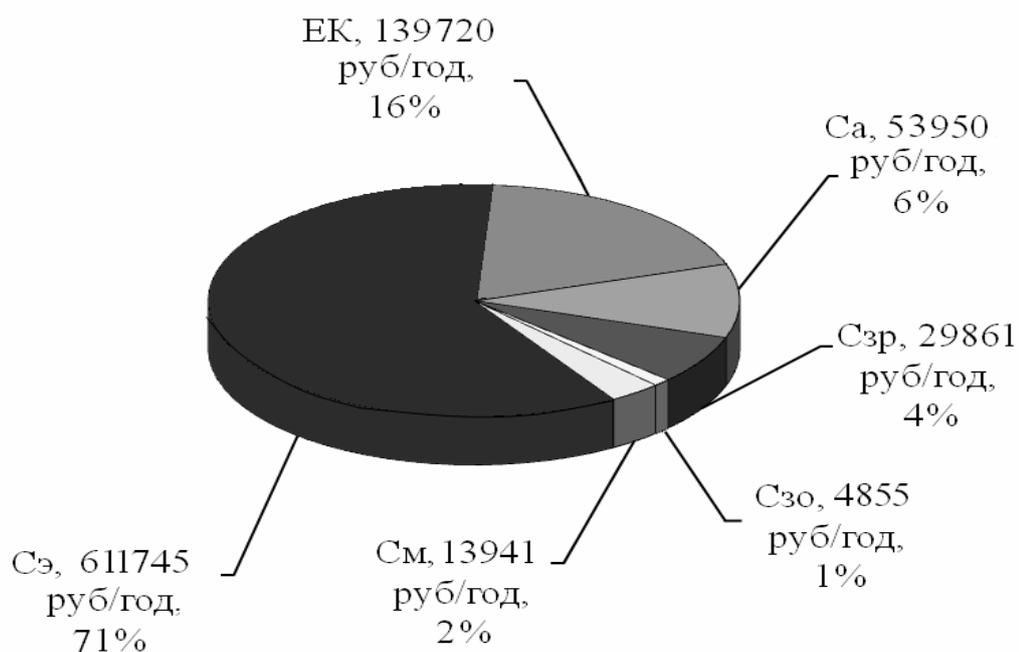


Рис. 3.10. Структура приведенных затрат на электропривод до модернизации

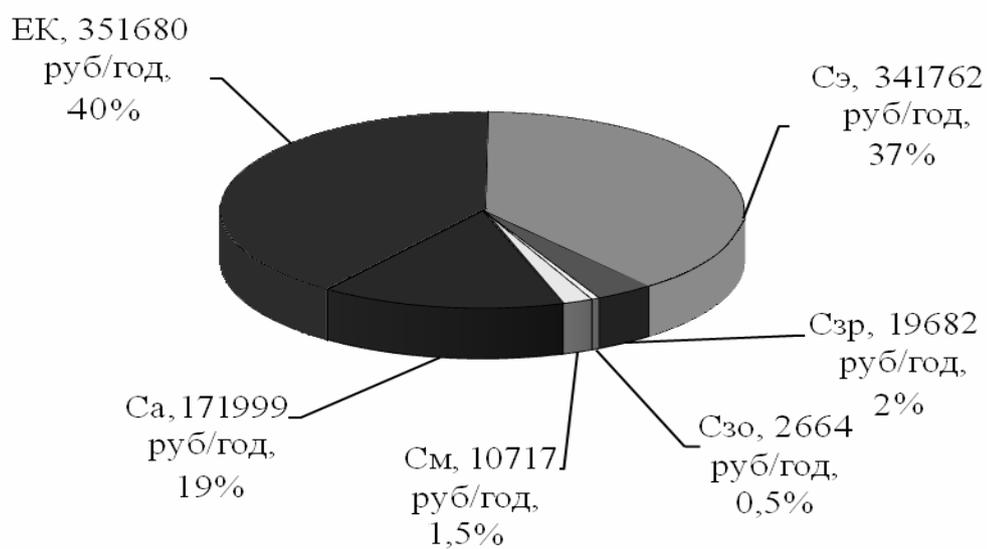


Рис. 3.11 Структура приведенных затрат на электропривод после модернизации

На этих рисунках приняты обозначения:

- E_K – отчисления, связанные с эффективностью капитальных вложений (K);

- C_a – амортизационные отчисления

- C_m – стоимость материалов на ремонты и обслуживание;

- $C_{зо}$ – заработная плата обслуживающего персонала;

- $C_{зр}$ – заработная плата ремонтного персонала;

- $C_э$ – стоимость потерь электроэнергии.

Расчеты выполнены при стоимости электроэнергии 6,19 руб./кВт час.

Из сопоставления затрат связанных с потерями электроэнергии видно, что после модернизации электропривода они уменьшились на 26983 руб./год, а в относительной величине это составляет 34 %.

§ 3.4.3. Электропривод мазутного насоса

Схема мазутного хозяйства Новогорьковской ТЭЦ является двух-уровневой. При использовании природного газа в качестве единственного энергоносителя система мазутного хозяйства находится в режиме «горячего резерва» (с апреля по октябрь). При этом рециркуляцию мазута от котельной в мазутохозяйство обеспечивает низковольтный электропривод насоса первого подъема. В этом случае необходимо обеспечивать другие технологические показатели в возвратной мазутной магистрали.

На основании суточных ведомостей работы мазутного насоса получены средние зависимости расхода и напора за каждый месяц работы механизма (табл. 3.7).

На основании заводских характеристик мазутного насоса определяем значения приведенного КПД механизма в функции производительности при регулировании с помощью направляющего аппарата (η_{HA}). Полученные данные приведены в табл. 3.8.

По заводским характеристикам насоса определены значения напора мазутного насоса при регулировании производительности с помощью дросселирования (HA). Полученные данные приведены в табл. 3.9.

На основании формул приведения произведен расчет требуемой частоты вращения электродвигателя мазутного насоса n_i , об/мин, при

частотном регулировании для работы на сетевой характеристике (табл. 3.10).

Т а б л и ц а 3.7

Зависимость расхода и напора насоса

Время работы, мес.	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	199	199	193	64	77	85	60	64	82	66	190	192
$H_{PT}, \text{ м}$	99	99	93	10	15	18	9	10	17	11	90	92

Т а б л и ц а 3.8

Значения КПД агрегата в функции производительности насоса

$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	199	199	193	64	77	85	60	64	82	66	192
$\eta_{НА}$	0,56	0,56	0,55	0,29	0,33	0,35	0,28	0,29	0,34	0,29	0,55

Т а б л и ц а 3.9

Зависимость расхода и напора насоса при дросселировании

Время работы, мес.	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	199	199	193	64	77	85	60	64	82	66	190	192
$H, \text{ м}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Расчет потребляемой мощности электроприводом при $НА$ и частотном регулировании ПЧ позволил определить экономию при таком регулировании производительности мазутного насоса ΔP (табл. 3.11).

Суммарная экономия составила $\Sigma \Delta P = 491,5$ кВт.

Т а б л и ц а 3.10

Частота вращения электродвигателя

$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	199	199	193	64	77	85	60	64	82	66	192
$H_{PT}, \text{ м}$	99	99	93	10	15	18	9	10	17	11	92
$n, \text{ об/мин}$	2985	2985	2895	960	1155	1275	900	960	1230	990	2880

Т а б л и ц а 3.11

Экономия электроэнергии

$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	199	199	193	64	77	85	60	64	82	66	192
$\Delta P, \text{ кВт}$	1,2	1,2	9,4	64,5	65,6	66,5	63,1	64,5	66,8	66,2	10,3

Принятие решения о внедрении регулируемого электропривода для того или иного механизма собственных нужд ТЭЦ базируется на технико-экономическом анализе, проводимом в каждом конкретном случае, и производится с учетом факторов, определяющих целесообразность его применения.

Для предварительной оценки эффективности внедрения на ТЭЦ регулируемого электропривода целесообразно использовать коэффициент удельной экономии электроэнергии $K_{\mathcal{E}}$, учитывающий вклад 1 кВт установленной мощности РЭП в экономию электроэнергии,

$$K_{\mathcal{E}} = \frac{\mathcal{E}}{P_{\text{РЭП}}}, \quad (3.11)$$

где \mathcal{E} - экономия электрической энергии в год, кВт·час;

$P_{\text{РЭП}}$ - установленная мощность РЭП, кВт.

По величине $K_{\mathcal{E}}$ можно предварительно установить, оснащение каких механизмов собственных нужд ТЭЦ регулируемым электроприводом наиболее эффективно. Как показывает опыт Мосэнерго, в большинстве случаев можно считать целесообразным применение регулируемого ЭП механизмов собственных нужд, для которых значение коэффициента удельной экономии электроэнергии больше 800 кВт·ч.

Рассчитаем экономию электроэнергии при использовании РЭП для регулирования производительности мазутного насоса за год ΔW , кВт·ч/год, по формуле

$$\Delta W = \sum \Delta P_i(Q_i) \cdot t_i, \quad (3.12)$$

где ΔP_i - экономия электроэнергии мазутного насоса, кВт;

t_i - интервал времени работы механизма за месяц, принимаем $t_i = 720$ ч.

$$\Delta W = 491.5 \cdot 720 = 353880 \text{ кВт·ч/год.}$$

Рассчитаем коэффициент удельной экономии электроэнергии $K_{\text{Э}}$ по (3.11):

$$K_{\text{Э}} = \frac{353880}{110} = 3217 \text{ кВт·ч.}$$

Проведенные расчеты коэффициента $K_{\text{Э}}$ показали, что его величина выше значения, начиная с которого можно считать целесообразным применение РЭП механизмов собственных нужд ТЭЦ. Вместе с тем, принятие объективного решения по очередности оснащения механизмов собственных нужд регулируемым электроприводом базируется на расчетах стоимостных показателей, определяющих эффективность затрат на эффективные средства регулирования.

В основу оценок эффективности инвестиционных проектов положены следующие основные принципы, применяемые к любым типам проектов независимо от их технических, технологических, финансовых, отраслевых или региональных особенностей:

- рассмотрение проекта на протяжении всего жизненного цикла;
- моделирование потоков продукции, ресурсов, денежных средств;
- приведение предстоящих разновременных доходов и расходов к условиям их экономической соизмеримости в начальном периоде;
- определение эффекта посредством сопоставления ожидаемых интегральных результатов и затрат с ориентацией на достижение требуемой нормы дохода на капитал;
- использование текущих, прогнозируемых и расчетных цен.

Сравнение различных инвестиционных проектов (вариантов проекта) и выбор лучшего из них производятся с использованием следующих показателей:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД);
- индекс доходности (ИД);
- срок окупаемости капитальных вложений ($t_{\text{ОК}}$).

