

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Рудный индустриалдық институты

Рудненский индустриальный институт

**Хабдуллин А.Б., Хабдуллина З.К., Цырук С.А., Неберекутина Н.С.,
Хабдуллин Ар.Б., Есжанова А.У.**

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕТОДОВ
ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЦЕЛЮ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ
МОЩНОСТИ И НАГРУЗКИ**

Монография



Рудный, 2017

УДК 621.315

ББК 31.25

Р 17

Рецензенты: доктор технических наук, профессор Байманкулов А.Т.
доктор технических наук, профессор Баймухамедов М.Ф.

Коллектив авторов: **Хабдуллин А.Б., Хабдуллина З.К., Цырук С.А., Неберекутина Н.С., Хабдуллин Ар.Б., Есжанова А.У.**

Р 17 Разработка энергосберегающих методов оптимизации режимов работы систем электроснабжения с целью минимизации потерь мощности и нагрузки: монография / Рудный: Изд-во Рудненский индустриальный институт, 2017. – 135 с.

ISBN 978-601-7554-80-4

В монографии представлена разработка универсальной математической модели систем электроснабжения и узлов промышленной нагрузки, позволяющей на основе детального учета характера зависимостей потерь мощности от уровней напряжения для каждого элемента выполнить комплексную оценку потерь мощности во всей системе одновременно. На основе полученной универсальной модели следует разработать комплекс программ, предназначенных для выполнения расчетно-экспериментальных исследований с целью получения статических характеристик потерь мощности и нагрузок в СЭС и установления закономерностей изменения этих характеристик.

УДК 621.315

ББК 31.25

ISBN 978-601-7554-80-4

© **Хабдуллин А.Б., Хабдуллина З.К.,
Цырук С.А., Неберекутина Н.С.,
Хабдуллин Ар.Б., Есжанова А.У., 2017**

©Рудненский индустриальный институт, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Анализ мирового опыта по разработке энергосберегающих методов оптимизации режимов работы систем электроснабжения с целью минимизации потерь мощности и нагрузки	8
1.1 Основные задачи оптимизации установившихся режимов ЭЭС	8
1.2 Анализ методов решения задач оптимизации в электроэнергетике	11
1.3 Анализ программных комплексов по расчету оптимизации режимов работы систем электроснабжения	17
1.4 Обзор научных публикаций по оптимизации режимов работ электроснабжения	21
1.5 Выводы по главе	23
2. Моделирование системы электроснабжения и установившихся режимов работы	25
2.1. Моделирование структуры, конфигурации и состояния системы промышленного электроснабжения	25
2.2. Моделирование режимов системы промышленного электроснабжения	30
2.3 Особенности моделирования характерных режимов	30
2.4 Анализ переходных процессов в характерных режимах	45
2.5 Синхронный установившийся режим синхронных двигателей	54
2.3 Выводы по главе 2	71
3. Определение параметров и характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором	73
3.1 Схема замещения и основные соотношения, характеризующие режим АДК	73
3.2 Оценка алгоритмов расчета параметров схемы замещения низковольтных АДК	85
3.3 Особенности определения параметров схем замещения высоковольтных АДК	92
3.4 Статические характеристики потерь мощности в АДК	93
3.5 Разработка программного комплекса «Расчет параметров и статические характеристики потерь мощности асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором»	99
3.6 Выводы по разделу 3	102
4 Разработка методики и алгоритмов расчета параметров схем замещения синхронного двигателя с массивным гладким ротором и с шихтованными полюсами, по каталожным данным применительно к определению статических характеристик потерь мощности	104
5. Статические характеристики нагрузок и потерь мощности для реальных промышленных объектов и исследование возможности их использования при разработке энергосберегающих мероприятий	110
6. Разработатка комплекс программ, предназначенных для выполнения расчетно-экспериментальных исследований с целью получения статических характеристик потерь мощности и нагрузок в СЭС и	117

установления закономерностей изменения этих характеристик.	
Заключение	122
Определения	123
Обозначения и сокращения	127
Список использованных источников	128

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность функционирования различных промышленных объектов определяется экономичностью работы системы электроснабжения, которая актуальна при значительных удельных расходах электроэнергии и высокой энергетической составляющей в структуре себестоимости продукции. Следовательно, необходимо решать задачу оптимизации режимов работы СЭС с целью минимизации потерь мощности и нагрузки на передачи энергии от энергосистемы к различным потребителям.

Выявленные проблемы приводят к возникновению необходимости и проведения исследований в направлении отыскания эффективных подходов и методик решения оптимизационных задач для различных электроэнергетических компаний в современных условиях, с учетом существующих рыночных отношений в энергосистеме Республики Казахстан.

Проектирование и эксплуатация схем электроснабжения требуют решения разнообразных задач, характеризующихся повышением надежности электроснабжения потребителей и множеством параметров, определяющих состояние взаимосвязанных и взаимодействующих процессов в синхронных и асинхронных двигателях, отдельных элементах системы электроснабжения и энергосистемы. Проблемы анализа, расчета и оптимизации режимов работы решаются на основе применения специальных методов и средств вычислительной техники. Наибольшее распространение получили методы математического моделирования.

Целью работы является разработка универсальной математической модели систем электроснабжения и узлов промышленной нагрузки, позволяющей на основе детального учета характера зависимостей потерь мощности от уровней напряжения для каждого элемента выполнить комплексную оценку потерь мощности во всей системе одновременно. На основе полученной универсальной модели следует разработать комплекс программ, предназначенных для выполнения расчетно-экспериментальных исследований с целью получения статических характеристик потерь мощности и нагрузок в СЭС и установления закономерностей изменения этих характеристик.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие теоретические и прикладные задачи:

1. Анализ мирового опыта по разработке энергосберегающих методов оптимизации режимов работы систем электроснабжения с целью минимизации потерь мощности и нагрузки
2. Моделирование системы электроснабжения и установившихся режимов работы
3. Разработка методики и алгоритмов расчета параметров схем замещения асинхронного двигателя, по каталожным данным применительно к определению статических характеристик потерь мощности;

4. Разработка методики и алгоритмов расчета параметров схем замещения синхронного двигателя с массивным гладким ротором и с шихтованными полюсами, по каталожным данным применительно к определению статических характеристик потерь мощности;

5. Получение статических характеристик нагрузок и потерь мощности для реальных промышленных объектов и исследование возможности их использования при разработке энергосберегающих мероприятий

6. Разработать комплекс программ, предназначенных для выполнения расчетно-экспериментальных исследований с целью получения статических характеристик потерь мощности и нагрузок в СЭС и установления закономерностей изменения этих характеристик.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана методика и алгоритмы расчета параметров схем замещения низковольтных и высоковольтных АДК, СД с массивным гладким ротором и с шихтованными полюсами по каталожным данным применительно к определению статических характеристик потерь мощности;

2. Выполнена оценка отклонений параметров схем замещения двигателей по критерию минимизации разброса вычисляемых значений при нормированных отклонений каталожных данных;

3. Предложена универсальная математическая модель системы электроснабжения с электрическими нагрузками, реализующая учет статических характеристик потерь мощности и нагрузок от параметров режима и загрузки электрических двигателей;

4. Разработан программный комплекс предназначенных для выполнения расчетно-экспериментальных исследований с целью получения статических характеристик потерь мощности и нагрузок в СЭС и установления закономерностей изменения этих характеристик

Подготовлены и сданы промежуточные отчеты по теме исследования:

- промежуточный отчет 0678/ГФ4 за 2016 год, договор №144 от 12 февраля 2015г., № госрегистрации 0115РК00609, инвентарный № 0215РК02483;

- промежуточный отчет 0678/ГФ4 за 2016 год, договор № 125 от 28 апреля 2016г, № госрегистрации 0115РК00609, инвентарный № 0216РК00625.

Группой исследователей опубликованы 41 публикация, в т.ч. 10 - в зарубежных журналах на платформе Web of Science (Thomson Reuters), - 18 в научных изданиях рекомендуемых уполномоченным органом , - 3 казахстанских журналах , - 10 -материалы международных конференций.

Получено 3 авторских свидетельства о государственной регистрации прав на объект авторского права, и подана 1 заявка на получение авторского свидетельства о государственной регистрации прав на объект авторского права

Получено 16 актов внедрения программных комплексов в учебный процесс Государственного университета имени Шакарима города Семей, Павлодарского государственного университета имени С.Торайгырова,

Костанайского государственного университета имени А.Байтурсынова, Рудненского индустриального института.

Получено 2 акта внедрения на производство (АО «Соколовско-Сарбайское горнообогатительное производственное объединение» (входящие в Евразийскую группу ERG) и филиал «Рудненский филиал» ТОО «Фирмы Арасан»).

1. АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА ПО РАЗРАБОТКЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И НАГРУЗКИ

1.1 Основные задачи оптимизации установившихся режимов ЭЭС

Задачи оптимизации установившихся режимов ЭЭС принято делить на две основные группы:

- экономически выгодное распределение нагрузки между энергоагрегатами;
- выбор оптимального состава работающих энергоагрегатов.

При решении задачи экономически выгодного распределения нагрузки между энергоагрегатами изначально полагают, что некоторое количество (n) энергоблоков подключено к ЭЭС, и решение задачи для каждого энергоблока всегда принадлежит интервалу активных мощности

$$P_n \in [P_n^{tmin} ; P_n^{max}], \quad (1.1)$$

Возможность вывода одного или нескольких энергоблоков из работы сети не рассматривается. Следовательно, критерием оптимизации для вертикально-интегрированной системы будет следующее выражение :

$$C_{\text{топл } \Sigma} \rightarrow \min, \quad (1.2)$$

где $C_{\text{топл } \Sigma}$ – суммарные затраты на топливо для генерации заданной мощности всеми энергоблоками ТЭС.

Для вертикально-интегрированной и энергосистемы критерий минимизации потерь в электрической сети автоматически учитывается в критерии оптимизации по формуле (1.2). До начала реструктуризации в энергосистемах разных стран, основные исследования велись в направлении отыскания максимально простых и эффективных алгоритмов оптимизации режимов по критерию (1.2), с учетом потерь активной мощности к электрической сети или без.

Наибольшее развитие получило применение метода неопределенных множителей Лангранжа. [1÷7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 16, 17] Суть метода заключается в переформулировке критерия оптимизации, полученный в результате критерий одновременно включает в себя и ограничения. При определении минимума целевой функции, ограничения выполняются автоматически.

То есть задача на условный экстремум, когда требуется найти минимум затрат на топливо для генерации заданного количества мощности (1.2) для всех электростанций на отрезке времени, например за один час, при наличии ограничения в виде баланса мощности, сводится к задаче на безусловный

экстремум, с использованием функции Лагранжа [1÷4]

$$L = C_{\text{топл}\Sigma} + \lambda W \quad (1.3)$$

где $C_{\text{топл}\Sigma}$ определяется по формуле (1.2); λ - неопределенный множитель Лагранжа, представляющий собой некоторое неизвестное число и рассматриваемое как переменная; W - левая часть уравнения баланс активной мощности, определяется по формуле:

$$W = \sum_{i=1}^n P_1 - P_{\text{нагр}\Sigma} - \Delta P - P_{\text{ср}} \quad (1.4)$$

Условию достижения экстремума функцией Лагранжа L отвечает минимальное значение функции $C_{\text{топл}\Sigma}$, с учетом ограничения в виде уравнения связи (1.4).

Представим, что все тепловые станции и суммарные топливные затраты зависят только от величины активных мощностей:

$$C_{\text{топл}\Sigma} = f(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (1.5)$$

где P_1, P_2, \dots, P_n - активные мощности.

Приравняв нулю частные производные от L по всем переменным аргументам (что соответствует условию достижения функцией экстремума), то есть по всем активным мощностям P_1 , получим уравнение:

$$\frac{\partial L}{\partial P_1} = \frac{\partial C_{\text{топл}i}}{\partial P_1} + \lambda \frac{\partial W}{\partial P_1} = \frac{\partial C_{\text{топл}i}}{\partial P_1} + \lambda = 0 \quad (1.6)$$

где $i \in [1, \dots, n]$

Так как суммарные затраты равны сумме затрат по каждому из агрегатов;

$$C_{\text{топл}\Sigma} = C_{\text{топл}1} + C_{\text{топл}2} + \dots + C_{\text{топл}n} \quad (1.7)$$

то справедливо равенство:

$$-\lambda = \frac{\partial C_{\text{топл}1}}{\partial P_1} = \frac{\partial C_{\text{топл}2}}{\partial P_1} = \dots = \frac{\partial C_{\text{топл}n}}{\partial P_1} \quad (1.8)$$

Частная производная от затрат энергоблока по активной мощности энергоблока называется удельные приростом затрат энергоблока [1÷ 4]

Режим ЭЭС, при котором выполняется равенство удельных приростов затрат энергоблоком является оптимальным. Следовательно, условия наиболее выгодного распределения мощностей между включенными энергоблоками, при неучете изменений нагрузок в узлах и потерь активной мощности в электрической сети, запишутся в следующем виде:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_n; \quad (1.9)$$

Сумма всех мощностей будет равна следующему выражению:

$$P_1 + P_2 + \dots + P_n - P_{нагр\sigma} - \Delta P_0 = 0 \quad (1.10)$$

При учете влияния изменения потерь мощности и электрической сети, условия наивыгоднейшего распределения активной мощности между работающими энергоблоками представлено ниже (1.11). Допустим, суммарные потери активной мощности в электрической сети зависят только от активных мощностей энергоблоков:

$$\Delta P_c = f(P_1, P_2 + \dots + P_n), \quad (1.11)$$

где ΔP_c – потери мощностей

Условием наивыгоднейшего распределения мощностей будет выражение:

$$\frac{\partial L}{\partial P_1} = \frac{\partial C_{топли}}{\partial P_1} + \lambda \frac{\partial W}{\partial P_1} = \varepsilon + \lambda \left(\frac{\partial \Delta P_c}{\partial P_1} \right) = 0, \quad i \in [1, \dots, n]. \quad (1.12)$$

Обозначим μ следующим выражением:

$$\mu = -\lambda = \frac{\varepsilon_i}{1 - \frac{\partial \Delta P_c}{\partial P_1}}, \quad (1.13)$$

где μ - удельный прирост ЭЭС, при учете потерь в сетях, а выражение

$\frac{\varepsilon_i}{1 - \frac{\partial \Delta P_c}{\partial P_1}}$ - есть удельный прирост затрат i -го энергоблока с учетом изменения потерь в электрической сети.

Условия наивыгоднейшего распределения мощностей между включенными энергоблоками, при учете влияния изменения потерь активной мощности в электрической сети, и неучете изменений нагрузок в узлах, запишутся в виде выражения(1.10) и (1.14):

$$\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n; \quad (1.14)$$

1.2 Анализ методов решения задач оптимизации в электроэнергетике

Метод равенства относительных приростов [1], созданный на базе метода неопределенных множителей Лагранжа, получил широкое применение при решении задач оптимизации в электроэнергетике, которую удобно применять при нахождении оптимального распределения нагрузки между энергозатратами на электростанциях. Однако применение критерии оптимизаций (1.14), основанное на ряде допущений, дает приблизительный результат, зависящий от выбора балансирующего узла схеме замещения электрической сети. [18] Решение оптимизационной задачи методом относительных приростов связано с решением итеративным способом сложной системы нелинейных уравнений. При большом количестве ограничений итеративный процесс может не сойтись.

Метод штрафных функций [1, 4, 15, 19, 20] служит для того чтобы переформулировать критерии оптимизации с учетом ограничения в виде неравенств. Суть метода заключается в наложении на целевую функцию штрафа таким образом, что при нахождении расчетного параметра в допустимой области значение штрафа будет мало, а при выходе параметры из зоны допустимых значений, штраф резко возрастает. Такой подход к заданию ограничений алгоритмически прост, дает возможность учета ограничений любого вида, а также позволяет получить решение в случае несовместимых ограничений. [20]

Другой подход к решению оптимизационной задачи с учетом ограничений в виде неравенств предлагает метод приведенного градиента [20], который заключается в коррекции компонент вектора-градиента в зависимости от нарушения ограничений в виде неравенств

При решении оптимизационных задач часто используются релаксационные методы оптимизации, одним из которых является градиентный метод отраженный в следующих работах. [1÷5, 8,9,14,15,20÷23] При оптимизации объектов градиентным методом определяется направление изменения переменных, которое ведет целевую функцию к экстремуму. Задаются, в ряде случаев произвольно, некоторым начальным приближениям по выражению:

$$P^{(0)} = [P_1^{(0)}, P_2^{(0)}, \dots, P_n^{(0)}], \quad (1.15)$$

Далее определяют частные производные

$$\frac{\partial C_{\text{топл } \Sigma}}{\partial P_1}, \quad (1.16)$$

которые формируют вектор-градиент функции $C_{\text{топл } \Sigma}$.

При условии, что затраты на топливо i -ого энергоблока зависят только от мощности этого энергоблока, вектор градиент целевой функции будет иметь вид:

$$\nabla C_{\text{топл}\Sigma} = \left[\frac{\partial C_{\text{топл}1}}{\partial P_1} + \frac{\partial C_{\text{топл}2}}{\partial P_2}, \dots, \frac{\partial C_{\text{топл}n}}{\partial P_n} \right]. \quad (1.17)$$

В дальнейшем выбирается шаг варьирования $h_{\text{гр}}$ независимые переменные P_1 изменяют на шаг $h_{\text{гр}}$ так, чтобы знак изменений переменных соответствовал уменьшению целевой функции $C_{\text{топл}\Sigma}$, то есть выбирают знак, противоположный знаку частной производной целевой функции (1.16). Затем в направлении обратном вектору-градиенту делают новый шаг и так далее, пока модуль градиента не окажется меньше некоторого заданного малого числа.

$$|\nabla C_{\text{топл}\Sigma}| = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{\text{топл}1}}{\partial P_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{\text{топл}2}}{\partial P_2}\right)^2, \dots, \left(\frac{\partial C_{\text{топл}n}}{\partial P_n}\right)^2}. \quad (1.18)$$

Если одна из переменных P_1 на очередном этапе доходит до предельного значения P_n^{\min} или P_n^{\max} , то дальнейшее движение в направлении экстремума осуществляется вдоль ограничения.

Достоинством градиентного метода является сокращение объема вычислений, по сравнению с другими итерационными методами. Недостатком градиентного метода является сложность задания ограничений. В исследуемых источниках разработано множество модифицированных алгоритмов, позволяющих устранить данный недостаток.

Градиентный метод не гарантируют нахождение глобального экстремума, найденный экстремум зависит от выбора исходной точки, от которого был начат поиск исследований. [21]

К релаксационным методам относится метод покоординатного поиска (или метод Гаусса-Зейделя). [8, 15] Суть заключается в поочередном изменении переменных P_j и организация движения целевой функции в направлении экстремума.

При решении оптимизационной задачи метод покоординатного поиска:

- нет необходимости определять характеристики относительных прироста потерь мощности в электрической сети;
- не возникает необходимость водить при оптимизации большое количество допущений;
- достаточно иметь математическую модель электрической сети, позволяющую рассчитать критерии активной мощности в сети.

Как и при оптимизации режима работы ЭЭС градиентным методом, задаются некоторым начальным приближением (1.15) и выбирают шаг изменения переменных $h_{\text{из.гр}}$.

Целевой функцией могут приниматься суммарные топливные затраты на генерацию заданной мощности $C_{\text{мошн}\Sigma}$ или суммарные затраты ЭЭС с

учетом стоимости потерь в электрической сети:

$$C_{\Sigma} = (C_{\text{мощн.}\Sigma} + C_{\Delta P}), \quad (1.19)$$

где C_{Σ} - переменная составляющая затрат на производство и передачу электроэнергии, на которую возможно влиять в ходе оптимизации.

Сначала изменяется одна из переменных P_i например P_{i2} при фиксированных значениях других переменных, до тех пор, пока не будет достигнут локальный экстремум по этой переменной, после чего фиксируется значения P_1 и осуществляется изучения переменной P_2 опять так при постоянство значений других переменных. Затем следует провести переход к изменению переменной P_3 и так далее по всем переменным $P_i, i \in [1, \dots, n]$. В итоге организуется движения целевой функции к минимуму. Внутренний цикл оптимизации завершается когда локальный экстремум найден по всем переменным, за исключением мощности балансирующего узла.

Затем вновь происходит изменения переменной P_1 и цикл перебора переменных P_i . Продолжается движения целевой функции к экстремуму, осуществляется внешний цикл метода покоординатного поиска. На каждом внешнем цикле оптимизации все генераторные узлы схемы замещения по порядку назначаются балансирующими.

Движение прекращается, когда изменение любой из переменных P_i в любую из сторон не приводит к уменьшению целевой функции, которая является условием окончания поиска.

При решении задач оптимизации установившихся режимов ЭЭС релаксационными методами, важно точно подобрать шаг изменения независимых переменных. Чем меньше шаг, тем точнее будут решения, но больше объем вычислений.

Главное достоинство данного метода простота. Недостаток – чувствительность к начальным приближениям, большой объем вычислений, глобального экстремума.

При учете в критерии оптимизации стоимости потерь в электрической сети, целевая функция задачи оптимизации может иметь невыпуклую форму, тогда есть риск подмены глобального экстремума локальным. Существуют различные методы позволяющие преодолеть это явление: метод случайного поиска; оврагоперешаговый метод.

Метод случайного поиска заключается в реализации некоторых пробных шагов, направления которых равновероятны, а численные значения случайны. В пробных точках вычисляются целевые функции, осуществляется сравнение значений целевых функций, полученных на пробных шагах, на основании сравнения делают рабочий шаг в сторону наименьшего значения целевой функции. По мере приближения к экстремуму рекомендуется переходить к направленному поиску, что позволяет сократить объем вычислений. Как показывает опыт расчетов, наиболее эффективно применять метод случайного поиска на значительном удалении от экстремума. [8, 9]

Оврагоперешаговый метод [24] предлагает алгоритм для нахождения шага, который позволит перешагнуть овраг, предотвращая преждевременное попадание поисковой точки на «дно» оврага и одновременно обследуя рельеф целевой функции в овражной области. [24]

При решении оптимизационной задачи методом слепого поиска [8,9] осуществляется перебор всех переменных параметров и зоне их допустимых значений и выявление таким способом экстремума функции. При этом процесс определения экстремума практически не сопровождается последовательным улучшением промежуточных результатов оптимизации. [10]

Преимуществом метода слепого поиска, безусловно, является простота: вокруг начального приближения (1.15) обозначается зона поиска, выбирается шаг изменения независимых переменных, а за тем и каждой точке зоны поиска рассчитывается целевая функция. Наименьшее значение целевой функции из рассчитанных и будет оптимальным решением.

Достоинством всех рассмотренных методов, является их способность к определению глобального экстремума функции, а основной недостаток – проведение большого объема вычислений.

Анализ первоисточников показывает, что в публикациях американских авторов Н. Ренгли и Д. Улиямса 1963 года впервые для решения задачи оптимизации было предложено использовать метод дискретного динамического программирования. [2, 5, 7, 14, 21, 25÷27] Впоследствии этот метод был развит в работах многих советских и западных ученых, особенное распространение он получил на территории США.

Условие, что затраты на топливо i -ого энергоблока зависят только от мощности этого энергоблока, и не зависят от мощности других энергоблоков, является условием разрешимости оптимизационной задачи метода Беллман.

Решение оптимизационной задачи представлено ниже:

$$C_{\text{топл}\Sigma} = C_{\text{топл}i} \sum_{i=1}^n B_{\text{топл}i} = C_{\text{топл}i} \sum_{i=1}^n f_i(P_i) \rightarrow \min \quad (1.20)$$

Метод динамических программирования сводится к решению задачи оптимизации по одной переменной P_i при условии, что к этому моменту уже известны значения функции Беллмана, которая определяется по формуле :

$$C(Y, i) = \min(f_i(P_i) + C(Y - P_i, i = 1)) \quad (1.21)$$

Сначала методом полного перебора нагрузки оптимизируется между любыми двумя энергоблоками, в результате запоминаются варианты, обеспечивающие минимальные затраты на топливо. Затем оптимизируют работу двух рассмотренных ранее энергоблоков и еще одного, при этом оптимальное распределение мощности между первым и вторым энергоблоками известно. Аналогичным образом, оптимизируют

распределение нагрузки между группой, состоящей из трех энергоблоков, для которой известно оптимальное распределение, и четвертым энергоблоком, и так далее.

При решении оптимизационной задачи методом динамического программирования необходимо :

- разбить задачу на подзадачи меньшего размера;
- найти оптимальные решения подзадач;
- использовать полученные решения подзадач для конструирования решения исходной задачи.

Методы динамического программирования позволяют решать широкий круг оптимизационных задач, при любом способе задания исходных данных. При оптимизации системы большой размерности или для длительного интервала времени необходимы большие вычислительные затраты. Невозможно непосредственно применить метод динамического программирования при решении оптимизационной задачи с учетом критерия минимизации потерь в электрической сети, т.к. потери мощности не являются сепарабельной функцией активных мощности электростанций. [25]

В последние годы большое количество публикаций посвящено применению генетического алгоритма и оптимизационных задачах электроэнергетической отрасли. Сущность метода заключается в случайном подборе, комбинировании и вариации искомым параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию. [26, 27]

Достоинством этого метода, является способность с большой вероятностью и малыми вычислительными затратами сходиться к оптимальным параметрам. Так в работе [26] авторами произведен ряд расчетов на модели смешанной энергосистемы, в составе генерации которой есть тепловые и гидростанции. Расчёты направлены на сравнение эффективности применения для решения задачи оптимальной загрузки энергоблоков различных алгоритмов. В статье проведены сравнение результатов, полученных при решении задач оптимизации для выделенной ЭЭС градиентным методом и генетическим алгоритмом, полученные результаты говорят об эффективности использования генетического алгоритма применительно к оптимизационным задачам электроэнергетики.

Однако генетический алгоритм обладает, существенным недостатком, который заключается в отсутствии гарантий того, что найденное в результате оптимизации решение есть глобальное оптимум. Для увлечения вероятности нахождения решения очень близкого к оптимальному, расчёт производят много раз, и выбирают лучший результат.

Вышеприведенные алгоритмы относятся к методам нелинейного программирования. Расходные характеристики энергоблоков могут быть представлены линейными зависимостями, либо функцией состоящей из нескольких линейных сегментов. К оптимизационной задаче применимы методы линейного программирования, из которых наибольшее распространение на сегодня получил симплекс-метод. [2, 5, 15, 28] В Германии одна из крупнейших генерирующих компаний проводит

оптимизацию режимов симплекс-методом.

Симплекс-метод применим для оптимизации линейной целевой функции многих переменных, связанных линейными ограничениями. Сначала системы ограничивающих уравнений и целевая функция приводятся к каноническому виду. Для превращения ограничений, заданных в форме неравенства, в равенства вводятся дополнительные переменные. Выбираются базисные переменные, которые выражаются через переменные, не вошедшие в базис.

На основании системы управлений, приведенной к каноническому виду, формируется симплекс-таблица. Затем путём преобразования полученной симплекс-таблицы, получают вторую симплекс-таблицу. Вторая симплекс-таблица также преобразуется и т.д., пока не будет получено оптимальное решение. Критерием достижения экстремума является неотрицательность всех коэффициентов последней строки симплекс-таблицы.

По сравнению с методами нелинейного программирования алгоритмы, в основе которых лежат методы линейного программирования, проще реализуются и затрачивают меньше времени на расчёт. В данном случае снижая точность исходных данных, снижается точность результатов.

В основном для решения многокритериальных задач, таких как минимизация затрат на производство и передачу электроэнергии в энергосистеме, применяют комбинацию нескольких описанных выше методов.

Например, в [24] используется комбинация метода Лагранжа и метода покоординатного поиска. Методом Лагранжа находят начальные приближения оптимальные распределения загрузки энергоблоков без учёта потери активной мощности в электрической сети, затем методом покоординатного поиска уточняется решение с учётом величины потерь активной мощности в электрической сети.

В работе [25] для решения задачи минимизации затрат на производство и передачу электроэнергии предлагается применение комбинированного подхода на основе метода динамического программирования. Методом Беллмана находится оптимальное распределение без учёта потерь в сети, затем по найденному распределению рассчитывается режим ЭЭС и вычисляется значение потерь активной мощности в электрической сети. Затем вновь методом Беллмана определяется оптимальное распределение, но к нагрузке энергосистемы добавляется величина потерь активной мощности, рассчитанная ранее. Далее вычисляется значение потерь активной мощности в электрической сети и так до достижения требуемой точности в исследуемом направлении.

Данный метод обладает существенным недостатком – невозможностью учета потерь активной мощности в электрической сети по рыночной стоимости. Потери в последнем комбинированном подходе учитываются в составе целевой функции (1.2).

1.3 Анализ программных комплексов по расчету оптимизации режимов работы систем электроснабжения

В настоящее время существуют программные комплексы (ПК) предназначенные для оптимизации режимов ЭЭС по критерию минимизации затрат на топливо или минимизацию потерь активной мощности в электрической сети. Переход к рыночным отношениям в электроэнергетике потребовал решения задачи централизованного планирования диспетчерского графика по ценовым зонам.

На ОРЭМ стоимость электроэнергетики формируется следующим образом: генерирующие компании подают ценовые заявки на генерацию определенной мощности, потребители заявляют требуемые объемы спроса мощности на сутки вперед. Торги представляют собой поиск равновесной цены, на основании решения оптимизационной задачи. В результате генерирующие компании, предложившие цену равную или меньшую равновесной, реализуют мощность, а остальные – нет.

Оптимизация суточных режимов ЭЭС на «рынке на сутки вперед» осуществляется по критерию минимизации топливных издержек с учетом потерь в электрической сети. При этом используются характеристики относительных приростов в стоимостном выражении (ХОПС). [29]

На базе ПК RastrWin учеными (РОО «Фонд кафедры АЭС им. Д.А. Арзамасцева» г. Екатеринбург) был разработан ПК ActOpus [30], предназначенный для актуализации к синтеза расчетной модели ЭЭС России на конкурентном рынке электроэнергии на сутки вперед. ActOpus позволял подготовить к анализировать отдельные фрагменты модели ЭЭС на уровне ОДУ, в настоящее время фрагменты могли быть синтезированы в единую модель на уровне ЦДУ. Узловые цены в модели рынка рассчитывались на основании ценовых заявок участников, с учетом технологических ограничений.