При расчете в текущих (базисных) ценах для постоянной нормы дисконта ЧДД, руб., определяется по формуле

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^T (R_t - Z_t) \frac{1}{(1+E)^t} - \sum_{t=1}^T K_t \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (3.13)$$

где R_t – результаты, достигаемые на t -м шаге расчета, руб.;
 Z_t – затраты, осуществляемые на t -м шаге расчета, руб.;
 E – норма дисконта, принимаем $E = 0,12$;
 K_t – капитальные вложения на t -м шаге расчета, руб.;
 t – номер шага расчета ($t = 1, 2, 3, \dots, T$);
 T – экономический срок службы регулируемого электропривода до обновления, принимаем $T = 10$ лет.

Для промышленных предприятий R_t формируется как выручка от продажи продукта (за вычетом налога на добавленную стоимость, акцизов) и определяется по формуле

$$R_t = \Delta W \cdot p, \quad (3.14)$$

где p – прогнозируемая цена за 1 кВт·час, принимаем $p = 1,87$ руб./кВт·.

$$R_t = 353880 \cdot 1,87 = 661755 \text{ (руб.)}$$

Находим сумму затрат Z_t , руб., по формуле

$$Z_t = C_t - A_t, \quad (3.15)$$

где $C_t = 0,05 \cdot K_t$ – эксплуатационные расходы на t -м шаге расчета, руб.;
 $A_t = 0,1 \cdot K_t$ – амортизационные отчисления на t -м шаге расчета, руб.

Рассчитываем капитальные вложения, которые формируются из затрат на приобретение преобразователя частоты, двигателя и проектно-монтажные работы, K_t , руб., по формуле

$$K_t = K_{ПЧ} + K_{ПМР}, \quad (3.16)$$

где $K_{ПЧ}$ – капитальные вложения на приобретение преобразователя частоты, руб.;

$K_{ПМР}$ – капитальные вложения на проектно-монтажные работы, для низковольтных преобразователей принимается как 30 % стоимости ПЧ, руб.

Пример расчета для $t = 1$:

$$K_1 = 235000 + 70500 = 305500 \text{ руб.};$$

$$A_1 = 0,1 \cdot 305500 = 30550 \text{ руб.};$$

$$C_1 = 0,05 \cdot 305500 = 15275 \text{ руб.};$$

$$Z_1 = 15275 - 30550 = -15275 \text{ руб.};$$

$$\begin{aligned} \text{ЧДД}_1 &= \sum_{t=1}^1 (661755 + 15275) \cdot 0,76 \frac{1}{(1 + 0,12)^1} - \sum_{t=1}^1 305500 \times \\ &\times \frac{1}{(1 + 0,12)^1} = 186600 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Аналогично считаем ЧДД для $t = 2, \dots, 10$.

Итоговое значение ЧДД = 2635000 руб.

Так как ЧДД инвестиционного проекта положителен, то проект является эффективным и может рассматриваться вопрос о его реализации. Кроме того, чем выше уровень ЧДД, тем эффективнее проект.

Рассчитаем второй показатель – индекс доходности (ИД), который характеризуется отношением суммы приведенных эффектов к величине дисконтированных капитальных вложений ИД, по формуле

$$\text{ИД} = \frac{\sum_{t=1}^T (R_t - Z_t) \times \frac{1}{(1 + E)^t}}{\sum_{t=1}^T K_t \times \frac{1}{(1 + E)^t}}. \quad (3.17)$$

Расчет для $t = 1$:

$$\text{ИД}_1 = \frac{\sum_{t=1}^1 (661755 + 15275) \cdot 0,76 \frac{1}{(1 + 0,12)^1}}{\sum_{t=1}^1 305500 \frac{1}{(1 + 0,12)^1}} = 1,68.$$

Аналогично считаем ИД для $t = 2, \dots, 10$.

Итоговое значение ИД = 10,66.

Из формул расчета ИД видно, что $\text{ИД} > 1$, значит, проект эффективен. Если ЧДД отрицателен, то $\text{ИД} < 1$ и проект представляется неэффективным; если ЧДД = 0, то $\text{ИД} = 1$ и вопрос об эффективности остается открытым.

Третий показатель – срок окупаемости капиталовложений инвестиций – определяется временным интервалом, за пределами которого интегральный эффект становится положительным, т. е. это период, за который первоначальные капиталовложения по инвестиционному про-

екту покрываются суммарным эффектом от его осуществления, t_{OK} , лет, рассчитывается по формуле

$$\sum_{t=1}^{t_{OK}} (R_t - Z_t) \frac{1}{(1+E)^t} = \sum_{t=1}^{t_{OK}} K_t \frac{1}{(1+E)^t}. \quad (3.18)$$

Расчет для $t=1$:

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^{t_{OK}} (661755 + 152755) \cdot 0,76 \frac{1}{(1+0,12)^t} = \\ & = \sum_{t=1}^{t_{OK}} 305500 \frac{1}{(1+0,12)^t}. \end{aligned}$$

Подставляя в (3.18) значения R_t , Z_t , K_t , t , соответствующие $t = 1, \dots, 10$, вычислим срок окупаемости капиталобразующих инвестиций, $t_{OK} \approx 1$ год.

Результаты расчета приведены в табл. 3.12.

Т а б л и ц а 3.12

**Стоимостные показатели при использовании
оборудования «Schneider Electric»**

Мазутный насос	Преобразователь частоты
Стоимость 1 кВт низковольтного ПЧ, руб.	2400
Стоимость 1 кВт/ч электроэнергии, руб.	1,87
Экономический срок службы регулируемого электропривода, лет	10
Чистый дисконтированный доход (ЧДД), руб.	2635000
Индекс доходности (ИД)	10,66
Срок окупаемости капиталобразующих инвестиций, лет	1

Вышеприведенные расчеты показывают, что по экономическим показателям целесообразно применение частотного электропривода.

Расчеты выполнены для электропривода:

- преобразователь частоты Altivar 61 фирмы «Shneider Electric» – ATV-61HC-11;

- взрывозащищенный электродвигатель В280-2У2-5;

- центробежный насос типа 8НД-6х1.

§ 3.4.4. Электропривод мазутного насоса газовой ТЭЦ

На газовой ТЭЦ имеется резервное углеводородное топливо – мазут, которое необходимо в хранимых резервуарах периодически перемешивать. Для этой цели применяется мазутный насос с электродвигателем, имеющим номинальные характеристики: $P_n = 110$ кВт; $n_n = 3000$ об/мин; $U_n = 380$ В; $\eta_n = 92\%$. В зависимости от времени года необходимая мощность для перемещения мазута меняется (рис. 3.12).

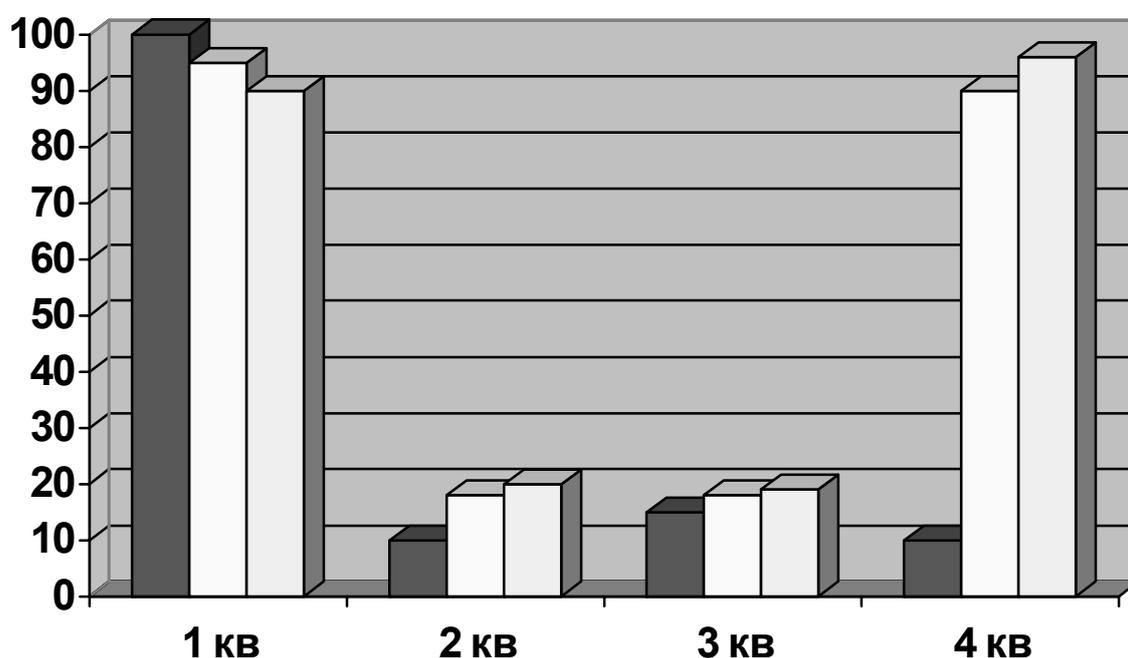


Рис. 3.12. Гистограмма нагрузки мазутного насоса

Паспортные данные мазутного насоса приведены в табл. 3.13.

Т а б л и ц а 3.13

Данные мазутного насоса

Тип насоса	Напор, Н м	Расход, Q м ³ /час	Скорость, n об/мин	Диаметр колеса, мм
8НД–6 х 1	110	204	2950	271

Ранее применялось дросселирование, при этом затраты электроэнергии составляли $W_1 = 4920$ кВт ч/год. Предварительно выполненные расчеты по модернизации мазутного хозяйства ТЭЦ на основе частотно-регулируемого электропривода с применением преобразователя серии Altivar 71 фирмы Shneider Electric позволяют снизить величину потерь мощности до величины $W_2 = 2755,2$ кВт ч/год. Относительное снижение потерь электроэнергии оценивается в 44 %.

В структуре ежегодных издержек, связанных с эксплуатацией электропривода, затраты на потери электроэнергии уменьшились с 46,4 % (вариант с дроссельным регулированием) до 17,8 % (вариант с частотно-регулируемым электроприводом.).

§ 3.5. Высоковольтный электропривод блочной насосной атомной электростанции

В соответствии с техническим заданием блочная насосная Калининской АЭС должна иметь четыре насоса с электроприводом мощностью 3,9 МВт каждый и напряжением 6 кВ, как правило, такие мощные электропривода требуют и плавного пуска. Преимущества и недостатки различных способов пуска таких электродвигателей приведены в табл. 3.14.