Введение «балансирующего рынка» потребовало дополнения модели ценового аукциона рынка на сутки вперед системой аукционов. Была разработана технология работы с расчетной моделью «Мегаточка», в рамках которой «точкой» называется каждый вариант модели ЭЭС, представляющий собой мгновенный срез параметров. Модель ЭЭС была условно разделена на две части – постоянную и переменную, что позволило повысить производительность ПК. Усовершенствованный ПК Vars теперь используется как на балансирующем рынке, так и на рынке на сутки вперед. [30,31]

СО БЭС использует для оптимизации режимов ЭЭС по активной мощности программное обеспечение «Vars-Lincor», при этом оптимизация может производиться как для мгновенного режима, так и для режима на определенном интервале времени. В качестве целевой функции в задаче оптимизации используется кусочно-квадратичная функция ценовой характеристики генератора от его мощности – расходная характеристика. Энергоагрегаты задаются кусочно-линейными характеристиками

относительных приростов либо ценовыми заявками, имеющими кусочно-постоянный вид. При оптимизации каждому ограничению ставится в соответствие множитель Лагранжа, чем больше будет величина множителя, тем больший вклад вносит несоблюдение этого ограничения в увеличение минимизируемой целевой функции. При оптимизации режима ЭЭС на интервале времени задаются также скоростями набора и сброса нагрузки для энергоагрегатов. [30]

Разработанный ОАО «НТЦ электроэнергетики» - ВНИИЭ программный комплекс планирования режимов ЕЭС в условиях конкурентного рынка электроэнергии и мощности «ПРЭС-СУТКИ», [29, 31, 32] также позволяют оптимизировать режим ЭЭС по критерию минимизации суммарных затрат на топливо либо критерию минимизации стоимости поставки электроэнергии, продаваемой производителями на оптовом рынке, в зависимости от способа задания энергоагрегатом. Энергоагрегаты задаются характеристиками относительных приростов к стоимостному выражению (ХОПС) или тарифными характеристиками, для энергоагрегатов ТЭЦ могут учитываться ограничения по сбросу/набору нагрузки. При оптимизации учитываются потери активной мощности в электрической сети, а также ограничения по внешним перетокам. Алгоритм оптимизаций основан на включении величин потерь в прогнозные графики электропотребления и коррекции целевой функции в процессе расчета. [32]

Программы расчета установившихся режимом АНАРЭС, КОСМОС в Б-2000 включают в себя модули оптимизации режимов ЭЭС по напряжению, реактивной мощности источников и коэффициентам трансформации трансформаторов в соответствии с критерием оптимальности – минимумом суммарных потерь активной мощности и электрической сети, при соблюдении заданных ограничений. Метод расчета оптимального режима основан на итерационном процессе в каждом цикле которого производится расчет установившегося режима методом Ньютона. [33]

Германский программный комплекс DigSILENT Power Factory [34] позволяет решать задачу оптимального распределения нагрузки между энергоблоками или электростанциями с помощью метода внутренней точки, который относится к методам линейного программирования. При оптимизации режима ЭЭС алгоритмом на основе метода внутренней точки задаются начальным приближением, после чего осуществляется поиск оптимального решения вдоль траекторий в пространстве переменных задачи, не проходящих через вершины многогранника (в отличие от симплекс-алгоритма). При этом ограничения учитываются в оптимизационной задаче с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа и метода штрафных функций.

Программный комплекс PSS/E [35], разработанный фирмой Siemens также имеет модуль для экономически выгодного распределения нагрузок между энергоблоками или электростанциями.

Проблема составления графика загрузки энергоагрегатов является более сложной, наряду с вопросом выбора оптимального состава

работающих агрегатов, она включает в себя задачу экономического распределения загрузки энергоблоков. Данную проблему решают для некоторого временного интервала, на сутки вперед, или больший период. Для задачи оптимального распределения нагрузки между работающими энергоблоками критерий времени расчета с учетом современного уровня развития техники не является принципиальным, но при решении проблемы составления графика загрузки энергоагрегатов на неделю вперед, время расчета может стать критичным фактором.

К задаче составления графиков загрузки энергоагрегатов можно применять разные подходы. Наибольшее распространение получил алгоритм, основанный на сравнении локальных экстремумов. [1, 3, 4, 19] Изначально проводится расчет экономического распределения нагрузки между работающими энергоблоками при условии, что все энергоагрегаты находятся в работе, за тем полагают, что некоторый энергоагрегат остановлен, анализируют выгодность останова и последующего пуска энергоагрегата, до тех пор пока не будут проанализированы все возможные к останову энергоблоки. Вычисляется часовая экономия от останова энергоагрегата и принимается решение об останове того или иного электроагрегата. Продолжительность останова определяется моментом возрастания нагрузки до значения, при котором энергоагрегат был остановлен.

После останова одного агрегата вновь проводятся расчеты экономического распределения нагрузки между работающими энергоблоками при последовательном отключении одного из оставшихся в работе блоков. Останавливается второй агрегат, дающий наибольшую удельную экономию и т.д. до тех пор, пока дальнейшей останов агрегатов не окажется экономически нецелесообразным, либо недопустим по техническим условиям. Данный подход прост. Недостатком алгоритма является то, что анализируется пуск-останов отдельных агрегатов, а не их совокупность.

В [36] предлагается заранее определить допустимые сочетания работающих энергоагрегатов электростанций. Начальным приближением для данного алгоритма служит оптимальный состав включенных энергоагрегатов за предыдущие сутки. Далее из числа возможных находят оптимальный состав работающих энергоблоков и проводят расчет экономического распределения нагрузки между работающими энергоблоками. Основным недостатком алгоритма является сложность учета стоимости потерь в электрической сети.

Метод Лагранжа нашел применение при решении задач составления графиков загрузки энергоагрегатов, алгоритм оптимизаций сводится к построению обобщенной характеристики относительных приростов, различные отрезки которой соответствуют разным составом работающих энергоагрегатов. [1, 2, 37÷39] В [37] обосновывается признак выгодности работы i -го агрегата, при составлении графики загрузки электростанций, которой соответствует определенный множитель Лагранжа λ . Если:

$$\lambda > C_i(P_{i0}). \quad (1.22)$$

где P_{i0} - мощность, при которой удельный расход топлива i -го агрегата равен его относительному приросту, то выгодно i -ый энергоагрегат работал.

При условии:

$$\lambda < C_i(P_{i0}). \quad (1.23)$$

выгодно, чтобы агрегат был отключен.

Исследования в направлении приложения данного метода к задаче оптимального состава работающих агрегатов продолжаются в настоящее время. В работе [65] предложен алгоритм оптимизаций на основе кусочно-линейной аппроксимаций обобщенных расходных характеристик.

Достоинством представленного подхода является быстрота нахождения результата. К недостаткам относится большая доля погрешности и затруднительность учета потерь в электрической сети.

Задачу составления графиков загрузки энергоагрегатов можно решать методом динамического программирования. [2, 37] Начальное приближение рассчитывается без учета пусковых расходов топлива, затем просчитывается целесообразность простоя самого мощного агрегата, такой же расчет проводится для следующего по номинальной мощности агрегата и т.д. Найденный состав агрегатов фиксируется. На каждой итерации определяется суммарный расход топлива в энергосистеме с учетом пусковых расходов. Решение считается найденным, если величина затрат на последней итерации мало отличается от затрат на предыдущей итерации.

Плюсом метода динамического программирования является возможность работы с расходными характеристиками любого вида (прерывающимися, выпуклыми, вогнутыми). Затруднение представляет учет потерь в электрической сети.

Для определения оптимального состава включенных энергоблоков применим метод ветвей и границ [5, 40], который является, по существу, вариацией полного перебора с отсевом подмножеств допустимых решений, заведомо не содержащих оптимума.

Составляется дерево решений, исходная вершина которого отвечает множеству всех приемлемых решений. Из исходной вершины начинается ветвление на подмножества, например, образуется две ветки: левой ветви соответствует включенное состояние первого энергоблока, а правой – отключенное, все остальные энергоблоки в обеих вершинах включены. Потому же принципу вводится дальнейшее ветвление – две ветви соответствуют двум состояниям энергоблоков (0 и 1) – (отключив и отключен). Конечная вершина дерева отвечает только одному решению.

Для каждой вершины определяется нижняя граница минимизируемой функции $C_{\Sigma}^{(0)}$, а для конечной вершины – точное значение минимизируемой целевой функции C_{Σ} , которая определяется в соответствии с необходимым выражением.

Если в процессе ветвления будет получена висячая вершина, для

которой

$$C_{\Sigma}^{(n)} > C_{\Sigma}^{(0)}, \quad (1.24)$$

где $C_{\Sigma}^{(0)}$ – оптимальное значение целевой функции для одной из полученных ранее конечных вершин [5], то все подмножество решений, соответствующее этой вершине, отбрасываются.

Эффективность подхода для составления графика загрузки энергоблоков проиллюстрирована в работе [40] на примере системы, состоящей из 10 энергоагрегатов на 24 часа, а также системы из 20 энергоблоков на 36 часов вперед. Основным преимуществом метода является его способность определить глобальный экстремум.

В исследованиях [41] для решения задачи выбора оптимального состава работающих агрегатов используется генетический алгоритм. При решении оптимизационной задачи генетический алгоритм использует механизмы, напоминающие биологическую эволюцию, в ходе решения комбинируются, подбираются и варьируются искомые параметры, образуя «популяцию» решений.

1.4 Обзор научных публикаций по оптимизации режимов работ электроснабжения

Достоинством метода, является способность с большой вероятностью и малыми вычислительными затратами сходится к оптимуму, а недостатком – отсутствие гарантии нахождения достаточно близкого к оптимуму решения.

Большой вклад в решение различных аспектов задач оптимизации режимов работы СЭС путем использования статических характеристик нагрузки и потерь мощности, обеспечения статической устойчивости работы двигательной нагрузки систем электроснабжения предприятий внесли ученые: П.С. Жданов, В.А. Веников, И.А. Сыромятников, И.М. Постников, Б.Г. Меньшов, С.И. Гамазин, М.Л. Левинштейн, С.В. Смоловик, Е.И. Ушаков, Е.А. Конюхова, Ю.С. Железко и др. [64, 70, 71, 76 ÷ 78, 82 ÷ 84, 98, 99]

Проблема расчета потерь электроэнергии волнует энергетиков давно. В настоящее время выпускается мало книг по данной теме, вследствие того, что мало изменилось в принципиальном устройстве сетей. Но при этом выпускается достаточно большое количество статей, где производится уточнение старых данных и предлагаются новые решения проблем, связанных с расчетом, нормированием и снижением потерь электроэнергии.

Одной из последних работ, выпущенных по данной исследуемой теме, является книга авторов. [80] Наиболее полно представлена структура потерь электроэнергии, методы анализа потерь и выбор мероприятий по снижению потерь мощности и нагрузки в ЭЭС. В работе обоснованы методы нормирования потерь. Подробно описано программное обеспечение, реализующее методы расчета потерь.

Данным автором была выпущена книга [76], где наибольшее внимание было уделено методам расчета потерь электроэнергии в различных сетях и обоснованию применения того или иного метода в зависимости от типа сети и приведены мероприятия по снижению потерь электроэнергии.

В книге авторов [63] подробно рассмотрели проблемы электроснабжения в целом, с упором на распределительные сети, питающие сельскохозяйственные предприятия и населенные пункты. Даны рекомендации по организации контроля за потреблением электроэнергии и совершенствованию систем учета на промышленных объектах.

Авторы в книге [68] рассмотрели подробно общие вопросы, относящиеся к снижению потерь электроэнергии в сетях: методы расчета и прогнозирования потерь в сетях, анализ структуры потерь и расчет их технико-экономической эффективности, планирование потерь и мероприятий по их снижению.

В статье [59] подробно описана программа для расчета технических потерь электроэнергии РТП 3.1. Достоинством которой, является простота в использовании и удобный для анализа вывод конечных результатов, сокращение трудозатрат персонала на проведение расчетов.

Статья [79] посвящена актуальной проблеме нормирования потерь электроэнергии, где автор делает упор на целенаправленное снижение потерь до экономически обоснованного уровня, которую не обеспечивает существующая практика нормирования. В работе предлагается использовать нормативные характеристики потерь, разработанные на основе детальных схемотехнических расчетов сетей всех классов напряжений и расчет производить при использовании программного обеспечения.

Целью другой статьи [78] не является уточнение методики определения погрешностей конкретных измерительных приборов на основе проверки их параметров. Автором в статье проведена оценка результирующих погрешностей системы учета поступления и отпуска электроэнергии из сети энергоснабжающей организации, включающей в себя сотни и тысячи приборов. Особое внимание уделено систематической погрешности, оказывающаяся существенной составляющей структуры потерь.

В статье работы [72] уделено внимание актуальной проблеме качества электроэнергии, что оказывает существенное влияние на потери электроэнергии в сетях.

Работа [69] посвящена уточнению существующих методов расчета потерь электроэнергии, нормированию потерь в современных условиях, а также новым методам снижения потерь.

В статье [9] делается упор на получение достоверной информации о параметрах работы элементов сетевого хозяйства, и прежде всего о загрузке силовых трансформаторов.

Несмотря на значительное число работ в этой области [62÷69, 73, 74, 85, 87, 88, 90÷92, 94÷97, 100÷109], методы моделирования и оптимизации цеховых систем электроснабжения, алгоритмов расчета характеристик АДК и СД, статических характеристик нагрузок и потерь мощности применительно

к расчету нормальных режимов работы крупных СЭС и их практическая реализация еще не получили должного развития. Большинство существующих алгоритмов упрощенно представляют сложную по структуре и конфигурации схему цеховых сетей, эквивалентизируют большую часть нагрузки на напряжении 380 В, не в полной мере учитывают изменения параметров схемы замещения АДК и СД. [75, 81, 86, 88, 93]

1.5 Выводы по главе

На основе анализа работ по исследуемой теме необходимо отметить следующее.

1. В разделе показаны ее основные задачи и изучены вопросы оптимизации установившихся режимов ЭСС.
2. Проведен анализ методов решения задач оптимизации режимов работы систем электроснабжения по статическим характеристикам потерь мощности и нагрузки.
3. Проведенный анализ взаимодействия энергокомпаний с предприятиями в современных условиях подтверждает актуальность задачи оптимизации режима ЭЭС по критерию минимизации издержек энергокомпаний с учетом стоимости потерь в электрической сети.
4. В разделе приведён анализ методов дискретного динамического программирования, приведены этапы и круг решаемых задач.
5. Изучены возможность симплекс – метода, который применим для оптимизации линейной целевой функции многих переменных, связанных линейными ограничениями.
6. Обзор методов оптимизации показал, что при решении оптимизационных задач в вертикально – интегрированных системах, без учета потерь в электрической сети, наибольшее распространение получил метод равенства относительных приростов, однако при оптимизации установившихся режимов ЭЭС с учетом потерь в электрической сети, с применением метода относительных приростов, требуется введение большого числа допущений, что вызывает определенные затруднения.
7. Применение метода покоординатного поиска при решении задачи наивыгоднейшего распределения нагрузки между включенными энергоблоками с учетом стоимости потерь в электрической сети снимает необходимость определения характеристик относительных приростов потерь активной мощности в электрической сети и введения дополнительных допущений и упрощений, однако требуется большой объем вычислений, метод неэффективен при минимизации многокритериальной целевой функции.
8. При выборе оптимального состава работающих энергоблоков эффективно применение метода ветвей и границ, основным преимуществом которого является способность к достижению

глобального экстремума и сокращение вычислений по сравнению с методом полного перебора.

9. Задача оптимальной загрузки энергоагрегатов и выбор оптимального состава работающих энергоагрегатов является комплексной задачей, для решения которой необходимо разработать методику оптимизации режима работы электростанций обеспечивающую составление графиков загрузки энергоагрегатов с учетом потерь электроэнергии в электрической сети по их рыночной стоимости.
10. Обзор публикаций показывает, что необходимо провести исследование с целью разработки методики оптимизации установившихся режимов ЭЭС с учетом стоимости потерь в электрической сети, в условиях рыночных отношений в Республике Казахстан.

2. Моделирование системы электроснабжения и установившихся режимов работы

Система промышленного электроснабжения (СПЭ) состоит из следующих основных частей:

- сети внешнего электроснабжения, которая служит для подключения к электрической системе и передачи электроэнергии промышленному предприятию;
- сети внутреннего электроснабжения, предназначенной для распределения электроэнергии потребителям;
- потребителей электроэнергии, большая часть из которых — электрические двигатели.

Переходные процессы в СПЭ определяются в основном процессами в электрических двигателях и их взаимным влиянием друг на друга. При этом моделирование переходных процессов в СПЭ должно быть комплексным и не только включать в себя модели отдельных частей и элементов, но и отражать их взаимосвязь.

2.1. Моделирование структуры, конфигурации и состояния системы промышленного электроснабжения

Математическая модель (система промышленного электроснабжения) СПЭ должна отражать основные структурные и иерархические связи, динамические переходы из одного состояния в другое, которая должна базироваться на следующих принципах системного подхода.

1. Модель должна идентифицировать СПЭ любой структуры по количеству и типу элементов представляющую любую конфигурацию находящаяся в любом состоянии положения выключателей.

2. Исходные данные о СПЭ должны в максимальной степени базироваться на каталожных данных элементов, позволяющие создать и эффективно использовать банк данных.

3. Модель должна отражать любой из реальных случаев нарушения системы электроснабжения, работу релейной защиты, устройств противоаварийной автоматики и систем автоматического управления режимами системы электроснабжения.

Элементами СПЭ являются: элементы электрической сети, силовые выключатели, электродвигательная и прочая нагрузка (рисунок 2.1).

Электрическая система — элемент, характеризующий свойства обобщенного источника электрической энергии относительно места присоединения данной СПЭ. Суммарная мощность генераторов электрических станций несоизмеримо больше мощности нагрузки СПЭ. Исходными данными для расчета параметров схемы замещения могут служить номинальное напряжение электрической сети в точке подключения СПЭ U_{Nc} и ток КЗ от электрической системы в этой точке I_{Kc} .

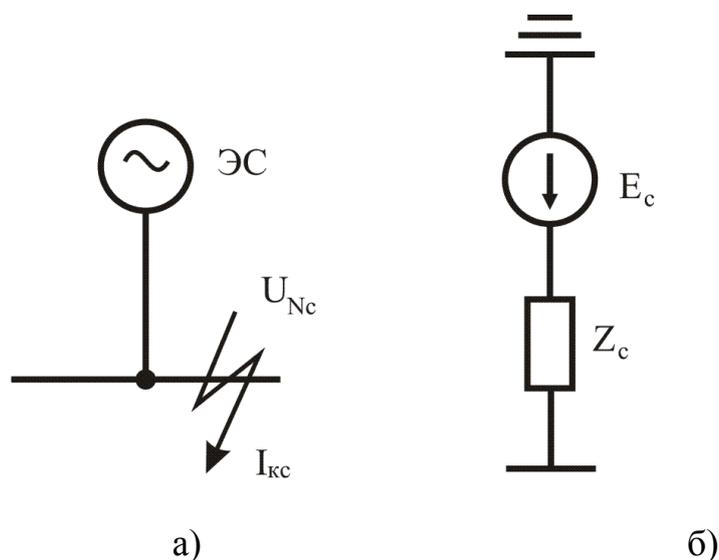


Рисунок 2.1 – Электрическая система (а) и ее схема замещения (б)

Элементы электрической сети — линии электропередачи (воздушные, кабельные, токопроводы), трансформаторы (двухобмоточные, трехобмоточные, с расщепленной обмоткой), реакторы (одинарные, сдвоенные) — представляются схемами замещения в виде электрических цепей с одним (рисунок 2.2, а) или тремя (рисунок 2.2, б) сосредоточенными комплексными сопротивлениями.

Схемы замещения получены на основе следующего допущения: не учитываются проводимости элементов электрической сети и свободные составляющие электромагнитных переходных процессов в элементах. Параметры схемы замещения определяются через каталожные данные элементов электрических сетей.

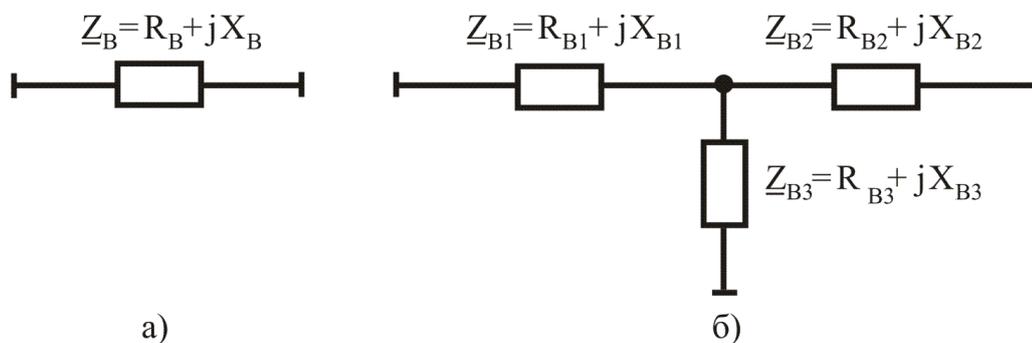
Силовые выключатели — являются особыми элементами системы электроснабжения, имеющие два состояния: включено, отключено. С помощью выключателей осуществляются пересоединения в электрических сетях: отключение поврежденных элементов релейной защитой, переключения, связанные с работой противоаварийной автоматики (АПВ, АВР и др.) и с работой системы автоматического управления режимами системы электроснабжения.

Схема замещения СПЭ до потребителей электрической энергии (включая электрическую систему) представляют совокупность схем замещения отдельных элементов и выключателей. Элементами схемы замещения являются ветви с комплексными сопротивлениями:

$$Z_B = R_B + jx_B \left(Z_B = \sqrt{R_B^2 + x_B^2} > 0 \right). \quad (2.1)$$

выключатели;

узлы (места соединения двух и более ветвей, ветви с выключателем или ветви с нагрузкой).



а — ЛЭП, двухобмоточный трансформатор, реактор;
 б — трансформаторы с расщепленной обмоткой и трехобмоточные, сдвоенные реакторы

Рисунок 2.2 – Схемы замещения элементов электрической сети

Введем обозначения: общее число ветвей — n_B ; число выключателей — n_{BK} ; число узлов — n_U .

Все узлы, выключатели и ветви пронумеруем произвольными целыми числами. Узлу, соответствующему ЭДС электрической системы E_c (см. Рисунок 2.1, б) присваивается нулевой номер, остальным — номера от 1 до n_U . В произвольном порядке нумеруются выключатели (числами от 1 до n_{BK}) и ветви (числами от 1 до n_B). Ветви, принадлежащие одному элементу (Рисунок 2.2, б), нумеруются последовательно.

Ветвям схемы замещения задается направление, совпадающее с направлением передачи по ним активной мощности в нормальном режиме. В соответствии с направлением для каждой ветви можно определить начальные и конечные узлы.

Определим следующие целочисленные массивы размерностью n_B для ветвей схемы замещения системы электроснабжения:

массив начальных узлов JN ;

массив конечных узлов JK

массив типов элементов электрической сети JE .

Тип элементов задается заранее выбранными целыми числами, например: $JE=1$ – электрическая система; $JE= 2 (3; 4)$ – трансформаторы двухобмоточные (с расщепленной обмоткой; трехобмоточные); $JE = 5 (6)$ - реакторы одинарные (сдвоенные); $JE = 7 (8; 9)$ — линии электропередачи кабельные (токопроводы; воздушные).

Кроме этого определим следующие целочисленные массивы размерностью n_{BK} для выключателей в схеме замещения системы электроснабжения:

массивы $JB1$ и $JB2$ узлов, ограничивающих выключатели;

массив состояний выключателей $JCBK$;

массив функциональных признаков выключателей в электрической сети $JEVK$.

В схеме замещения любой из выключателей ограничен двумя узлами, один из которых войдет в массив $JB1$, а другой — в массив $JB2$. Состояние

выключателя идентифицируется заранее выбранными целыми числами, например $JCBK = 0$ — отключено; $JCBK = 1$ — включено. Функциональный признак также определяется целыми числами: $JEBK = 0$ — линейный или вводной выключатель; $JEBK = 1$ — секционный.

Следовательно, любая конфигурация электрической сети СПЭ может быть описана массивами JN , JK , $LB1$, $JB2$; типы элементов электрической сети и признаки выключателей однозначно определяются массивом JE и $JEBK$ состояние электрической сети — массивом $JCBK$, т.е. перечисленные целочисленные массивы могут быть использованы для аналитического задания исходных данных о конфигурации, типах элементов и состоянии электрической сети СПЭ.

Кроме того, массив JE одновременно может служить указателем того, какие исходные данные нужно вводить для данного элемента электрической сети и по каким формулам рассчитывать параметры схемы замещения. В результате может быть составлена столбцовая матрица Z_B комплексных сопротивлений ветвей схемы замещения СПЭ.

Узлы общей схемы замещения можно разделить на следующие группы узлов:

- промышленной комплексной нагрузки;
- соответствующие выводам синхронных двигателей;
- соответствующие выводам асинхронных двигателей;
- прочие узлы.

Узел промышленной комплексной нагрузки отражает секцию распределительного устройства (РУ), к которой подключено произвольное число СД, АД и прочая электрическая нагрузка, учитываемая по статическим характеристикам активной и реактивной мощности в зависимости от напряжения в узле:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{пр}} &= P_{\text{прN}} U_y^{\gamma_p}; \\ Q_{\text{пр}} &= Q_{\text{прN}} U_y^{\gamma_Q}. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

где $P_{\text{прN}}$ и $Q_{\text{прN}}$ — активная и реактивная мощности при номинальном напряжении в узле нагрузки ($U_y = U_{yN}$); γ_p и γ_Q — показатели степени, характеризующие зависимость активной и реактивной мощности от напряжения.

Общая схема замещения узла промышленной комплексной нагрузки приведена на рисунке 2.3: к i -му узлу подключено n_i синхронных двигателей, m_i асинхронных двигателей и прочая нагрузка $S_{\text{пр}i} = P_{\text{пр}i} + jQ_{\text{пр}i}$, определяемая статическими характеристиками. Сопротивления $Z_{\text{вСД}}$, $Z_{\text{вАД}}$ равны сумме сопротивлений элементов электрической сети, расположенных между секцией РУ и выводами синхронного и соответственно асинхронного двигателей.

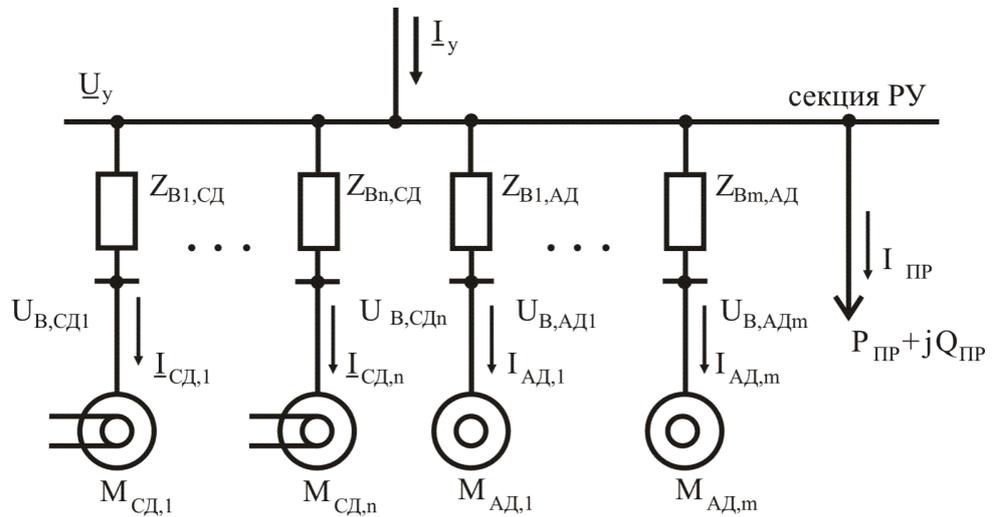


Рисунок 2.3 – Расчетная схема узла промышленной нагрузки

Обозначим общее число узлов промышленной комплексной нагрузки в схеме замещения n_c , число СД в системе электроснабжения — n_{CD} , число АД в системе электроснабжения n_{AD} . Соответственно пронумеруем узлы промышленной комплексной нагрузки от 1 до n_c . Узлы, соответствующие выводам СД, — от 1 до n_{CD} . Узлы, соответствующие выводам АД, — от 1 до n_{AD} .

Для узлов схемы замещения СПЭ определим следующие целочисленные массивы:

массив $J_{СК}$ размерностью n_c номеров узлов промышленной комплексной нагрузки;

массив $J_{СД}$ размерностью n_{CD} номеров узлов, соответствующих выводам СД;

массив $J_{АД}$ размерностью n_{AD} номеров узлов, соответствующих выводам АД.

Эти массивы однозначно определяют структуру узлов в схеме замещения СПЭ.

Массивы, характеризующие структуру узлов схемы замещения, совместно с массивами, характеризующими конфигурацию, типы элементов и состояние электрической сети позволяют определить принадлежность СД и АД к узлам промышленной комплексной нагрузки и вычислить обобщенные параметры электрической сети. К последним относятся:

матрицы $Z_{ВСД}(Z_{ВАД})$ комплексных сопротивлений между выводами СД (АД) и узлами промышленной нагрузки, к которым они подключены;

матрица Z_y собственных и взаимных узловых сопротивлений относительно узлов промышленной комплексной нагрузки.

Электрические сети СПЭ — разомкнутые, что существенно упрощает расчет узловых сопротивлений Z_y . Достоинством способа отображения схемы замещения электрической сети СПЭ пассивными обобщенными параметрами является компактность отображения матриц $Z_{ВСД}$, $Z_{ВАД}$ и Z_y в виде $(n_c^2 + n_{CD} + n_{AD})$ компактных чисел, обусловленная тем, что узлов

нагрузки в СПЭ существенно меньше, чем общее число узлов в схеме замещения.