Т а б л и ц а 3.14

Характеристики наиболее распространенных способов пуска

Способ пуска	Преимущества	Недостатки
1	2	3
Прямой пуск	Простой и экономичный. Безопасный пуск. Самый большой пусковой момент	Высокий пусковой ток
Пуск «звезда/треугольник»	Уменьшение пускового тока в три раза	Скачки тока при переключении «звезда-треугольник». Не подходит, если нагрузка имеет

		небольшую массу. Пониженный пусковой момент
Автотрансформатор	Уменьшение пускового тока на u_2 , где u – понижение напряжения, например, $60\% = 0,60$	Скачки тока при переходе от пониженного к полному напряжению. Пониженный пусковой момент
1	2	3
Плавный пуск	Плавный пуск. Импульсы тока отсутствуют. Меньший гидравлический удар при пуске насоса. Уменьшение пускового тока на требуемую величину, обычно в 2-3 раза	Пониженный пусковой момент
Частотный пускатель	Импульсы тока отсутствуют. Меньший гидравлический удар при пуске насоса. Уменьшение пускового тока, обычно, до уровня тока полной нагрузки. Можно использовать для непрерывной подачи питания к электродвигателю	Пониженный пусковой момент. Высокая стоимость

Практика показывает, что применение частотных преобразователей на насосных станциях позволяет:

- экономить электроэнергию (при существенных изменениях расхода), регулируя мощность электропривода в зависимости от реального водопотребления (эффект экономии 20 - 50 %);

- снизить расход воды за счёт излишнего водопотребления, сокращения утечек при превышении давления в магистрали, когда расход водопотребления в действительности мал (в среднем на 5 %);

- уменьшить расходы (основной экономический эффект) на аварийные ремонты оборудования всей инфраструктуры подачи воды за счет резкого уменьшения числа аварийных ситуаций, вызванных в частности гидравлическим ударом, который нередко происходит в случае использования нерегулируемого электропривода (доказано, что ресурс службы оборудования повышается минимум в 1,5 раза);

- достичь определённой экономии тепла в системах горячего водоснабжения за счёт снижения потерь воды, несущей тепло;

- увеличить напор выше обычного в случае необходимости;

- комплексно автоматизировать систему водоснабжения, тем самым снижая фонд заработной платы обслуживающего и дежурного персонала, и исключить влияние «человеческого фактора» на работу системы, что тоже немаловажно.

В проекте реконструкции электроприводов блочной насосной станции Калининской АЭС реализовано комплексное управление насосными агрегатами HYUNDAI 2200VK HRQ3 803, фирма производитель HYUNDAI Heavy Industries Co. Ltd, на основе преобразователя частоты Robicon Perfect Harmony Gen IIIe. Внешний вид насоса приведен в приложении и имеющий электрические характеристики:

$$P_{\text{ном}} = 3900 \text{ кВт}, \quad U_{\text{ном}} = 6000 \text{ В}; \quad n_{\text{ном}} = 250-295 \text{ об/мин.}$$

Выполненные расчеты затрат на потери электроэнергии по электроприводам главных циркуляционных насосов блочной станции Калининской АЭС в составе годовых приведенных затрат за цикл «лето/зима» составили:

- до модернизации – 29,72 %

- после модернизации – 18,05 %.

Стоимость потерь электроэнергии определялась из расчета стоимости 1 кВт часа электроэнергии для собственных нужд Калининской АЭС в размере 2 руб./кВт ч (табл.3.15).

Т а б л и ц а 3.15

Экономия электроэнергии

Квартал	Количественные оценки					
	Кол-во суток	$W_{\text{дрос}},$ МВт ч	$W_{\text{чрзп}},$ МВт ч	$\Delta W,$ %	$\Delta W,$ МВт ч	$\Delta S_{\text{чрзп}},$ тыс. руб.

1	90	7887,7	5714,9	27,55	2172,8	4345,6
2	92	8062,9	5385,9	33,20	2677,1	5354,1
3	92	8123,1	8001,3	1,50	121,9	243,3
4	91	8034,7	7365,8	8,32	668,8	1337,7
За год	365	32108,4	264680,2	17,64	5640,4	11280,8

В этой таблице использованы обозначения:

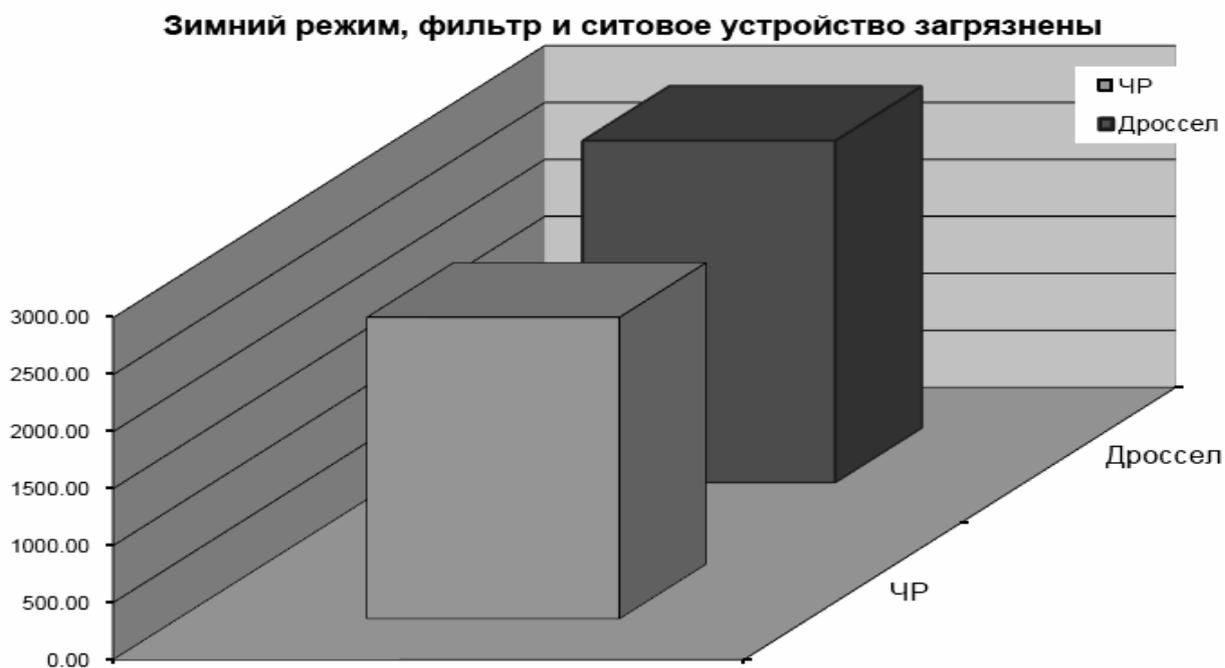
- $W_{\text{дрос}}$ – количество электроэнергии, потребленной при дроссельном регулировании;

- $W_{\text{чрэл}}$ – количество электроэнергии, потребленной при частотном регулировании;

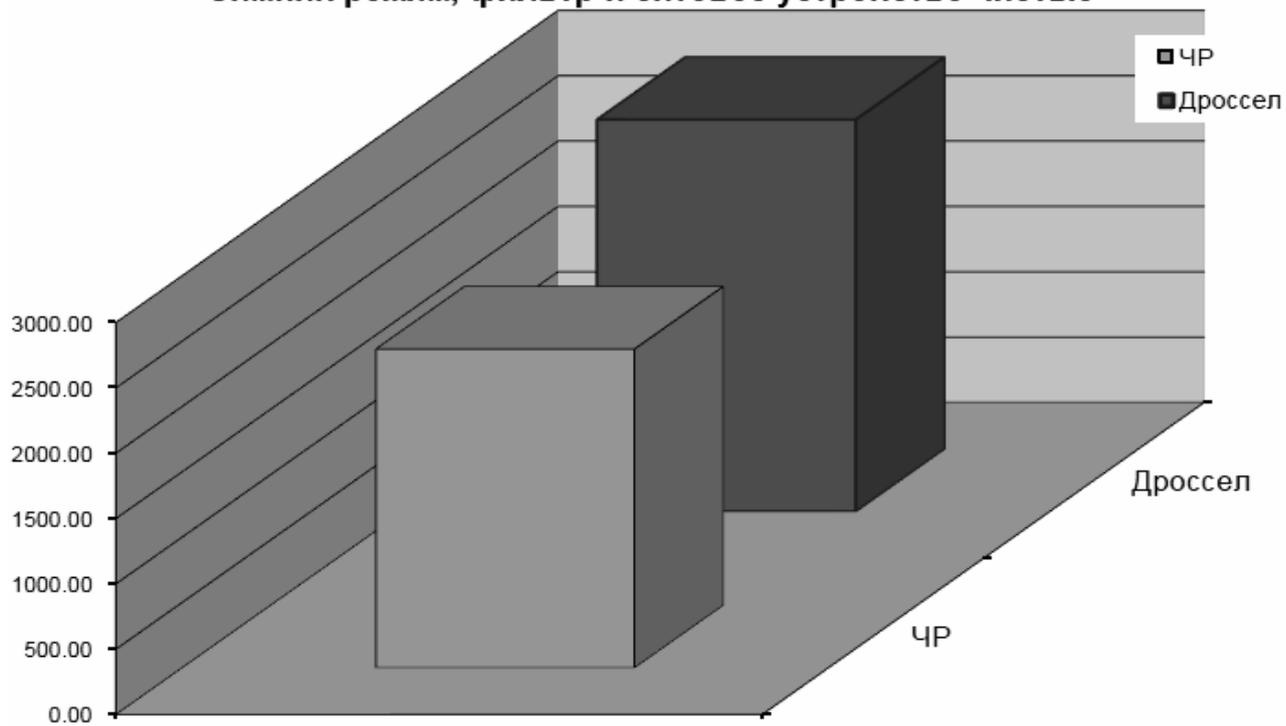
- ΔW – экономия электроэнергии, в результате применения частотно-регулируемого электропривода;

- $\Delta S_{\text{чрэл}}$ – сумма сэкономленных средств, в результате применения частотно-регулируемого электропривода.

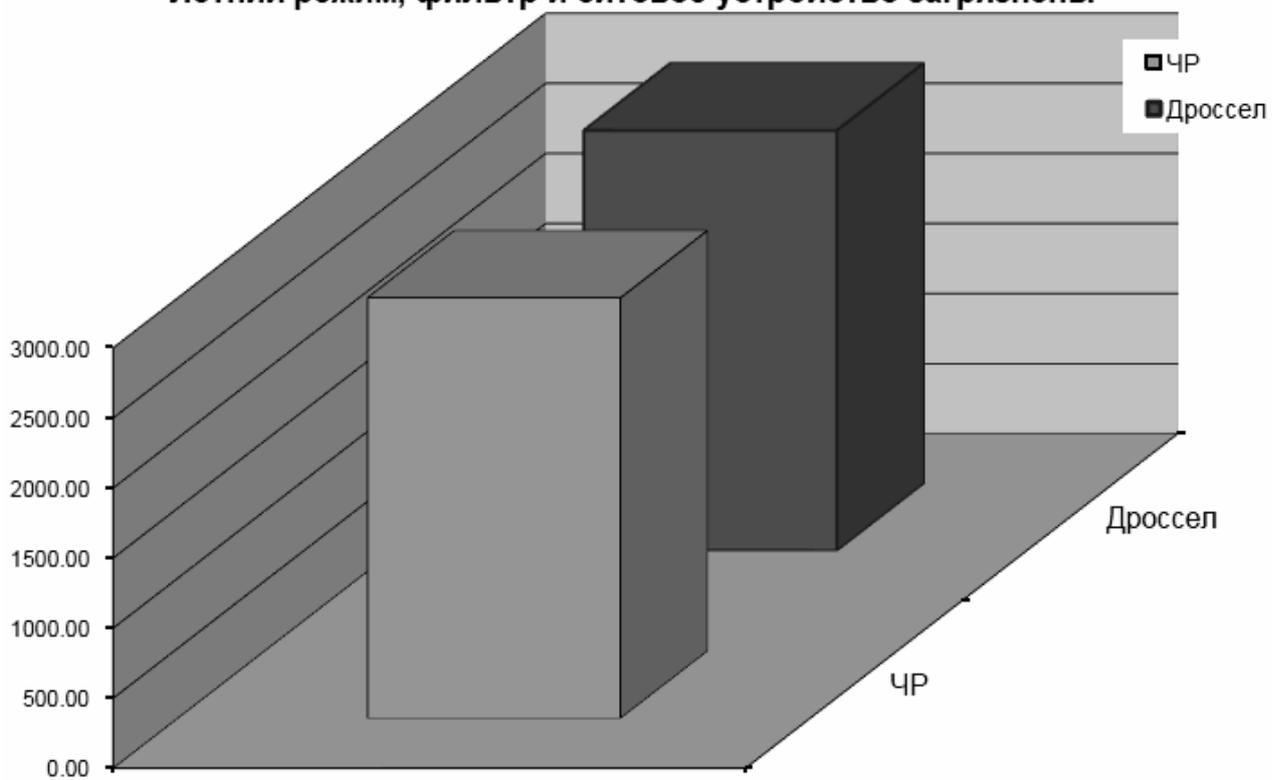
На рис. 3.13 приведены гистограммы электропотребления для летнего и зимнего режимов с учетом состояния фильтра и ситового устройства.



Зимний режим, фильтр и ситовое устройство чистые



Летний режим, фильтр и ситовое устройство загрязнены



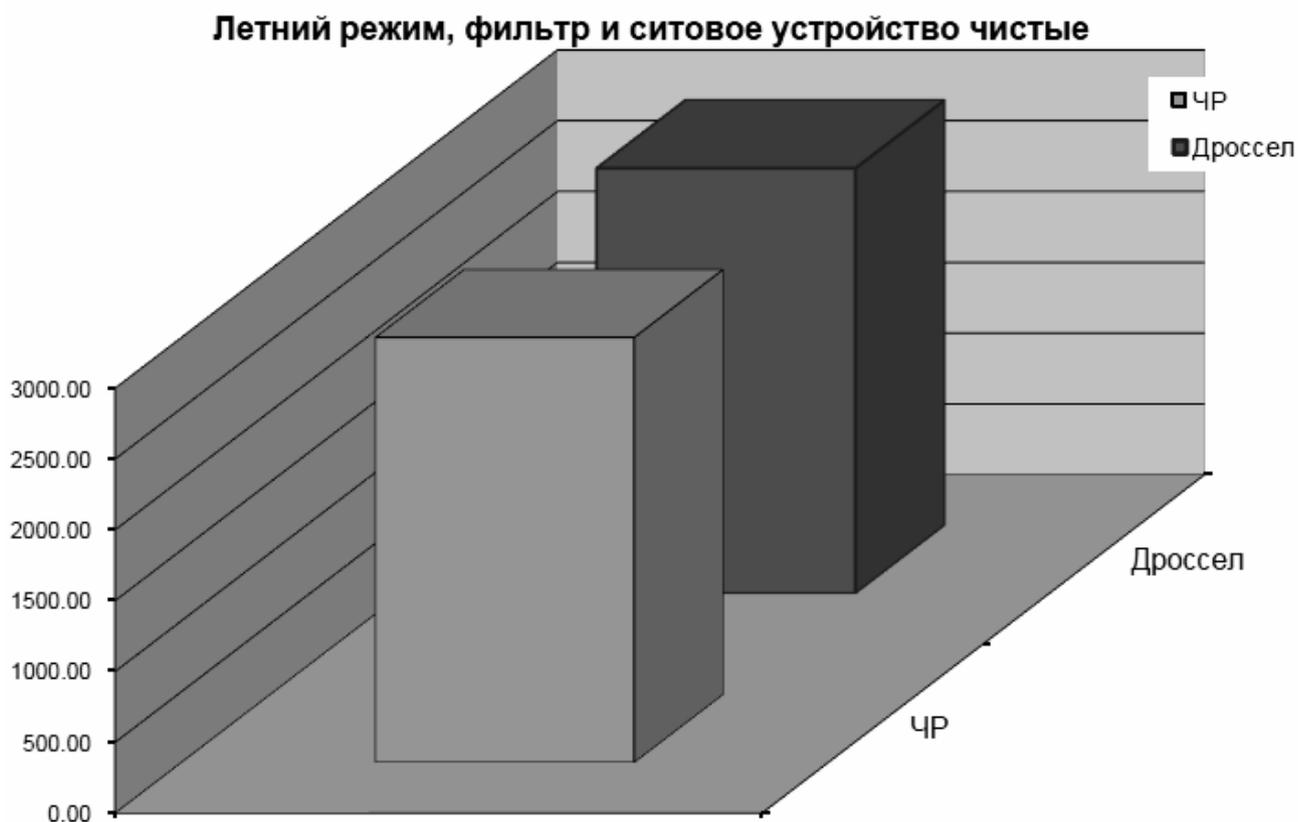


Рис. 3.13. Электропотребление по периодам «лето/зима» и состояний фильтра и ситового устройства

При общей оценке эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в циркуляционных насосах необходимо учитывать и эффект от повышения свойств надежности, в том числе уменьшение гидравлических ударов в трубопроводных системах.

§ 3.6. Электропривод водозабора

На городском водозаборе установлено три водяных насоса (Н1, Н2, Н3) с приводными асинхронными электродвигателями. Работа приводных электродвигателей насосов в продолжительных режимах не экономична, так как расход воды в течение дня не одинаков, и на водовод действует повышенное давление в те часы, когда потребление воды минимально. Это приводило к износу водовода и нецелесообразному (не экономичному) потреблению электроэнергии.

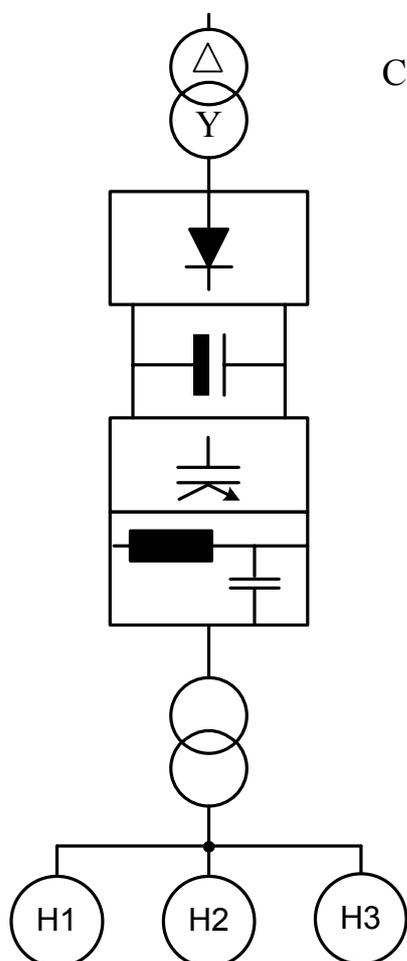
При модернизации электроприводов насосов Н1, Н2, и Н3 было предложено осуществить регулирование скорости электродвигателей осуществлять с помощью одного статических преобразователей частоты типа 6SR31026FB380FF0-Z со звеном постоянного тока, на IGBT

модулях с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ-технологией) на выходе (рис. 3.14). Модульное исполнение значительно повышает ремонтпригодность и сокращает количество отказов.

Технические характеристики приводных асинхронных электродвигателей центробежных насосов городского водозабора представлены в табл. 3.16. Система управления преобразователем обеспечивает работу насосов в последовательности:

- преобразователь осуществляет плавный пуск насоса Н1 и при необходимости выводит режим работы этого электродвигателя на номинальный режим и в последующем питание этого электродвигателя осуществляется непосредственно от электросети. Если напора воды в трубопроводе недостаточно, то преобразователь подключается к насосу Н2;

- система управления преобразователем осуществив плавный пуск насоса Н2 постепенно повышает напор воды в трубопроводе. При необходимости электродвигатель выходит на номинальный режим работы. Если и этого достигнутого напора воды в трубопроводе недостаточно, включается электродвигатель насоса Н3.



Сетевой понижающий трансформатор 6кВ/690В

Низковольтный преобразователь частоты
серии Simovert Master-Drives.
Выпрямитель по 6-ти пульсной схеме

Звено постоянного тока

Инвертор

Фильтр на выходе
преобразователя

Выходной трансформатор, согласующий
напряжение преобразователя частоты
и электродвигателей напряжением 6 кВ

Рис. 3.14. Структурная схема питания приводных электродвигателей насосов Н1, Н2 и Н3 через преобразователь частоты

Т а б л и ц а 3.16

Технические характеристики электродвигателей насосов

Тип двигателя насоса	Номинальная мощность $P_{НОМ}$, кВт	Номинальный ток $I_{НОМ}$, А	Номинальное напряжение $U_{НОМ}$, кВ	КПД, %	$\cos\varphi$	n , об/мин
ДАМСО 15-8-6 насос Н1	550	65	6	92,5	0,885	985
ДАМСО 15-8-6 насос Н2	550	65	6	92	0,770	985
А 114-4 насос Н3	320	37,1	6	92,8	0,895	1480

Итоговые результаты расчетов технико-экономических показателей электроприводов до модернизации (дрессельное регулирование) и после модернизации (частотно-регулируемые электропривода) представлены в табл. 3.17.

Т а б л и ц а 3.17

Сводные результаты оценок вариантов электроприводов

Показатели	Единицы измерения	Значение до модернизации	Значение после модернизации	Разница между «после» и «до»
Капитальные затраты	тыс. руб.	1912,050	15120,000	13207,950
Амортизационные отчисления	тыс. руб./год	229,446	1814,400	1584,954

Зарплата ремонтного персонала	тыс. руб./год	7,098	2,867	-4,230
Зарплата обслуживающего персонала	тыс. руб./год	0,666	0,191	-0,475
Стоимость материалов на обслуживание и ремонт	тыс. руб./год	3,601	1,572	-2,029
Затраты на обслуживание и ремонт	тыс. руб./год	4,267	4,630	0,363
Стоимость годовых потерь электроэнергии	тыс. руб./год	190,654	169,495	-21,158
Годовые издержки эксплуатации	тыс. руб./год	424,368	1988,526	1564,158

При выполнении расчетов стоимость электроэнергии была принята в размере 2,1 руб. за кВт час.