Наличие отдельных замкнутых контуров в СПЭ, возникающих, например, при параллельной работе трансформаторов, незначительно усложняет алгоритм расчета обобщенных параметров. Матрица узловых сопротивлений в этом случае может быть определена из матрицы сопротивлений для разомкнутой сети методом наращивания ветвей.

2.2. Моделирование режимов системы промышленного электроснабжения

Качество моделирования СПЭ в значительной степени определяется способом моделирования режимов. Расчеты режима составляют существенную долю общего времени расчетов переходных процессов, поскольку осуществляются несколько раз на каждом шаге интегрирования. За счет работы релейной защиты и устройств автоматики в СПЭ происходят многократные изменения в схеме, приводящие к существенным изменениям режимов (нормальный режим, короткие замыкания, отключения, восстановление электроснабжения). Способ моделирования режимов должен позволять отображать все многообразие возможных состояний СПЭ при оптимальных затратах машинного времени и ресурсов ЭВМ на расчеты.

Обобщенные параметры режима для разных иерархических уровней системы промышленного электроснабжения. Для упрощения и оптимизации расчетов режимов в СПЭ целесообразно выделить три иерархических уровня:

первый — от ЭДС электрической системы до узлов промышленной нагрузки;

второй — от узлов промышленной нагрузки до выводов двигателей;

третий — двигатели нагрузки.

Структурная схема первого иерархического уровня СПЭ представлена на Рисунок 2.4. Параметры режима СПЭ на данном уровне определяются уравнением

$$U_y = E_c - Z_y I_y, \quad (2.3)$$

где $U_y(I_y)$ — матрицы узловых напряжений (токов), соответствующих секциям РУ в СПЭ;

Z_y — матрица узловых сопротивлений.

Входными параметрами первого уровня являются узловые токи I_y , которые отражают влияние второго и третьего уровней, выходными — узловые напряжения U_y характеризующие влияние первого уровня на остальные.

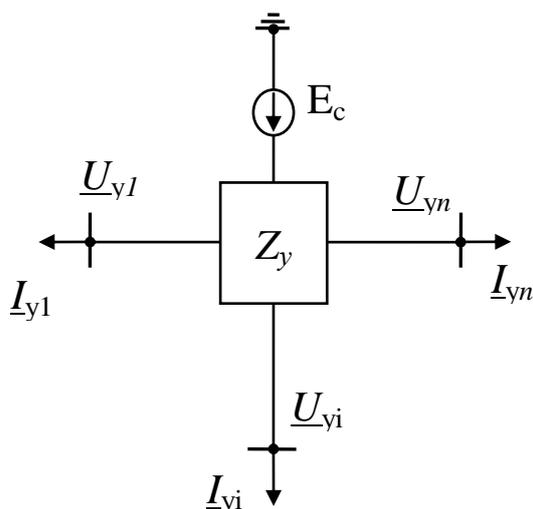


Рисунок 2.4 – Структурная схема первого уровня СПЭ

Для второго иерархического уровня СПЭ (рисунок 2.3) можно записать следующие уравнения:

$$U_{ВД} = U_y - Z_{ВД} I_{Д}; \quad (2.4)$$

$$I_{Д} = I_{пр} - M_{Д} I_{Д}, \quad (2.5)$$

где $U_{ВД}$ — матрица напряжений на выводах двигателей;

$Z_{ВД}$ — матрица сопротивлений элементов электрической сети в цепи от узла нагрузки до выводов двигателей;

$M_{Д}$ — матрица подключения двигателей к узлам нагрузки;

$I_{Д}$ — матрица токов двигателей.

Входными параметрами второго уровня по отношению к первому являются узловые напряжения U_y , по отношению к третьему — токи двигателей $I_{Д}$. Выходными параметрами второго уровня по отношению к первому будут узловые токи I_y , по отношению к третьему — напряжения на выводах двигателей $U_{ВД}$.

На третьем иерархическом уровне СПЭ параметры режима определяются системой уравнений электромеханических и электромагнитных переходных процессов. При этом входными параметрами для СД будут напряжения на выводах двигателя $U_{вСД}$ и обмотке возбуждения U_f и момент сопротивления механизма $M_{мех}$, а для АД — напряжение на выводах двигателя $U_{вАД}$ и момент сопротивления механизма $M_{мех}$. Выходными параметрами СД и АД, через которые проявляется влияние двигателей на режим остальных уровней СПЭ, являются токи двигателей $I_{СД}$ и $I_{АД}$.

Для оптимизации расчетов режима системы СД может быть представлен схемой замещения (рисунок 2.5), содержащей ветвь с комплексным сопротивлением.

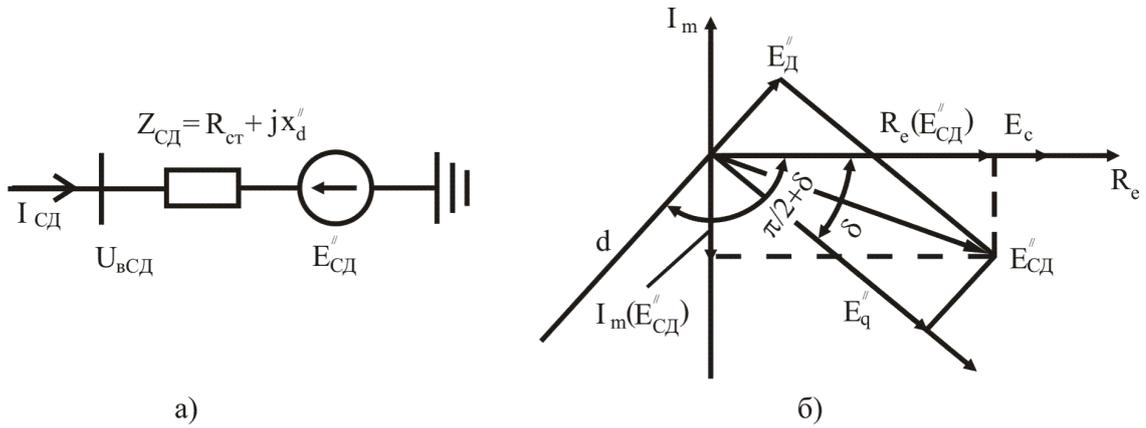


Рисунок 2.5 – Схема замещения (а) и векторная диаграмма режима (б) СД в СПЭ

$$Z_{\text{СД}} = R_{\text{СТ}} + jx_d'' \quad (2.6)$$

и ЭДС

$$E''_{\text{СД}} = (E''_д + jE''_q) e^{-j(\frac{\pi}{2} + \delta)}, \quad (2.7)$$

где $R_{\text{СТ}}$ — активное сопротивление статорной обмотки; x_d'' — сверхпереходное сопротивление по продольной оси; E''_q — сверхпереходная ЭДС по поперечной оси; $E''_д$ — эквивалентная сверхпереходная ЭДС по продольной оси, связанная с ЭДС $E''_д$ следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} E''_д &= E''_д - I_q(x_d'' - x_q''); \\ E''_д &= E''_д \frac{x_d''}{x_q''} - U_d \left(1 - \frac{x_d''}{x_q''}\right). \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

В единой для СПЭ синхронной комплексной системе координат Re , Im , действительная ось которой совпадает с вектором ЭДС электрической системы E_c (рисунок 2.5, б), составляющие ЭДС $E''_{\text{СД}}$:

$$\text{Re}(E''_{\text{СД}}) = E''_д \sin\delta + E''_q \cos\delta; \quad (2.9)$$

$$\text{Im}(E''_{\text{СД}}) = E''_д \cos\delta + E''_q \sin\delta. \quad (2.10)$$

где δ — угол, характеризующий положение поперечной оси q ротора СД в синхронной системе координат.

Параметры E''_q , $E''_д$, δ — основные в математической модели СД основанной на упрощенных уравнениях Парка—Горева, т.е. определяются уравнениями электромагнитных и электромеханических переходных процессов в СД. Эти параметры обладают свойством непрерывности, т.е. сохраняют свои значения в моменты изменения режима. Поскольку

несимметрия сверхпереходных параметров СД x_d'' и x_q'' невелика ($x_d'' = 1,1x_q''$), ЭДС $E_{СД}''$ также обладает свойством непрерывности.

В математической модели СД, основанной на полных уравнениях Парка—Горева, ЭДС E_d'' и E_q'' можно выразить через основные параметры режима соотношениями:

$$E_d'' = -\psi_q'' + \frac{d\psi_d''}{dt}; \quad (2.11)$$

$$E_q'' = \psi_d'' + \frac{d\psi_q''}{dt}. \quad (2.12)$$

Ток статорной обмотки СД, согласно схемам замещения узла нагрузки (рисунок 2.3) и СД (рисунок 2.5, а), может быть вычислен по формуле

$$I_{СД} = \frac{U_y - E_{СД}''}{Z_{вСД} + Z_{СД}}. \quad (2.13)$$

Представление СД на третьем иерархическом уровне схемой замещения (рисунок 2.5, а) имеет ряд достоинств:

параметры модели определяются параметрами сверхпереходных схем замещения СД, которые рассчитываются на каждом шаге интегрирования дифференциальных уравнений переходных процессов (модель хорошо согласуется с уравнениями Парка—Горева);

при итерационных расчетах режима СПЭ $E_{СД}''$ остается практически постоянной, что стабилизирует и существенно ускоряет процесс сходимости решения;

ЭДС $E_{СД}''$ обладает свойством непрерывности, что существенно ускоряет процесс сходимости решения при расчетах режима СПЭ после его внезапного изменения.

Схема замещения АД по отношению к остальным уровням СПЭ (рисунок 2.6) содержит ветвь с комплексным сопротивлением

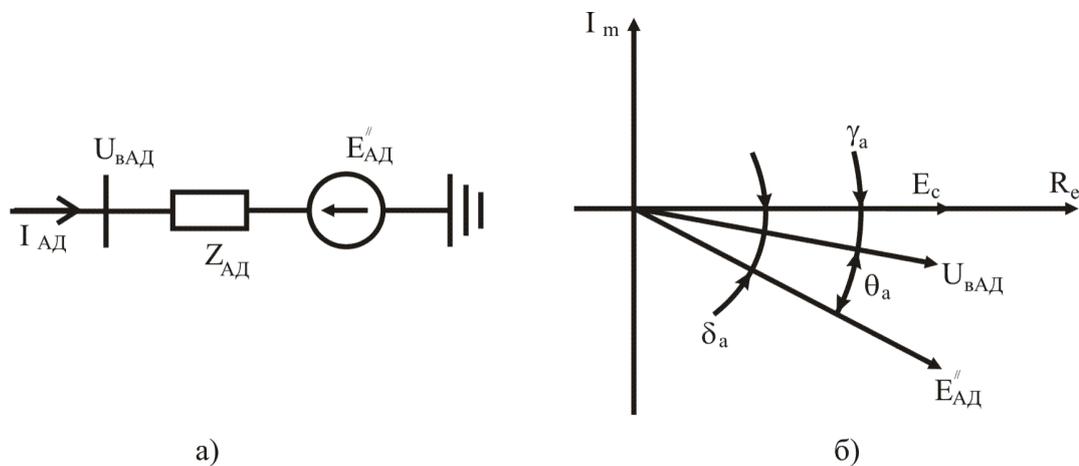


Рисунок 2.6 – Схема замещения (а) и векторная диаграмма режима (б)

АД

$$Z_{АД} = R_{СТА} + jx_a'' . \quad (2.14)$$

и ЭДС

$$E_{АД}'' = E_a'' (\cos\delta_a + j\sin\delta_a) = E_a'' e^{-j\delta_a} , \quad (2.15)$$

где $R_{СТА}$ — активное сопротивление статорной обмотки;
 x_a'' — сверхпереходное индуктивное сопротивление;
 E_a'' — сверхпереходная ЭДС;
 δ_a — угол, характеризующий положение вектора $E_{АД}''$ относительно действительной оси синхронной системы координат.

В соответствии с векторной диаграммой (рисунок 2.6, б) запишем

$$\delta_a = \gamma_a + \theta_a , \quad (2.16)$$

где γ_a — фаза вектора $U_{в АД}$ относительно действительной оси;

θ_a — угол между векторами $E_{АД}''$ и $U_{в АД}$.

В установившемся режиме АД

$$\theta_a = \arctg(T_{2a}' s_a) . \quad (2.17)$$

Для математической модели АД, основанной на упрощенных уравнениях Парка—Горева, параметры E_a'' и s_a являются основными параметрами режима.

Эти параметры обладают свойством непрерывности, поэтому $E_{АД}''$ обладает этим свойством.

Ток статорной обмотки АД, согласно схемам замещения узла нагрузки (рисунок 2.3) и АД (рисунок 2.6), может быть вычислен по следующей формуле

$$I_{АД} = \frac{U_y - E_{АД}''}{Z_{в АД} + Z_{АД}} . \quad (2.18)$$

Представление АД схемой замещения (см. рисунок 2.6) при расчетах режима СПЭ имеет те же преимущества, которые отмечались для представления СД схемой замещения (Рисунок 2.5). Главное из них в том, что при итерационных расчетах режима СПЭ $E_{АД}''$ остается постоянной, что стабилизирует и ускоряет процесс сходимости решения.

С учетом предлагаемых схем замещения СД и АД (Рисунок 2.5, 2.6) узел промышленной комплексной нагрузки (Рисунок 2.7, а) может быть представлен эквивалентной схемой замещения, содержащей ветвь с эквивалентной узловой проводимостью $Y_{эу}$ и эквивалентной ЭДС $E_{эу}$ (рисунок 2.7, б).