Из табл. 3.17 следует, что стоимость потерь электроэнергии уменьшилась на 11,1 %.

§ 3.7. Регулируемый электропривод в пожарном водоснабжении

Применение частотно-регулируемого асинхронного ЭП для управления насосными агрегатами позволяет обеспечить:

- плавный пуск электродвигателя, отсутствие механических нагрузок на двигатель и бросков тока в сети;
- отсутствие гидравлических ударов;
- эффективное использование потребляемой насосным агрегатом мощности во всем диапазоне регулирования;
- обеспечение коэффициента мощности двигателя насоса на численное значение, близким к 1,0;
- снижение уровня шума при пуске и работе;
- обеспечение автономной и безопасной работы, интеграция в автоматизированную систему управления технологическим процессом.

С целью реализации программы энергосбережения на одной из насосных станций г. Королева установлены две насосные установки с че-

тырьмя насосными агрегатами хозяйственного водоснабжения первой зоны и с пятью насосными агрегатами хозяйственно-пожарного водоснабжения второй зоны с частотными преобразователями для регулировки производительности сетевых насосов мощностью 7,5 кВт типа СУ-ЧЭ-12-А-7,5 кВт.

Для поддержания заданного давления используется режим частотного регулирования. Одновременно может работать от 1-го до 2-х насосных агрегатов хозяйственно-пожарного водоснабжения (2 в резерве) в первой зоне и от 1-го до 3-х насосных агрегатов хозяйственно-пожарного водоснабжения (2 в резерве) во второй зоне. Плавное регулирование производительности используется, как правило, только для одного из имеющихся в составе установки насосных агрегатов. При недостатке диапазона регулирования (например, мощность регулируемого двигателя увеличивается до максимальной, но это так и не приводит к нужному увеличению давления) происходит изменение числа включенных в работу насосных агрегатов (включается дополнительный насосный агрегат, а мощность регулируемого насоса начинает вновь плавно увеличиваться). Таким образом, насосная станция имеет большой диапазон регулирования, но плавное регулирование скорости в каждый момент времени используется только для одного из насосных агрегатов. Это позволяет осуществлять оптимальное управление электродвигателями системы водоснабжения и оптимизировать работу технологического оборудования насосных станций; обеспечить экономию электроэнергии и снизить расход воды; существенно снизить затраты на текущее обслуживание и значительно увеличить ресурс электродвигателя.

Экономия электроэнергии (до 30 % и более) обеспечивается за счет существенного уменьшения потребляемой электродвигателем электроэнергии при обеспечении в автоматическом режиме необходимого давления независимо от текущего расхода воды потребителями.

Регулирование производительности насосного агрегата посредством изменения частоты вращения электродвигателя позволяет снять избыточный напор воды в трубопроводе, отказавшись от дроссельного регулирования сечений трубопроводов, снизив при этом потери на преодоление противодействия.

Снижение расхода воды (до 5 %) обеспечивается за счет уменьшения необходимого напора насосного агрегата при уменьшении расхода воды.

Снижение утечек воды (10 - 20 %) обеспечивается за счет существенного уменьшения аварий и снижения утечек в уплотнениях трубопроводов.

Снижение затрат на текущее обслуживание техники и трубопровода обеспечивается за счет: уменьшения износа основных узлов электродвигателей и насосов из-за меньших механических нагрузок; уменьшения износа коммутационной аппаратуры из-за меньшего числа переключений и малых токов коммутаций; уменьшения количества аварий на линии трубопровода из-за исключения гидравлических ударов и повышенного давления.

Увеличение ресурса электродвигателя (в 1,5 - 2 раза) обеспечивается за счет: существенного уменьшения средней частоты вращения; обеспечения частотным преобразователем «мягкого» пуска электродвигателя, так как пусковые токи не превышают номинальных; повышение эффективности защиты электродвигателя от перегрузки, обрыва фазы, от пониженного (повышенного) напряжения, от работы при неисправном насосе и запорной арматуре.

При определении экономической эффективности применения частотных преобразователей на объектах водоснабжения учитываются следующие факторы:

1. Экономия электроэнергии (до 30 % и более в зависимости от изменения необходимой производительности насосных агрегатов);
2. Снижение расхода воды (до 5 %);
3. Снижение затрат на текущее обслуживание;
4. Увеличение ресурса электродвигателя (в 1,5 - 2 раза).

Срок окупаемости частотных преобразователей с учетом экономии электроэнергии и воды определяется:

$$T_{\text{окупаемости}} = \frac{C_{\text{преобр.}}}{\lambda \times (C_{\text{элек.}} + C_{\text{воды}})}$$

здесь $T_{\text{окупаемости}}$ – срок окупаемости в месяцах;

$C_{\text{преобр.}}$ – стоимость преобразователя (станции управления);

$C_{\text{элек.}}$ – стоимость сэкономленной электроэнергии за месяц;

$C_{\text{воды}}$ – стоимость сэкономленной воды за месяц.

Имеющийся опыт применения частотных преобразователей показывает, что в зависимости от конкретных величин, определяемых этими факторами, необходимо учитывать коэффициент λ (1,2 - 1,8).

Учитывая существующий диапазон изменения нагрузки, ожидаемую экономию электроэнергии принимаем равной 30 %, а воды – 3 %.

Определяем среднемесячную экономию электроэнергии (B):

$$B = 7,5 \text{ кВт} \times 730 \text{ ч} \times 0,3 = 1642,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Определяем стоимость сэкономленной электроэнергии в месяц с учетом величины тарифа – 2,3 руб./кВт·ч:

$$C_{\text{элек.}} = 1642,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \times 2,3 \text{ руб./ кВт}\cdot\text{ч} = 3777,75 \text{ руб./мес.}$$

Определяем среднемесячную экономию воды V (м^3) при усредненной суточной производительности $60 \text{ м}^3/\text{ч}$:

$$V = 60 \text{ м}^3/\text{ч} \times 730 \text{ ч} \times 0,03 = 1314 \text{ м}^3.$$

Определяем стоимость сэкономленной воды с учетом тарифа – 13,71 руб./ м^3

$$C_{\text{воды}} = 1314 \text{ м}^3 \times 13,71 \text{ руб./м}^3 = 18014,94 \text{ руб.}$$

Принимаем значение коэффициента λ за 1,2.

Определяем срок окупаемости преобразователей

$$T_{\text{окупаемости}} = \frac{115000}{1,2 \times (3777,75 + 18014,94)} \approx 4,4 \text{ мес.}$$

При определении экономической эффективности применения частотных преобразователей на объектах водоснабжения только по экономии электроэнергии учитываются следующие факторы:

1. Экономия электроэнергии (до 30 % и более в зависимости от изменения необходимой производительности насосных агрегатов);
2. Снижение затрат на текущее обслуживание;
3. Увеличение ресурса электродвигателя (в 1,5 - 2 раза):

$$T_{\text{окупаемости}} = \frac{C_{\text{преобр.}}}{\lambda \times C_{\text{элек.}}}.$$

Срок окупаемости применения частотных преобразователей по экономии электроэнергии определяется следующим образом.

Учитывая существующий диапазон изменения нагрузки, ожидаемую экономию электроэнергии принимаем равной 30 % в дневные часы (12 часов) разбора и 50 % в ночные часы (12 часов).

Определяем среднемесячную экономию электроэнергии (B):

В дневные часы:

$$B = 7,5 \text{ кВт} \times 365 \text{ ч} \times 0,3 = 821,25 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

В ночные часы:

$$B = 7,5 \text{ кВт} \times 365 \text{ ч} \times 0,5 = 1368,75 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Определяем стоимость сэкономленной электроэнергии в месяц с учетом величины тарифа – 2,3 руб./кВт·ч:

$$C_{\text{элек.}} = (821,25 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 1368,75 \text{ кВт}\cdot\text{ч}) \times 2,3 \text{ руб./ кВт}\cdot\text{ч} =$$

$$= 5037 \text{ руб./мес.}$$

Принимаем значение коэффициента λ за 1,2.
Определяем срок окупаемости преобразователей:

$$T_{\text{окупаемости}} = \frac{115000}{1,2 \times 5037} \approx 19 \text{ мес.}$$

В заключение отметим, что на предприятии должны быть созданы реальные условия для внедрения ресурсосберегающих нововведений, отвечающие современному состоянию экономики.

§ 3.8. Определение областей эффективности регулируемых электроприводов

Данный параграф посвящен методологии формирования областей технико-экономической эффективности электроприводов. Совершенствование систем ЭП идет по пути более широкого применения регулируемых ЭП и конструктивного слияния электродвигателей с рабочими органами производственных механизмов на основе использования средств полупроводниковой техники, автоматики и микроЭВМ. Прогрессивное воздействие оптимального насыщения отраслей народного хозяйства регулируемыми ЭП на основе современной полупроводниковой техники, в том числе и силовой, на экономику выражается в экономии 10 % и более производимой в стране электроэнергии, в экономии других жизненно важных ресурсов (свежей воды, природного газа и др.). Данные ЭП характеризуются обилием исполнения электродвигателей и преобразователей. Со стороны технологического рабочего органа также предъявляется большое разнообразие требований к изменениям момента нагрузки, частоты вращения и их относительным продолжительностям. Это сказывается на значениях потерь активной и потребляемой реактивной мощностей. Кроме того, регулируемые ЭП выполняются на постоянном и переменном токе. Все это определяет многообразие, сложность и индивидуальность технико-экономических оценок регулируемых ЭП.

Численные значения ΔP и Q зависят от момента нагрузки M и n , следовательно, технико-экономическая эффективность ЭП зависит от режима работы. Кроме того, как указано ранее, динамичны и стоимостные оценки различных ресурсов, используемых ЭП. Поэтому с целью большей универсальности полученных результатов технико-экономическое сравнение альтернативных ЭП целесообразно проводить не для

какой-то конкретной нагрузки, а в общем виде, т. е. для различных относительных значений момента нагрузки μ и частоты вращения n^* . Ввиду непрерывного совершенствования силовых и информационных каналов ЭП определение областей технико-экономической эффективности можно производить и в зависимости от разницы капитальных затрат ΔK возможных альтернатив с учетом μ и n^* . Тогда имеем

$$\Delta K = \frac{\gamma \Delta P_{ij}(\mu, n^*) + Z_{yK} \Delta Q_{ij}(\mu, n^*)}{p}, \quad (3.19)$$

где i и j – сопоставляемые альтернативы;

Δ – разность соответствующих параметров составляющих затрат.

Построенные в соответствии с (3.19) в осях $\Delta K - n^*$ граничные кривые $\Delta K = f(\mu, n^*)$ характеризуют области технико-экономической эффективности сравниваемых ЭП. При наличии более двух альтернатив осуществляется построение зависимостей $\Delta K = f(\mu, n^*)$ каждой пары сравниваемых ЭП и путем последовательного сопоставления определяются зоны эффективности каждого типа ЭП. С целью повышения достоверности получаемых результатов необходимо учесть при технико-экономических расчетах возможные отклонения параметров, входящих в составляющие затрат, например $C_{y\bar{z}}$, T_{Γ} , Z_{yK} и др. С учетом возможных отклонений расчетных параметров области эффективности сравниваемых вариантов разделяются не граничными кривыми, а зонами равной экономичности. Формирование альбома подобных областей эффективности, альтернативных ЭП для производственных механизмов ПП, работающих в различных режимах, значительно облегчает процедуру технико-экономического выбора ЭП. Практическое использование предлагаемых методологических подходов заключается в возможности выбора таких управленческих воздействий, которые обеспечивают переход к активному управлению ресурсосбережением нерегулируемых и регулируемых ЭП.

Построение таких областей эффективности может быть выполнено и при решении вопроса о выборе закона управления преобразователем в рамках одной системы ЭП. Построение таких областей также может осуществляться в различных координатах, например относительного изменения затрат:

$$z^* = \frac{pK_{II} + \Delta P_{II} \gamma + Z_{yK} Q_{II}}{pK_{I} + \Delta P_{I} \gamma + Z_{yK} Q_{I}} \quad (3.20)$$

и относительной частоты вращения n^* .

На рис. 3.15 *а* приведены области эффективности регулируемого ЭП, преобразователь которого обеспечивает увеличение коэффициента мощности привода за счет использования усложненного закона управления тиристорами – вариант 2; вариант 1 – ЭП с симметричным управлением тиристорами.

Причем, чем дальше от прямой 1 в области II находится точка с координатами $(z^*; n^*)$, тем больше экономическая прочность варианта 2, а области I соответствует эффективный вариант 1.

Возможные отклонения расчетных параметров (3.20), определяемые вероятностными методами, учитываются областями равной экономичности. Для точки А эта область показана заштрихованной (рис. 3.15 *б*). Предложен способ применения полученных областей экономичности и для случаев, когда разным ступеням нагрузочного графика и частотам вращения соответствуют разные законы управления преобразователем.

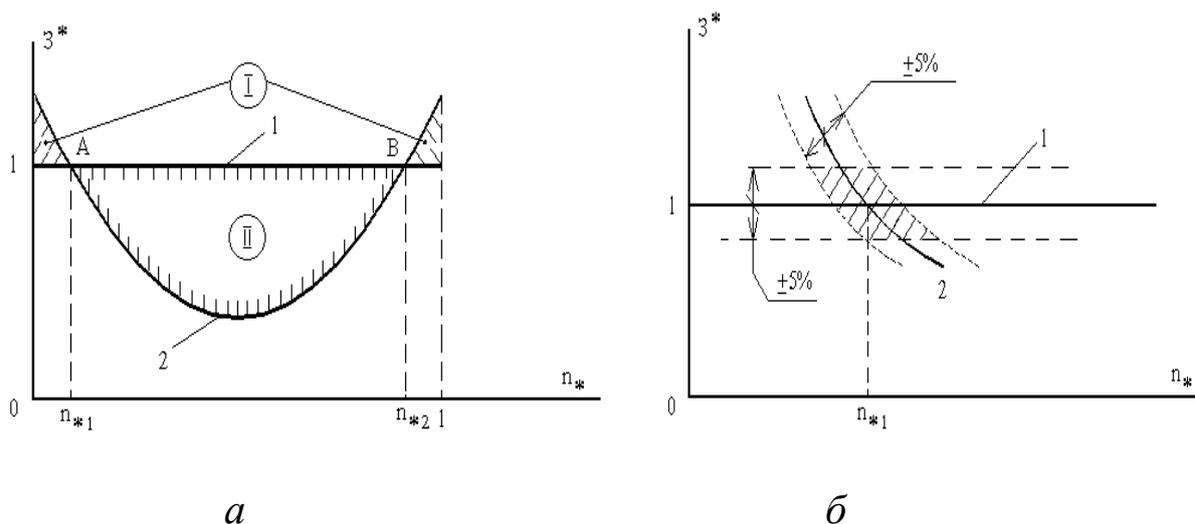


Рис. 3.15. Области эффективности сравниваемых вариантов электроприводов

На рис. 3.16 приведены зависимости периода окупаемости (Payback Method) *PВ* ЭП с таким управлением преобразователем в функции $C_{yэ}$, γ , T_r и трех характерных режимов работы ЭП, отличающихся относительными n_i^* и T_i^* . Кривые рис. 3.16 *а* идентичны кривым на рис. 3.16 *д*, так как γ численно определяется произведением $C_{yэ}$ и T_r . Зависимости *PВ* на рис. 3.16 *а*, *в* и рис. 3.16 *б*, *г* приведены для режимов 1 и 3 соответственно, которые отличаются значениями n_i^* и T_i^* . Из анализа этих зависимостей следует, что численное значение *PВ* уменьшается

с увеличением продолжительности работы (T_r) ЭП, с увеличением стоимости электроэнергии ($C_{уэ}$ и γ). Период окупаемости зависит и от режима работы ЭП: при изменениях значений T_r в диапазоне от 2000 до 8000 ч/год $PВ$ уменьшается, находясь в зоне I (рис. 3.16 *в, г*); чем относительно дольше ЭП работает на пониженных скоростях, тем период окупаемости вложенных средств меньше (рис. 3.16 *е*). Выбор ЭП из альтернатив приходится осуществлять и при оценке целесообразности реконструкций, проводимых на ПП. Определены три возможных случая в решении вопроса целесообразности реконструкции.

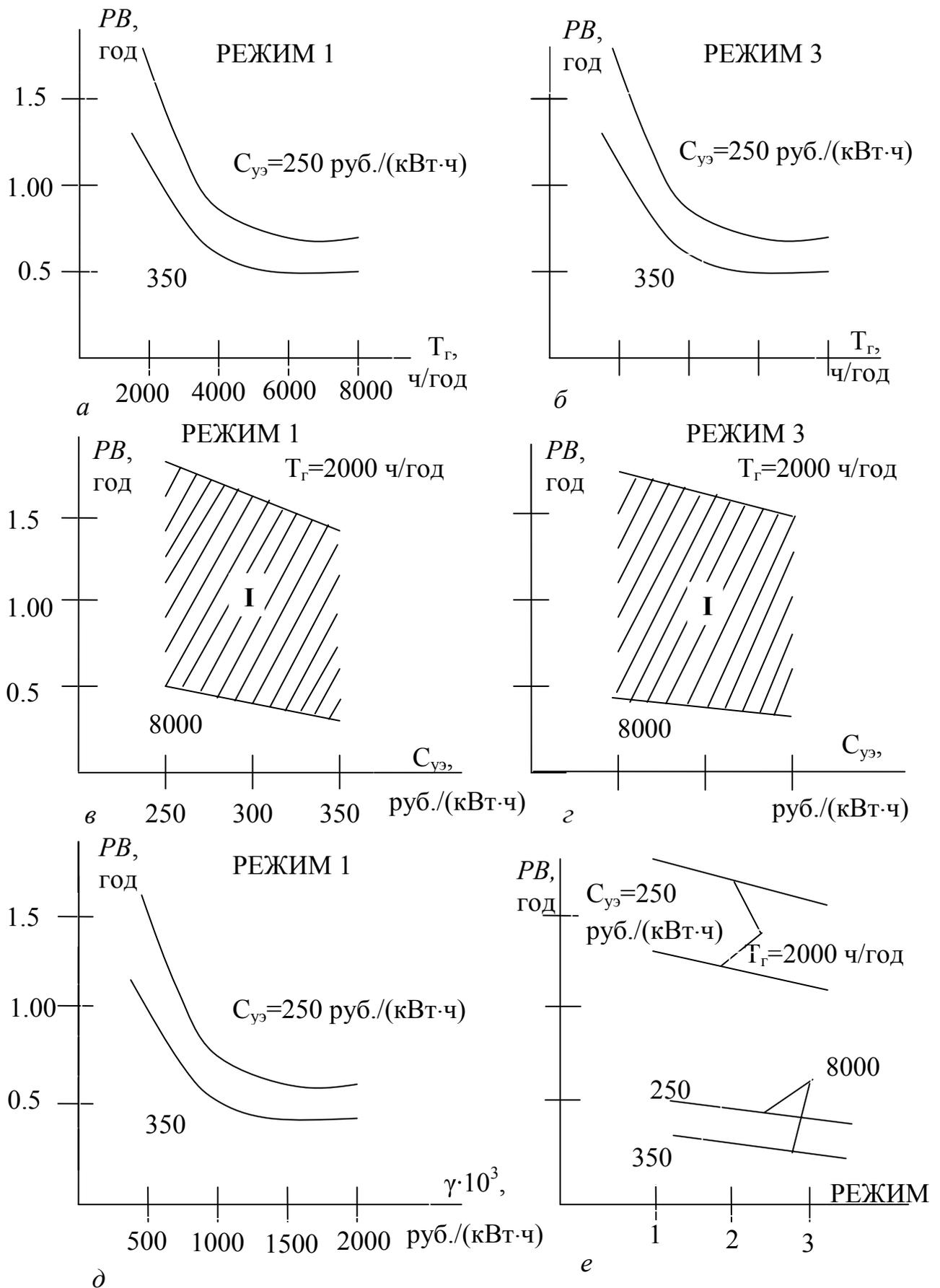


Рис. 3.16. Графическая интерпретация результатов расчетов

На примере реконструкции ЭП насоса водозабора методологически рассматривается целесообразность замены нерегулируемого ЭП с АД (вариант I) на частотно-регулируемый ЭП со стандартным АД с КЗ ротором (вариант II). По результатам расчетов найдены области эффективности таких ЭП (рис. 3.17), позволяющие определить предельно допустимые значения необходимых инвестиций $K^{\text{пред}}$ для реализации регулируемого ЭП с учетом возможных изменений γ , потерь мощности в напорном патрубке ($Q\Delta H$) и байпасном контуре (ΔQH). Так, например, при $\gamma = \gamma_2$ и значениях $Q\Delta H$ и ΔQH , равных 110 %, имеем точку M_1 с $K = K_1^{\text{пред}}$.

При фактических необходимых инвестициях $K_{\text{факт}} > K_1^{\text{пред}}$ по технико-экономическим показателям целесообразна реализация варианта I, а при $K_{\text{факт}} < K_1^{\text{пред}}$ – варианта II.

На этом рисунке $\gamma_2 > \gamma_1 > \gamma_3$ и изменения составляют $\pm 20\%$ ($\gamma_1 = 100\%$). Точка M_2 с координатами $K = K_2^{\text{пред}}$, $Q\Delta H = 105\%$ и $\Delta QH = 105\%$ определяет эффективный вариант II при значении $\gamma = \gamma_2$ и вариант I при $\gamma = \gamma_3$.

Если заданы значения инвестиций в размере K_3 , а $Q\Delta H$ и ΔQH в размере 90 %, то имеем точку M_3 , которая определяет предельное значение $\gamma^{\text{пред}}$.