В общем случае к узлу нагрузки может быть подключено n СД, m АД и

прочая нагрузка. Эквивалентная проводимость ветви относительно узла нагрузки:

$$Y_{CD} = 1/(Z_{BCD} + Z_{CD}) ; \quad (2.19)$$

$$Y_{AD} = 1/(Z_{BAD} + Z_{AD}). \quad (2.20)$$

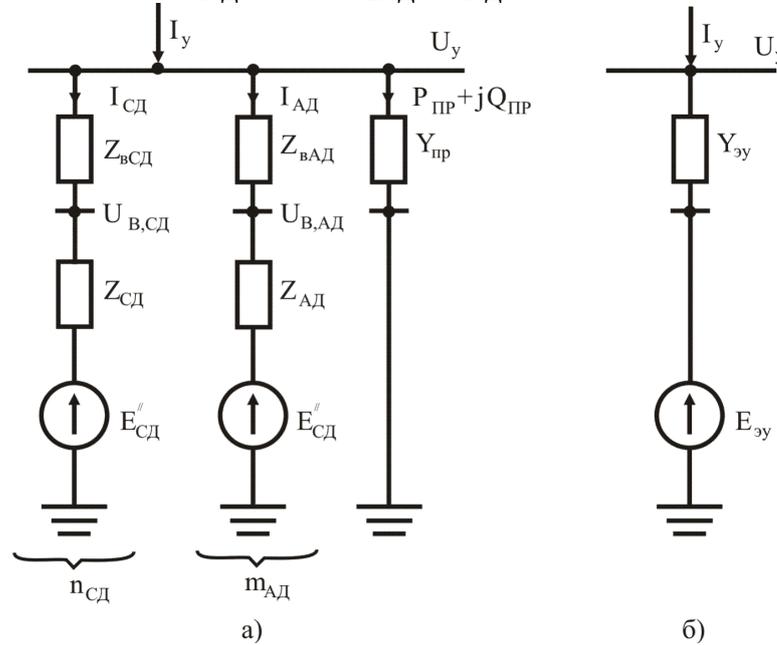


Рисунок 2.7 – Исходная (а) и эквивалентная (б) схемы замещения узла промышленной комплексной нагрузки

Прочая нагрузка узла может быть представлена ветвью с комплексной проводимостью

$$Y_{пр} = \frac{\hat{S}_{пр}}{|U_y|^2} = P_{прN} U_y^{(\gamma_p - 2)} - jQ_{прN} U_y^{(\gamma_Q - 2)}. \quad (2.21)$$

Следовательно, параметры эквивалентной схемы замещения узла промышленной комплексной нагрузки (рисунок 2.7, б) определяются выражениями:

$$Y_{эy} = \sum Y_{CD} + \sum Y_{AD} + Y_{пр}; \quad (2.22)$$

$$E_{эy} = \frac{\sum E''_{CD} Y_{CD} + \sum E''_{AD} Y_{AD}}{Y_{эy}}, \quad (2.23)$$

в которых суммирование осуществляется по всем СД и АД, подключенным к узлу. Узловой ток в соответствии с эквивалентной схемой замещения узла нагрузки

$$I_y = (U_y - E_{эy}) Y_{эy}. \quad (2.24)$$

Оценивая предлагаемую эквивалентную схему замещения узла промышленной комплексной нагрузки следует отметить следующие преимущества:

параметры эквивалентной схемы замещения узла относительно просто выражаются через параметры схем замещения подключенных к узлу АД и СД;

эквивалентные параметры $E_{\text{эу}}$ и $Y_{\text{эу}}$ практически остаются постоянными, что стабилизирует и ускоряет итерационный процесс расчета режима СПЭ;

при внезапных изменениях режима СПЭ параметры эквивалентной схемы замещения остаются практически постоянными, что существенно ускоряет процесс сходимости итерационных расчетов.

Оптимизация расчета режимов. Параметры режима СПЭ на каждом шаге интегрирования дифференциальных уравнений переходных процессов определяются системой нелинейных алгебраических уравнений, основным методом решения которой является метод последовательных приближений. Сходимость итерационного процесса решения определяется при этом двумя факторами: способом организации последовательных приближений, начальным приближением решения. Оценим с этих позиций возможности ускорения процессов сходимости решения при расчетах режимов СПЭ. Напомним, что эквивалентные узловых параметры $E_{\text{эу}}$ и $Y_{\text{эу}}$ остаются практически постоянными на всех шагах последовательных приближений.

Воспользовавшись уравнением (2.3) и (2.24), получим

$$U_y = E_c - Z_y(U_{y-} - E_{\text{эу}})Y_{\text{эу}} \quad (2.25)$$

Преобразованная система уравнений узловых напряжений (2.25) является практически линейной. Некоторая нелинейность проявляется лишь в том, что проводимость прочей нагрузки (2.21) зависит от узловых напряжений (за исключением случая $p = \gamma_0 = 2$) и эта зависимость, согласно выражениям (2.21)—(2.23), отражается на параметрах $E_{\text{эу}}$ и $Y_{\text{эу}}$.

Уравнение узловых напряжений, записанные для каждого из узлов СПЭ, имеют вид

$$U_{yi} = E_c - \sum_{j=1}^{n_c} Z_{ij} (U_{yi} - E_{\text{эу}j})Y_{\text{эу}i}, \quad i = 1, 2, \dots, n_c. \quad (2.26)$$

Для оптимальной организации последовательных приближений необходимо в каждом из узловых уравнений выделить доминирующий параметр и решить относительно него это уравнение. Доминирующий параметр в i -м уравнении системы (2.26) — узловое напряжение U_{yi} , поскольку модуль коэффициента при этом напряжении существенно больше модулей коэффициентов при остальных переменных этого уравнения. Перенеся в левую часть i -го уравнения слагаемые с переменной U_{yi} из правой части, получаем

$$U_{yi}(1 + Z_{ii}Y_{Эyi}) = E_c - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_c} Z_{ij}(U_{yj} - E_{Эyj})Y_{Эyi} + \\ + Z_{ii}E_{Эyj}Y_{Эyi}, \quad i = 1, 2 \dots n_c. \quad (2.27)$$

Для коэффициентов уравнения (2.27) справедливо соотношение

$$|1 + Z_{ii}Y_{Эyi}| \gg |Z_{ij}Y_{Эyi}|, \quad (2.28)$$

что подтверждает правильность выбора доминирующего параметра в уравнениях узловых напряжений.

Для организации расчетов методом последовательных приближений уравнение (2.27) преобразуем к виду

$$U_{yi} = \frac{E_c - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_c} Z_{ij}(U_{yj} - E_{Эyj})Y_{Эyi} + Z_{ii}E_{Эyj}Y_{Эyi}}{1 + Z_{ii}Y_{Эyi}}, \quad (2.29)$$

где $i = 1, 2 \dots n_c$.

Использование метода последовательных приближений применительно к системе уравнений (2.29) по сравнению с использованием в традиционной системе уравнений узловых напряжений (2.3) позволяет существенно ускорить сходимость итерационного процесса решения. Это происходит по следующим причинам.

1. Система уравнений (2.29) решена относительно доминирующего параметра и условия сходимости процесса последовательных приближений (2.28) выполняются. Практика расчетов по уравнениям (2.29) подтверждает сходимость процесса последовательных приближений для всех возможных нормальных и аварийных режимов. Система Уравнений (2.3) относительно доминирующего параметра не решена, поэтому сходимость процесса последовательных приближений затруднена. В практике расчетов режимов СПЭ по уравнениям (2.3) зафиксированы случаи расходимости итерационного процесса последовательных приближений.

2. Для решения системы уравнений (2.29) можно использовать схему Гаусса—Зейделя, что существенно ускоряет сходимость итерационного процесса по сравнению с решением методом простой итерации. Применительно к традиционной системе уравнений узловых напряжений (2.3), использование схемы Гаусса—Зейделя затруднительно, так как требует пересчета узловых токов.

Скорость сходимости процесса решения методом последовательных приближений существенно зависит от выбора начального приближения. При расчетах параметров режима СПЭ на очередном шаге интегрирования уравнений переходных процессов за начальное приближение можно принять решение, полученное на предыдущем шаге интегрирования. Процесс

решения при этом сходится в основном за одну, максимум две итерации. Поэтому начальное приближение узловых напряжений следует выбирать в первый момент после внезапного изменения режима (например, после возникновения КЗ, отключения КЗ или восстановления электроснабжения).

Для выбора начального приближения решения исходную схему СПЭ (рисунок 2.8, а) упрощенно преобразуем для каждого из узлов к виду, представленному на рисунке 2.8, б. В этой схеме ЭДС E_c и эквивалентные ЭДС всех узлов $E_{эyj}$ подключены к i -му узлу через ветви с комплексными сопротивлениями $Z_{эci}$ и $Z_{эji}$, соответственно.

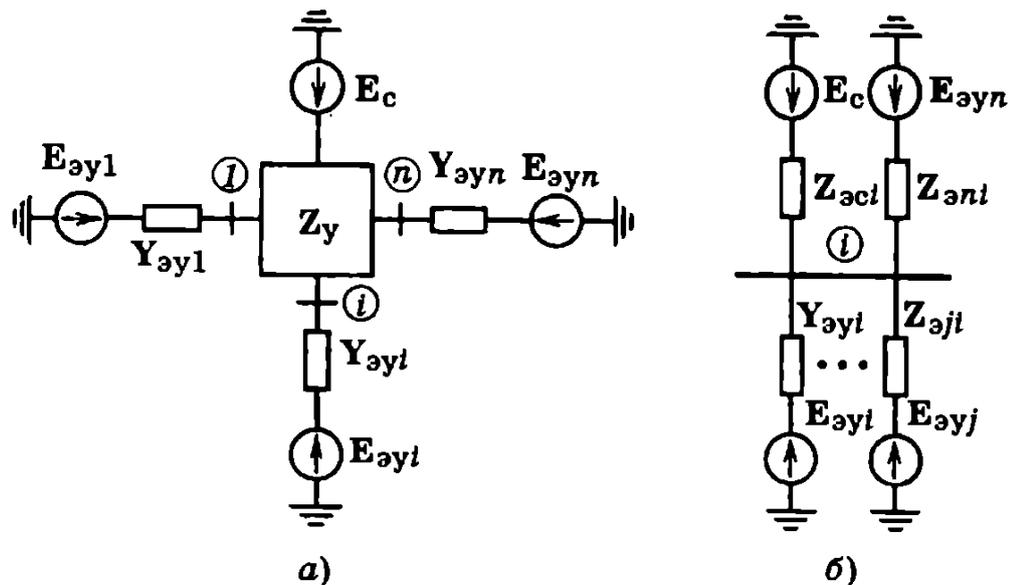


Рисунок 2.8 – Исходная (а) и преобразованная относительно i -го узла нагрузки (б) схемы СПЭ

Комплексное сопротивление ветви с ЭДС E_c целесообразно принять равным собственному узловому сопротивлению Z_{ii} . Для произвольной ветви с ЭДС $E_{эyj}$ комплексное сопротивление в общем случае (рисунок 2.9).

$$Z_{эji} = \frac{1}{Y_{эyi}} + Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij}. \quad (2.30)$$

Данный способ преобразования — приближенный, поскольку не учитывает наличие общих участков пути от j -го и k -го узлов нагрузки до i -го узла. Однако для вычисления начального приближения узловых напряжений такое упрощение вполне допустимо.

При преобразовании схемы на рисунке 2.8, б объединением параллельных ветвей можно получить начальное приближение для узловых напряжений.

Начальное приближение узловых напряжений зависит от собственных и взаимных узловых сопротивлений, эквивалентных узловых параметров $E_{эyi}$, $Y_{эyj}$ и ЭДС E_c .

Практика расчетов режимов СПЭ после возмущений, вызванных КЗ, отключениями КЗ и восстановлением электроснабжения показывает, что при начальных 2.29 завершаются не более, чем за 4-5 итераций.

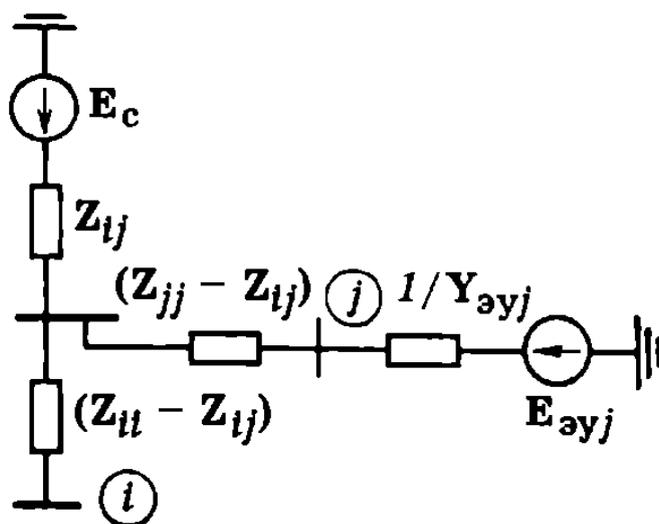


Рисунок 2.9 – Преобразование исходной схемы СПЭ относительно i -го узла

2.3 Особенности моделирования характерных режимов

В промышленной электроэнергетике при расчетно-экспериментальных исследованиях переходных процессов ограничиваются следующей совокупностью характерных режимов:

- установившийся;
- симметричное короткое замыкание;
- кратковременное отключение части узлов нагрузки от электрической системы и восстановление электроснабжения.

Переход СПЭ из одного режима в другой обусловлен различного рода повреждениями, работой релейной защиты и устройств автоматики и изменением состояния соответствующих выключателей.

Моделирование СПЭ в таких характерных режимах, как режимы КЗ и режим кратковременного отключения части узлов нагрузки, имеет ряд специфических особенностей.

1. Режим короткого замыкания. В общем случае в месте КЗ необходимо учитывать сопротивление $Z_{КЗ}$, которое отражает либо переходное сопротивление в месте КЗ, либо дополнительное сопротивление при расчетах несимметричных КЗ. В частном случае при трехфазном металлическом КЗ $Z_{КЗ} = 0$. Обозначим номером $(n_c + 1)$ узел КЗ и отнесем его к узлам нагрузки. Расчетная схема СПЭ, соответствующая режиму КЗ, приведена на рисунке 2.10. Узел КЗ отличается от обычного узла нагрузки тем, что ЭДС равна нулю, а проводимость эквивалентной ветви — $1/Z_{КЗ}$. Исходную матрицу узловых сопротивлений необходимо дополнить собственным и взаимными

узловыми сопротивлениями относительно узла КЗ.

Таким образом, в режиме КЗ порядок матрицы узловых сопротивлений $n_c + 1$.

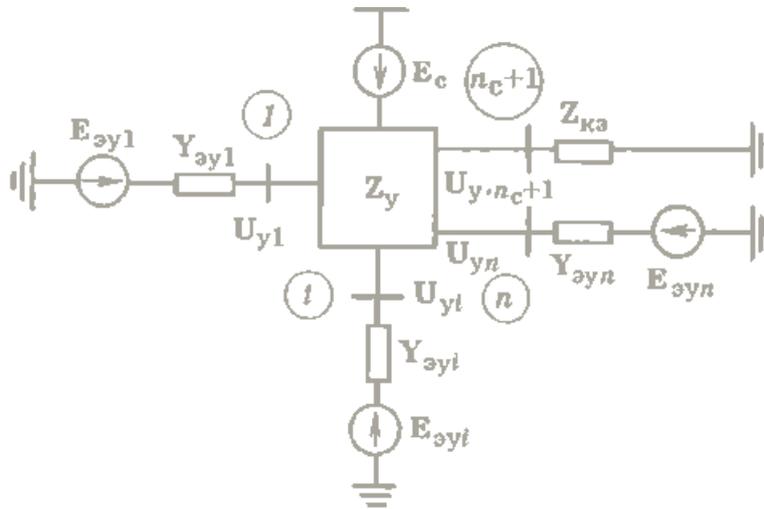


Рисунок 2.10 Расчетная схема СПЭ, соответствующая режиму КЗ

Режим короткого замыкания СПЭ в соответствии с расчетной схемой на рисунке 2.10 определяется следующей системой уравнений

$$I_{yi} = (U_{yi} - E_{эyi})Y_{эyi}, \quad i = 1, 2 \dots n_c; \quad (2.31)$$

$$I_{y,n_c+1} = I_{КЗ} = \frac{E_c - \sum_{i=1}^{n_c} Z_{n_c+1,i} Y_{yi}}{Z_{n_c+1,n_c+1} + Z_{КЗ}}; \quad (2.32)$$

$$U_{yi} = E_c - \sum_{j=1}^{n_c+1} Z_{ij} Y_{yj}, \quad i = 1, 2, \dots, n_c \quad (2.33)$$

$$U_{y,n_c+1} = U_{КЗ} = Z_{КЗ} I_{КЗ}. \quad (2.34)$$

Специфика моделирования режима КЗ в СПЭ заключается в следующем. Необходимо рассчитывать на каждом шаге интегрирования собственное и взаимные сопротивления узла КЗ; ток в узле КЗ (2.32, 2.29), напряжение (2.33) и учитывать влияние тока КЗ на напряжения в узлах нагрузки.