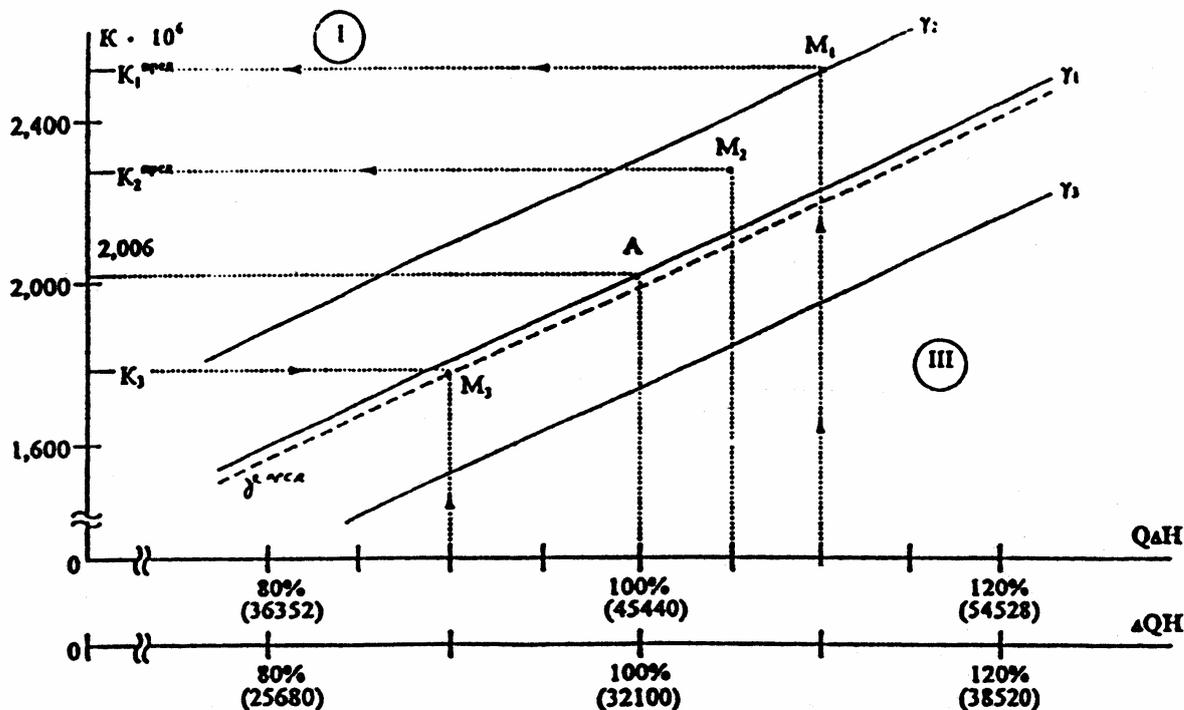


Рис. 3.17. Области эффективности регулируемого и нерегулируемого электропривода

При меньшей фактической стоимости 1 кВт года электроэнергии целесообразен вариант I, а при большей – вариант II. Следует отметить, что численное возрастание γ приводит к увеличению области технико-экономической эффективности варианта II, а ее снижение – к уменьшению области технико-экономической эффективности варианта II за счет увеличения области варианта I.

Приводятся зависимости $PВ$ необходимых инвестиций в зависимости от их величины и γ .

Показано, что эффективность регулируемых ЭП определяется суммой непосредственно эффекта, получаемого в силовом и информационном каналах ЭП, эффекта в технологическом механизме, получаемого за счет применения такого ЭП, и эффекта от сокращения потерь (брака) продукции, получаемого с технологического механизма.

ЛИТЕРАТУРА

К главе 1

1. Краснов Д.В., Онищенко Г.Б. Оценки потребности в высоковольтных регулируемых электроприводах переменного тока. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3.Ч.1.Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. С. 73-81
2. Онищенко Г.Б., Лазарев Г.Б. Развитие энергетики России. М.: Россельхозакадемия, 2008
3. Степанов В.М. Энергосбережение средствами электропривода в различных технологиях. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3.Ч.1.Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. С. 28-34
4. Беспалов В.Я. Перспективы создания отечественных электродвигателей нового поколения для частотно-регулируемого электропривода. http://esco-tcosys.narod.ru/2005_6/art104.pdf
5. Бабокин Г.И., Ляхомский А.В., Ставцев В.А. Электросбережение в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2010
6. Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Купцов В.В. Современные методы диагностирования асинхронных двигателей и их развитие. Магнитогорск: МГТУ, 2010
7. Энергосбережение в электроприводах металлургического производства. Селиванов И.А., Карандаев А.С., Сарваров А.С. и др. / Электросбережение средствами электропривода М.: МЭИ, 2011
8. Анищенко В.А., Токочакова Н.В. Оценка и нормирование показателей энергоэффективности предприятий трубопроводного транспорта нефти. Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2007. –233 с.
9. Тютева П.В., Муравлева О.О. Оценка экономической эффективности асинхронного регулируемого электропривода насосных агрегатов // Известия вузов. Электромеханика. 2009. № 2, С. 61-64

К главе 2

10. Чэпмэн Д. Цена низкого качества электроэнергии. // Энергосбережение. – 2004 – №1. – С. 66 – 69
11. Добрусин Л.А. Фильтрокомпенсирующие устройства для

преобразовательной техники. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003. – 84 с.

12. Солодухо Я.Ю. Тенденции компенсации реактивной мощности. Ч.1. Реактивная мощность при несинусоидальных режимах работы.– М.: Информэлектро, 1987. – 50 с.

13. Парфёнов Б.М., Шевырёв Ю.В. Статические режимы фильтро-компенсирующих устройств в системах электропривода соизмеримой мощности // Автоматизированный электропривод. Сб. науч. тр. ОАО «Электропривод» – М.: 2002. – С. 134 – 153

14. Шевырёв Ю. В. Математические модели электротехнических комплексов горных машин и буровых установок с тиристорным электроприводом постоянного тока // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2004. – № 12. – С. 20-27

15. Шевырёв Ю. В. Методы моделирования и повышения электроэнергетических показателей электротехнических комплексов буровых установок. – М.: Московский государственный геологоразведочный университет, 2005. – 177 с.

16. Парфенов Б.М., Шевырев Ю.В., Шинянский А.В. Особенности тиристорных электроприводов при питании от энергоисточников соизмеримой мощности // Электротехническая промышленность. Сер.: Электропривод. – 1981. – №. 3. – С. 18-21

17. Шевырев Ю.В., Шинянский А.В. Анализ искажения напряжения в системе ограниченной мощности с тиристорными электроприводами // Электротехническая промышленность. Сер.: Электропривод. – 1982. – № 7. – С. 1-3

18. Шевырев Ю.В., Шинянский А.В. Моделирование автономных систем, содержащих тиристорные электроприводы постоянного тока // Моделирование электроэнергетических систем: Всесоюзная научная конференция: Тез. докл. – Баку: 1982. – С. 276-277

19. Парфенов Б.М., Шевырев Ю.В., Шинянский А.В. Тиристорные электроприводы главных механизмов буровых установок в системах электроснабжения соизмеримой мощности // Обзорная информация. М.: Информэлектро, 1984.– 37 с.

20. Повышение энергетической эффективности тиристорных электроприводов буровых установок / Б.И. Абрамов, Е.В. Давыдов, Ю.В. Шевырёв, А.В. Шинянский // XI Всесоюзная научно-техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода: Тез. докл. – М.: 1991. – С. 98

21. Методика исследования энергетических характеристик тиристорных электроприводов буровых установок / Ю.В. Шевырёв, А.В. Шинянский, Б.И. Абрамов и др. // III Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле»: Избранные доклады. – М.: МГГА, 1998. – С. 243-246

К главе 3

22. Лазарев Г.Б. Электромагнитная совместимость высоковольтных преобразователей частоты с системами электроснабжения и электродвигателями собственных нужд тепловых электростанций // Электротехника. 2004. №10, С. 14-19

23. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – Москва: Энергоатомиздат. 1984.

24. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. РД 153-34.0-15.501-00 РАО «ЕЭС России»

25. Фёдоров О.В, Сарваров А.С., Шевырев Ю.В. Электропривод в промышленности. М.: ИНФРА-М, 2008. - 150 с.

26. Ильинский Н.Ф., Шакарян Ю.Г. Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода. М.: Минтопэнерго РФ, 1997

27. Собственные нужды тепловых электростанций / Э.М. Аббасова, Ю.М. Голоднов, В.А. Зильберман, А.Г. Мурзанов; Под. ред. Ю.М. Голоднова. М.: Энергоатомиздат, 1991

28. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования (вторая редакция) [Текст]: офиц. Изд. – М.: Экономика, 2000

ПРИЛОЖЕНИЯ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ФЦП – федеральная целевая программа
 АД – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором
 EFF1 и EFF2 – уровни энергоэффективности
 КПД – коэффициент полезного действия
 ФСА – функционально-стоимостной анализ
 РУП – республиканское унитарное предприятие
 ТЭР – топливно-энергетические ресурсы
 ПЭ – потенциал энергосбережения
 К – капитальные затраты
 р – суммарный коэффициент отчислений от капитальных затрат (К) на электродвигатель, учитывающий отчисления связанные с коэффициентом эффективности К, амортизацией и затратами на ремонт и обслуживание
 γ – стоимость одного кВт года электроэнергии.
 $K_{\text{зопт}}$ – оптимальный коэффициент загрузки
 ТЭС – тепловая электростанция
 ТЭЦ – тепловая электроцентраль
 ЕС – Страны Европейского Союза
 УВ – управляемый выпрямитель
 ДПТ – электродвигатель постоянного тока
 ТП – тиристорный преобразователь
 Т – трансформатор
 КЭ – качество электроэнергии
 ПКЭ – показатели качества электроэнергии
 ИРМ – источник реактивной мощности
 КБ – конденсаторная батарея
 СТК – статические тиристорные компенсаторы
 ФКУ – фильтро-компенсирующее устройство
 ФКГ – фильтро-конденсаторная группа
 ФКУ-С – фильтро-компенсирующее устройство ступенчатого типа
 ТРГ – тиристорно-реакторная регулируемая группа
 ФКУ-К – фильтро-компенсирующее устройство с непрерывным косвенным регулированием

ЭТК – электротехнический комплекс
ШИМ – широтно-импульсная модуляция
АИН – автономный инвертор напряжения
ВЛ – воздушная линия электропередачи
ЭВ – электропотребители вспомогательные
ТПЭ – теория планирования эксперимента
 PB – период окупаемости
ЭП – электропривод
ПЧ – преобразователь частоты
АВГ – аппарат воздушного охлаждения
ЧП – частотный привод
Дроссл – дроссельное регулирование
НА – насосный агрегат с дросселированием
РЭП – регулируемый электропривод
ЧДД – чистый дисконтированный доход
ИД – индекс доходности
ПМ – промышленное предприятие
 $C_{yэ}$ – стоимость одного кВт часа электроэнергии
 T_r – годовое время работы
 $C_{yэ}$ – стоимость кВт часа электроэнергии
 T_m – время использования максимума электроэнергии
ВЛ – воздушная линия

Маркировка насосов

В России принята маркировка насосов, состоящая из условного обозначения типа насоса и его основных технических показателей (буквенное и цифровое обозначение).