2. Режим кратковременного отключения части узлов нагрузки от электрической системы. После отключения поврежденного элемента в СПЭ может возникнуть несколько изолированных групп узлов, т.е. несколько электрически связанных групп узлов нагрузки, отключенных от электрической сети. За счет взаимного обмена мощностью выбег двигателей изолированной группы происходит синхронно, т.е. с одинаковой частотой. Для отключенных узлов необходимо определить число изолированных групп и распределение узлов по изолированным группам.

Отключенные узлы нагрузки СПЭ можно выявить при формировании

матрицы путей $MP(n_c, n_b)$, элементы которой

$$MP(j, i) = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{я ветвь принадлежит пути от } j - \text{го узла;} \\ 0, & \text{если } i - \text{я ветвь не принадлежит пути от } j - \text{го узла.} \end{cases}$$

При формировании матрицы путей для узлов нагрузки, подключенных к электрической системе, определяется путь до нулевого узла и признак подключения узла. Для отключенных узлов — путь до узла отключения и признак отключения узла.

Обозначим n_r число изолированных групп узлов. Матрица $H_r(n_r)$ характеризует распределение узлов нагрузки по изолированным группам:

Если j -й узел подключен к электрической системе, то $H_r(j) = 0$; если j -й узел принадлежит k -й изолированной группе, то $H_r(j) = k, k=1, 2, \dots, n_r$

Алгоритм разделения отключенных узлов нагрузки на изолированные группы основан на анализе матрицы путей MP . Если путь от j -го узла не содержит ни одной ветви, т.е. $MP(j, i) = 0$ при $i = 1, 2, \dots, n_b$, то такой отключенный узел принадлежит изолированной группе с номером $n_r + 1$ (первоначальное значение $n_r = 0$).

Таким образом, очередной из отключенных узлов, не имеющий ветвей в пути, принадлежит следующей изолированной группе (рисунок 2.11).

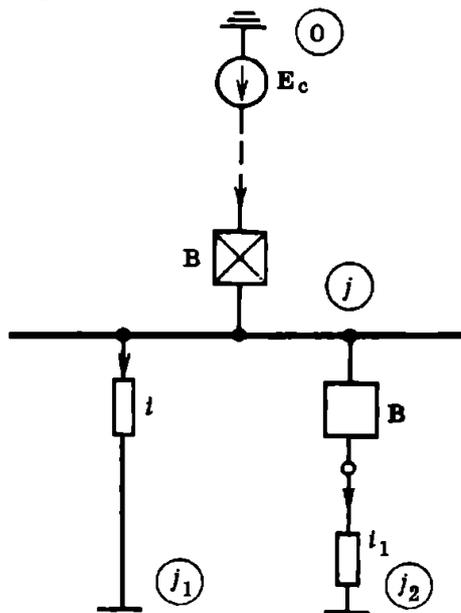
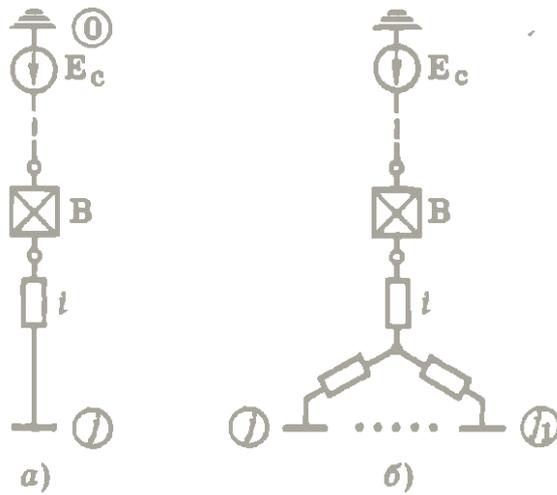


Рисунок 2.11 – К алгоритму разделения отключенных узлов нагрузки СПЭ на изолированные группы (узел j не имеет ветвей в пути)

Допустим, что j -й отключенный узел нагрузки не содержит ветвей в пути и принадлежит k -й изолированной группе, т.е. $H_r(j) = k$. Просматриваем пути от остальных отключенных узлов, еще не разделенных на изолированные группы. Если в пути от узла j_1 встретится i -я ветвь, т.е. $MP(j_1, i) = 1$, и номер начального узла этой ветви равен j , т.е. $JH(i) = j$, то узел j_2 , также входит в k -ю изолированную группу и $H_r(j_1) = k$.



а — ветвь i не принадлежит пути от других узлов; б — ветвь i принадлежит пути от узла j_1

Рисунок 2.12 – К алгоритму разделении отключенных узлов нагрузки СПЭ на изолированные группы (узел u имеет ветви в пути)

Если в пути от j_2 встретится ветвь i_1 и начальный узел этой ветви принадлежит выключателю, другой узел которого совпадает с j , то j_2 также принадлежит той же k -й изолированной группе (рисунок 2.11).

Далее просматриваются пути от отключенных узлов нагрузки, еще не разделенных на изолированные группы, и, следовательно, имеющие ветви в пути. Если в пути от j -го узла имеется i -я ветвь, $MP(j,i) = 1$, а в путях от остальных j_1 отключенных узлов ($y_1 = j + 1, \dots, n_c$) этой ветви нет, то j -й узел принадлежит очередной изолированной группе (рисунок 2.12, а). Если же в пути от узла j_1 встречается i -я ветвь, то узлы j и j_1 принадлежат очередной изолированной группе (см. рисунок 2.12, б). В результате все отключенные узлы нагрузки в СПЭ будут разбиты на p_r изолированных групп: к k -й изолированной группе принадлежат отключенные узлы нагрузки с признаком $H_r(j) = k$.

В матрице узловых сопротивлений Z_y для узлов нагрузки, подключенных к электрической системе, определяются собственные и взаимные узловые сопротивления по отношению к нулевому узлу, а для отключенных узлов нагрузки по отношению к узлу отключения.

Расчет режима отключения осуществляется отдельно для части СПЭ, подключенной к электрической системе, и для изолированных групп узлов. Параметры режима отключенной изолированной группы из n_1 узлов нагрузки СПЭ (рисунок 2.13) определяются следующими уравнениями:

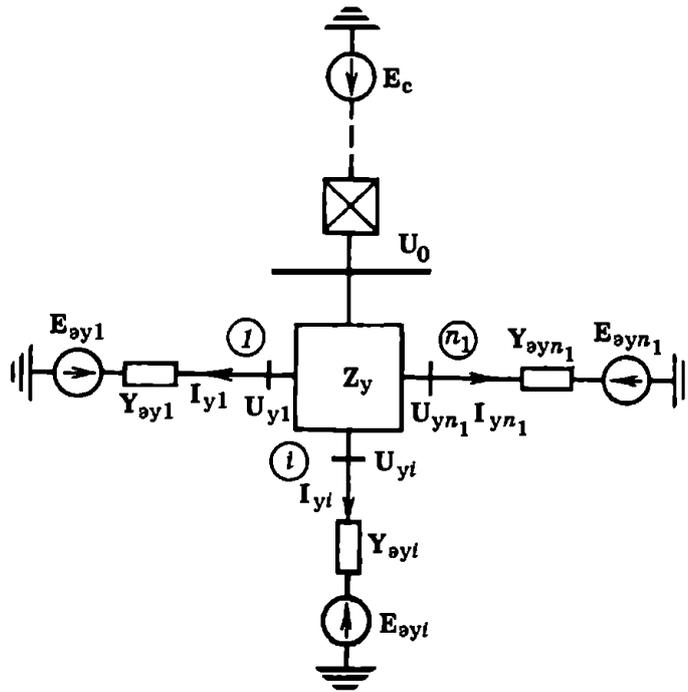


Рисунок 2.13 – Структурная схема замещения изолированной группы узлов СПЭ, отключенных от электрической системы

$$U_y = U_0 - Z_y I_y; \quad (2.35)$$

$$\sum_{i=1}^{n_1} I_{yi} = 0. \quad (2.36)$$

Систему уравнений (2.35), (2.36) с учетом соотношения (2.24) можно преобразовать к виду

$$U_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} Y_{\Delta y_i} (E_{\Delta y_i} + \Delta U_{\Delta i}) Y_{\Delta y_i}}{\sum_{i=1}^{n_1} Y_{\Delta y_i}}; \quad (2.37)$$

$$U_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} Y_{\Delta y_i} (E_{\Delta y_i} + \Delta U_{\Delta i})}{\sum_{i=1}^{n_1} Y_{\Delta y_i}}; \quad (2.38)$$

$$U_{yi} = U_0 - U_{\Delta i}, \quad i = 1, 2, \dots, n_1, \quad (2.39)$$

$$U_{\Delta i} = \sum_{j=1}^{n_1} Z_{ij} I_{yj}. \quad (2.40)$$

— падение напряжения относительно узла отключения.

Параметры режима изолированной группы узлов нагрузки рассчитываются в следующей последовательности.

$$U_{yi}^{(0)} = \frac{\sum_{j=1}^{n_1} Y_{\Delta y_i} E_{\Delta y_i}}{\sum_{j=1}^{n_1} Y_{\Delta y_i}} \quad (2.41)$$

1. Начальные приближения узловых напряжений в первый момент после возникновения изолированной группы узлов определяются по вышеперечисленным формулам.

2. Узловые токи вычисляются по выражению (2.24), падение напряжения относительно узла отключения — по (2.40), напряжение в узле отключения — по (2.38).

3. Следующее приближение узловых напряжений рассчитывается по (2.39).

4. Повторяются расчеты по п. 2, 3 до сходимости итерационного процесса.

При расчете режима k -й изолированной группы узлов СПЭ, отключенной от электрической системы, следует учитывать, что частота напряжения ω_k отлична от синхронной. Это проявляется в том, что все индуктивные сопротивления в изолированной части схемы изменяются пропорционально частоте:

$$Z = R + j\omega_k x. \quad (2.42)$$

Частота напряжения ω_k в k -й изолированной группе узлов определяется следующим образом:

если в изолированной группе узлов есть подключенные СД, частота ω_k равна частоте вращения эквивалентного СД [46];

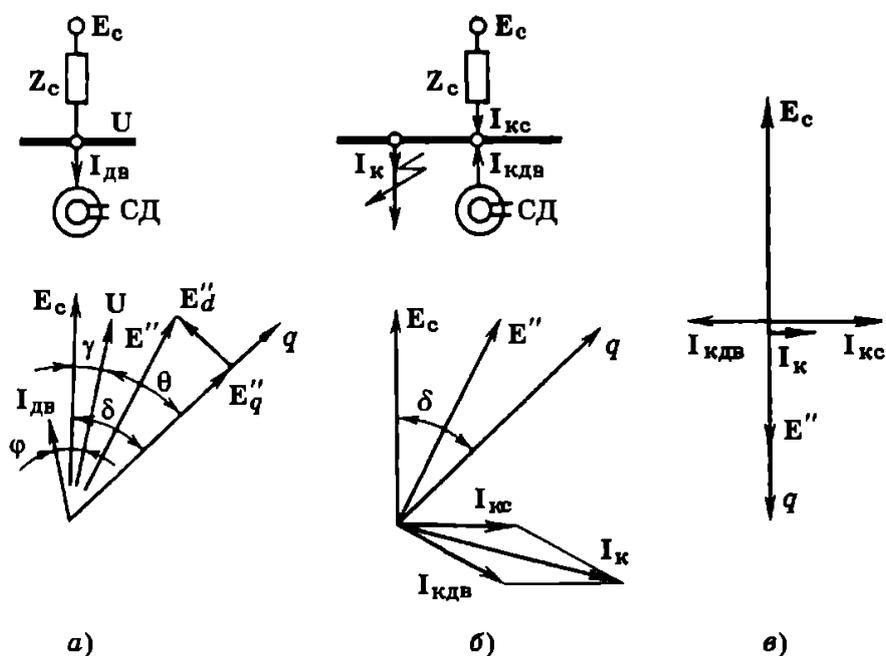
если в изолированной группе нет подключенного СД, частота ω_k равна частоте вращения эквивалентного АД.

2.4 Анализ переходных процессов в характерных режимах

Короткое замыкание в узле комплексной нагрузки. Ток КЗ в произвольной точке системы электроснабжения в общем случае определяется геометрической суммой токов электрической системы и двигателей узлов промышленной комплексной нагрузки, при этом ток двигательной нагрузки в некоторых случаях достигает 50 % и более от общего тока в месте КЗ. Рассмотрим КЗ в узле комплексной промышленной нагрузки, преобладающую долю которой составляют СД, причем в первый момент доля тока от СД составляет 50 % общего тока КЗ.

В режиме, предшествующем КЗ (рисунок 2.14, *a*), угол γ между векторами ЭДС электрической системы E_c и напряжения U на шинах узла составляет (10—15)°. Угол θ , характеризующий положение поперечной оси q СД относительно вектора U , равен (30—40)°, так что в целом угол δ в

нормальном режиме узла нагрузки составляет $(40—55)^\circ$. Угол между векторами ЭДС E'' и E_c под влиянием сверхпереходной ЭДС E_d'' составит меньше угла δ и в нормальном режиме узла нагрузки будет $(20—30)^\circ$. Вектор тока двигательной нагрузки $I_{дв}$ в нормальном режиме узла опережает вектор напряжения на угол φ .



a — в исходном режиме; *б* — в первый момент после КЗ; *в* — в момент противофазы токов КЗ от системы и двигателя

Рисунок 2.14 – Векторные диаграммы токов и напряжений узла комплексной нагрузки

В первый момент после КЗ (рисунок 2.14, б) векторы ЭДС E_c и E'' сохраняют свои значения из предшествующего режима, а векторы токов электрической системы и двигателей $I_{кдв}$ отстают от векторов E_c и E'' на 90° (при чисто индуктивном сопротивлении электрической системы $Z_c = jx_c$). Ток в месте КЗ I_k равен геометрической сумме векторов $I_{кc}$ и $I_{кдв}$ и его модуль на 5—7 % меньше, чем алгебраическая сумма токов.

После короткого замыкания СД узла начинают тормозиться, а угол δ между вектором ЭДС E_c и поперечной осью ротора q расти. К моменту, когда этот угол достигнет 180° (рисунок 2.14, в), сверхпереходная ЭДС по продольной оси уменьшится до нуля и вектор сверхпереходной ЭДС E'' будет совпадать с осью q . Геометрическая сумма токов $I_{кc}$ и $I_{кдв}$ в этот момент равна разности их модулей, следовательно, значительно меньше алгебраической суммы этих токов.

Кривые затухания периодических составляющих тока КЗ в узле комплексной нагрузки представлены на рисунке 2.15. Составляющая тока электрической системы $I_{кc}$ остается неизменной, а составляющая тока

двигателей $I_{кдв}$ затухает. Алгебраическая сумма токов $I_{\Sigma} = I_{кс} + I_{кдв}$ дает значение тока КЗ, которое определяется при обычных расчетах, в частности при расчетах по новым «Руководящим указаниям». Действительный ток КЗ, равный геометрической сумме $I_k = I_{кс} + I_{кдв}$ существенно отличается от I_{Σ} . Погрешность в определении тока КЗ при алгебраическом суммировании зависит от соотношения $I_{кс}$ и $I_{кдв}$ и от момента времени. Максимальная погрешность может превышать даже 100%.