Маркировка насоса включает, как правило, три основных показателя.

1. Вид насоса, который обозначается буквами. Для основных насосов общего назначения приняты следующие буквенные обозначения:

К – центробежные консольные;

КМ – центробежные консольные моноблочные;

Д – центробежные двухстороннего выхода;

В – центробежные вертикальные;

ОПГ – осевые горизонтальные регулируемые;

ВС, ВК – вихревые;

ЦНС, МС – многоступенчатые (секционные).

2. Подача расчетная ($\text{м}^3/\text{ч}$), получаемая при оптимальном режиме работы, соответствующем максимальному КПД.

3. Напор расчетный (м) столба перекачиваемой жидкости для указанных в п. 2 условий.

Приложение В

Параметры консольных насосов

Марка насоса	Подача, м ³ /ч	Напор, м	Частота вращения, об/мин	Цена с учетом НДС, руб.
К50-32-125а	12,5	20	3000	6637
К50-32-125	12,5	20	3000	4773
К65-50-160	25,0	32	3000	6254
К20/30	20,0	30	3000	5390
К 90/20	90,0	20	3000	7072
К80-65-160	50,0	32	3000	7376
К80-50-200	50,0	50	3000	19384
К100-80-160	100,0	32	3000	19708
К100-65-200	100,0	50	3000	27662
К10065-250	100,0	80	3000	39675
К150-125-250	200,0	20	1500	37237
К150-125-315	200,0	32	1500	41060
К200-150-250	315,0	20	1500	48816
К200-150-315	315,0	32	1500	63023
К200-150-400	400,0	50	1500	92233
К290/30	290,0	30	1500	53038
К160/30	160,0	30	1500	37988

Примечание

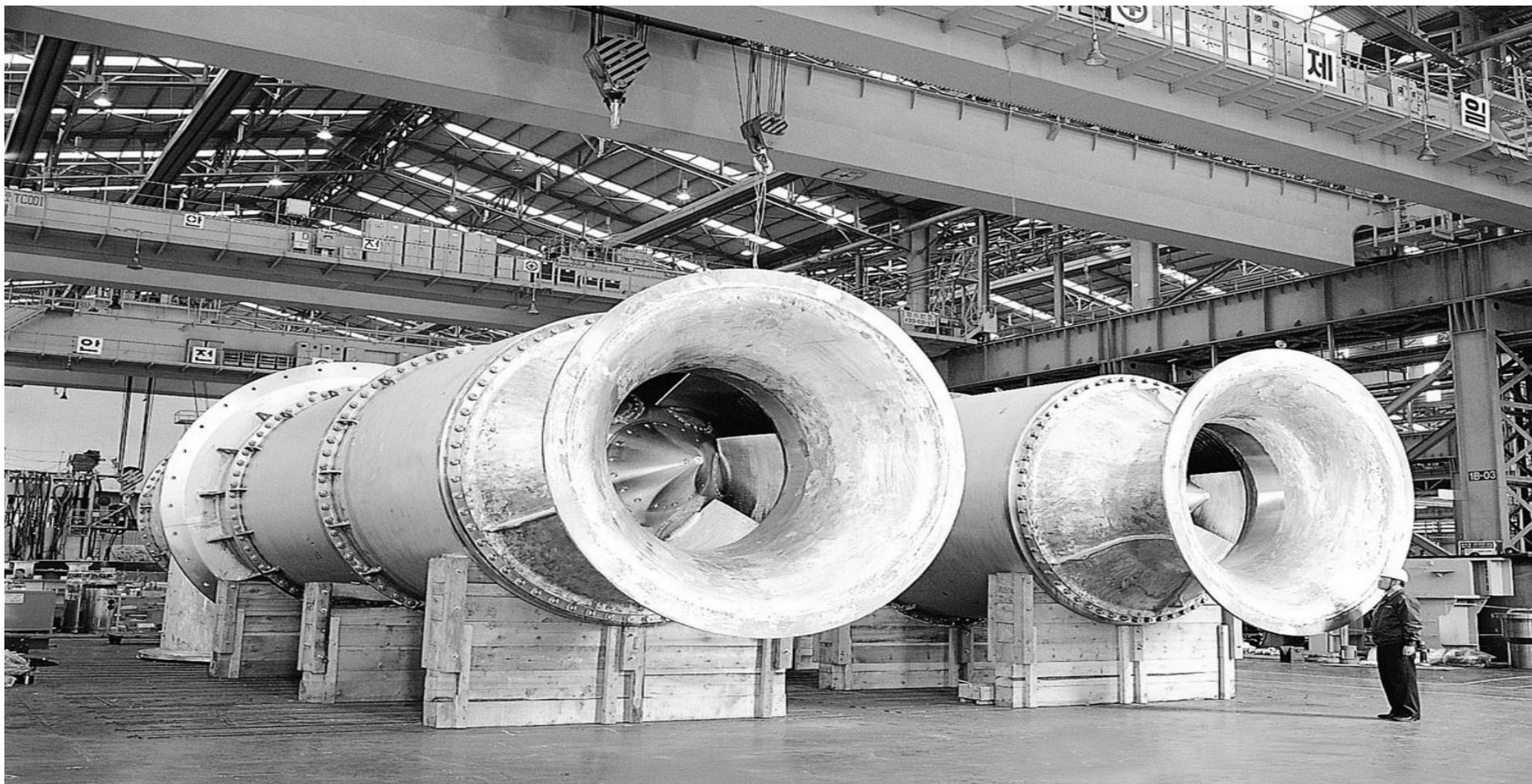
цены указаны в значениях 2004 г.

Приложение Г

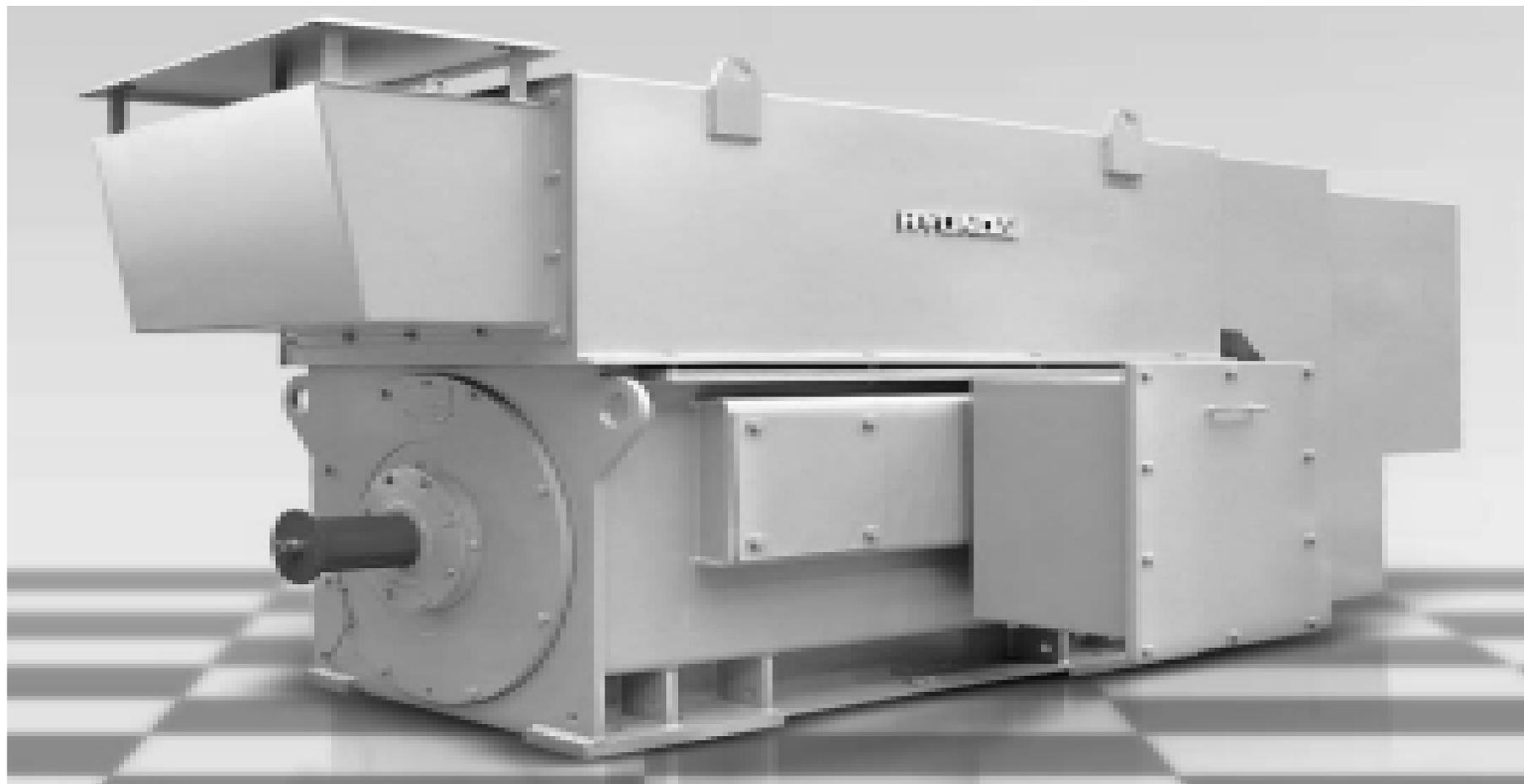
Технико-экономические показатели насосов серии Д

Характеристика	Параметры насоса Д					
	320-70	1250-65	2500-62	3200-75	4000-95	6300-80
Мощность, кВт	100	320	630	800	1250	1600
КПД насоса	0,78	0,86	0,87	0,87	0,88	0,88
КПД электродвигателя	0,920	0,922	0,935	0,953	0,962	0,962
КПД агрегата	0,716	0,790	0,816	0,830	0,846	0,846
Масса, кг	1130	4245	8730	11660	12780	18666
Удельная масса, кг/кВт	11,3	13,3	13,9	14,6	10,3	11,7

Циркуляционные насосы АЭС



Электродвигатель HRQ3 803-6 циркуляционного насоса АЭС



Научное издание

Фёдоров Олег Васильевич

**ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Монография

Редактор *И.О.Ф.*

Корректор *И.О.Ф.*

Компьютерная верстка: *И.О.Ф.*

Санитарно-эпидемиологическое заключение
№ 77.99.60.953. Д000035.04.09 от 01.04.2009 г.

Подписано в печать **25.11.2011**. Формат 60x90^{1/16}
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Уч.-изд. л. **9,0**. Усл. печ. л. **10,2**. Тираж **200** экз. Заказ .