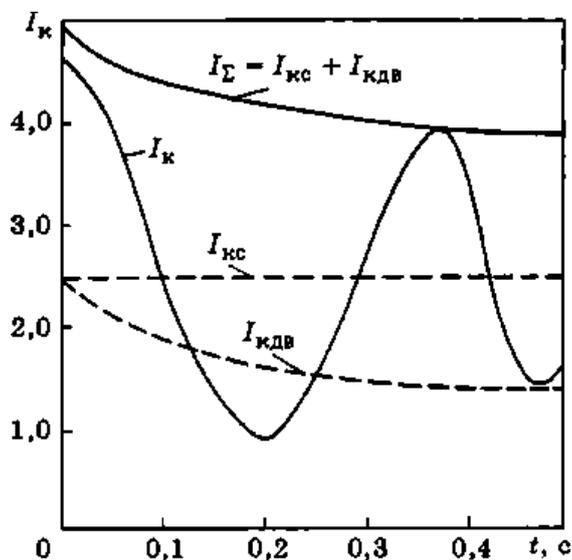


Рисунок 2.15 – Изменение периодического тока КЗ и его составляющих в узле комплексной нагрузки

Групповой выбег электрических двигателей. Режим торможения двигателей изолированной группы узлов, которая образуется при отключении части узлов нагрузки от электрической системы, называется групповым (т.е. совместным) выбегом двигателей данной группы узлов.

Групповой выбег СД и АД на значительном интервале времени — синхронный, т.е. характеризуется для СД одинаковой средней частотой вращения, а для АД — скольжением, меньшим критического значения. При этом за счет взаимного обмена электромагнитной мощностью двигатели с меньшими электромеханическими постоянными времени переходят в двигательный режим и благодаря дополнительному электромагнитному моменту тормозятся с меньшей скоростью, чем при индивидуальном выбеге. Двигатели с большими электромеханическими постоянными времени переходят в генераторный режим и тормозятся со скоростью большей, чем при индивидуальном выбеге.

Таким образом, скорости выбега двигателей выравниваются, что и обуславливает синхронность их выбега. Поскольку источниками ЭДС, поддерживающими напряжение на шинах РУ, являются внутренние ЭДС двигателей, такой выбег характеризуется также единой частотой напряжения в каждой электрически изолированной части сети.

Основные параметры, характеризующие процесс синхронного

группового выбега, — частота напряжения $\omega_j, j = 1, \dots, n_r$ для каждой изолированной группы узлов и значение остаточного напряжения (U_{yr} в отключенных узлах сети, которое может быть найдено по соотношениям (2.38) – (2.40).

При индивидуальном выбеге внутренние ЭДС асинхронных двигателей затухают на порядок быстрее, чем синхронных, поэтому при групповом выбеге напряжение на шинах РУ поддерживается в основном за счет ЭДС синхронных двигателей. Частота напряжения при таком выбеге совпадает со средней частотой вращения СД.

При групповом выбеге одних СД частота выбега совпадает с частотой вращения ротора эквивалентного двигателя:

$$U_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \omega_i T_{ji} S_{Ni}}{\sum_{i=1}^{n_1} T_{ji} S_{Ni}}, \quad (2.43)$$

где ω_i — частота вращения ротора i -го СД при групповом (или индивидуальном) выбеге. Характер этого процесса зависит от соотношения между электромеханическими постоянными времени T_{ji} отдельных двигателей. При неодинаковых постоянных времени T_{ji} двигатели тормозятся в неустановившемся синхронном либо даже асинхронном режиме.

Например, рассмотрим выбег двух синхронных двигателей $СД_1$ и $СД_2$ с одинаковыми номинальными мощностями $P_{N1}=P_{N2}$ и коэффициентами загрузки $K_{31}=K_{32}$, но различными электро-механическими постоянными времени: $T_{j1} = 1, T_{j2} = 10$ с. При индивидуальном выбеге изменение скольжения двигателей происходит по зависимостям 1 и 2, приведенным на рисунке 2.16. Синхронная частота группового выбега этих двигателей определяется зависимостью 3. Групповой выбег двигателей $СД_1$ и $СД_2$ будет синхронным, но неустановившимся. Изменение скольжения описывают кривые 4 и 5.

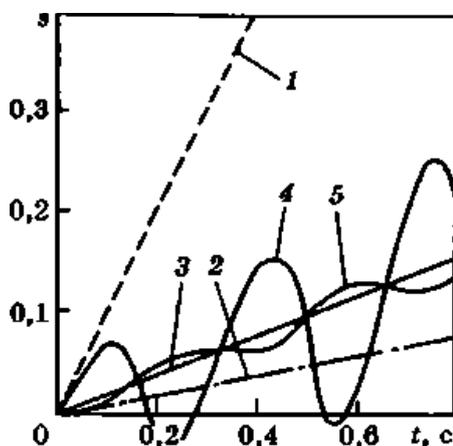


Рисунок 2.16 – Изменение скольжения при индивидуальном выбеге

СД₁(1), СД₂(2)

В начале группового выбега каждый из двигателей тормозится по своим индивидуальным характеристикам, т.е. первый быстрее, второй медленнее. В результате появляется и увеличивается угол сдвига между осями роторов СД, и за счет остаточного напряжения на секции СД₁ переходит в двигательный, а СД₂ — в генераторный режим.

Первый двигатель потребляет электромагнитную мощность, развивает дополнительный электромагнитный момент и начинает тормозиться со скоростью меньшей, чем при индивидуальном выбегае. Вторым двигателем, наоборот, отдает электромагнитную мощность и в результате дополнительно тормозится.

При торможении СД₁ частота вращения ротора в некоторый момент превышает синхронную, и двигатель переходит в режим генератора. Наоборот, при торможении СД₂ частота вращения ротора в тот же момент становится меньше синхронной, и двигатель переходит в двигательный режим. Теперь первый двигатель будет тормозиться, а второй — ускоряться. В результате скольжение двигателей будет изменяться в противофазе относительно скольжения, соответствующего синхронной частоте выбега, причем амплитуда колебаний скольжения (с малой электромеханической постоянной времени) будет значительно больше у СД₁, чем у СД₂.

Синхронный групповой выбег двигателей может иметь место только в том случае, если электромагнитный момент каждого двигателя, обусловленный обменом электромагнитной мощностью между ними, достаточен для поддержания синхронной частоты выбега.

Следовательно, граница существования синхронного группового выбега определяется неравенством

$$|M_i| \leq M_{\max i}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.44)$$

где M_i — требуемый для существования группового выбега электромагнитный момент i -го двигателя; $M_{\max i}$ — максимальный синхронный момент i -го двигателя. При синхронной частоте вращения максимальный момент в зависимости от параметров двигателя изменяется в относительных единицах в пределах 1,5—2 по отношению к номинальному моменту.

При групповом выбегае n различных СД синхронная частота равна частоте эквивалентного двигателя, т.е. определяется уравнением

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{\text{Mexi}} S_{Ni}}{\sum_{i=1}^n T_{Ji} S_{Ni}}. \quad (2.45)$$

Для того чтобы любой i -й двигатель тормозился с синхронной частотой при групповом выбеге, должно соблюдаться условие

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_i - M_{\text{Mex}i}}{T_{Ji}} \quad (2.46)$$

Из сравнения уравнений (2.45) и (2.46) следует, что требуемый для существования синхронного выбега i -го двигателя электромагнитный момент определяется выражением

$$M_i = M_{\text{Mex}i} - T_{Ji} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{\text{Mex}i} S_{Ni}}{\sum_{i=1}^n T_{Ji} S_{Ni}} \quad (2.47)$$

В частности, синхронный выбег двух СД при их одинаковой загрузке в относительных единицах ($M_{\text{Mex}1} = M_{\text{Mex}2} = M_{\text{Mex}}$) в соответствии с выражениями (2.42) и (2.47) имеет место, если

$$|M_2| = \left| M_{\text{Mex}} \frac{1 - T_{J2}/T_{J1}}{1 + T_{J2}S_{N2}/T_{J1}S_{N1}} \right| \leq M_{\text{max}2} \quad (2.48)$$

Для данных, соответствующих (рисунок 2.16), требуемый электромагнитный момент $M_2 = 9/11 = 0,818$, в то время как $M_{\text{max}2} = 1,5 \div 2$, поэтому синхронный выбег в этом случае возможен. Если соотношения между параметрами отдельных СД $T_{J2}/T_{J1} = 9$; $S_{N1}/S_{N2} = 9$, то электромагнитный момент второго двигателя $M_2 = 4$, т.е. больше максимального. Синхронный групповой выбег в этом случае невозможен, что подтверждается данными расчетов, приведенными на рисунке 2.17.

Рассмотрим теперь совместный выбег СД и АД. Напряжение на шинах отключенной секции в этом случае поддерживается ЭДС поэтому частота напряжения определяется их средней частотой вращения.

Групповой выбег СД и АД происходит с частотой, близкой к частоте эквивалентного двигателя, при этом первые являются генераторами, а вторые — потребителями реактивной мощности. Обмен активной мощностью между двигателями существенно зависит от соотношения между электромеханическими постоянными двигателей.

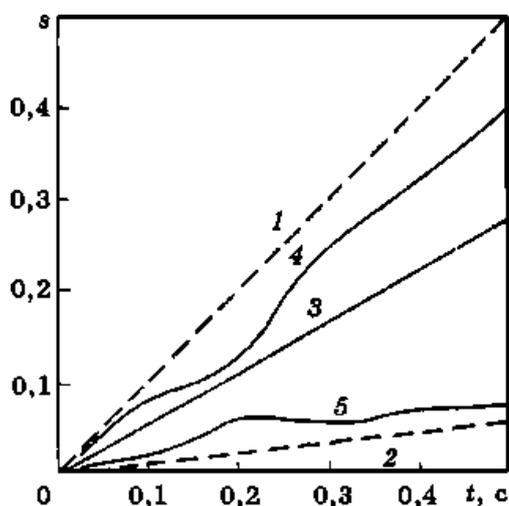


Рисунок 2.17 – Изменение скольжения при индивидуальном выбеге

Например, рассмотрим совместный выбег СД и АД с одинаковой номинальной активной мощностью ($P_{\text{НСД}} = P_{\text{НАД}}$ но различными электро-механическими постоянными: $T_{\text{ДСД}} = 2,5$, $T_{\text{ДАД}} = 10$ с. При индивидуальном выбеге скольжения этих двигателей изменяются в соответствии с кривыми 1 и 2 на рисунке 2.18. Скольжение эквивалентного двигателя определяется зависимостью 3. При групповом выбеге АД, имеющий большую электро-механическую постоянную, переходит в генераторный режим и за счет дополнительной нагрузки тормозится быстрее, чем при индивидуальном выбеге (кривая 4).

Синхронный двигатель, имеющий меньшую постоянную времени, за счет уменьшения суммарного момента, тормозится медленнее, чем при индивидуальном выбеге (кривая 5). Частота напряжения на секции определяется частотой вращения СД. Разность между частотой вращения СД и АД при групповом выбеге определяет скольжение последнего. При обратном соотношении электро-механических постоянных ($T_{\text{ДСД}} = 10$; $T_{\text{ДАД}} = 2,5$ с) СД будет тормозиться в генераторном режиме (кривая 4, Рисунок 2.18), а АД — в двигательном режиме (кривая 5, Рисунок 2.18).

Таким образом, частота вращения двигателей при групповом выбеге лишь близка к частоте вращения эквивалентного двигателя и в зависимости от их параметров может отличаться в ту или иную сторону. Частота напряжения на секции шин при групповом выбеге равна средней частоте вращения СД.

Групповой выбег одних АД также на значительном интервале времени является синхронным. При этом выбег АД, имеющих большой запас кинетической энергии, происходит в режиме генерации активной мощности, а имеющих большой запас электро-магнитной энергии — в режиме генерации реактивной мощности.

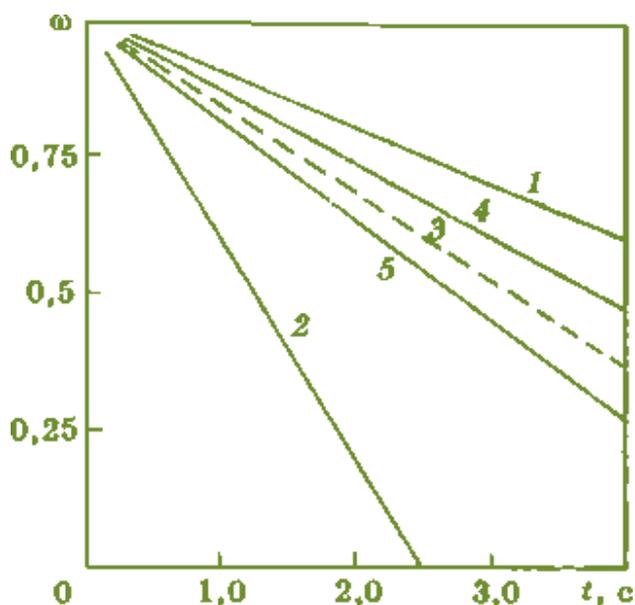
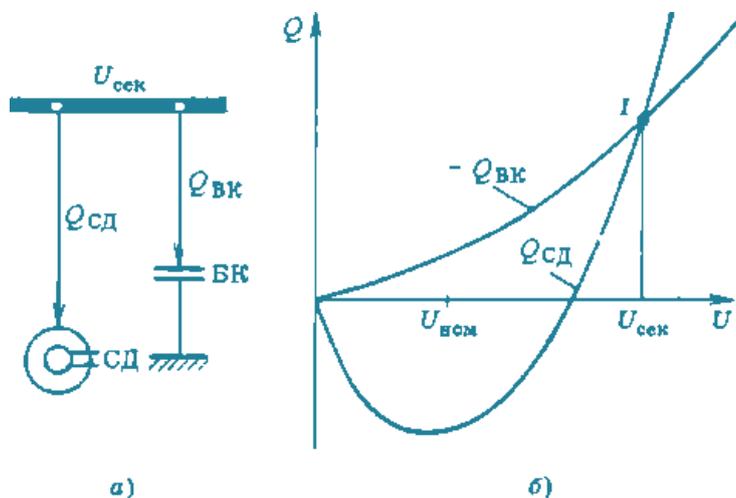


Рисунок 2.18 – Изменение частоты вращения АД (1) и СД (2) при индивидуальном и групповом выбеге

Двигатели, имеющие меньший запас кинетической (электромагнитной) энергии, потребляют активную (реактивную) мощность. За счет обмена электромагнитной мощностью скорости выбега двигателей выравниваются, что и обуславливает их синхронный выбег.

Выбег СД, подключенного к секции РУ совместно с батареей конденсаторов (рисунок 2.19, а) происходит при напряжении на секции $U_{сек}$, существенно превышающем номинальное. Поскольку активная мощность СД в этом случае равна нулю, угол сдвига между векторами ЭДС E_q и напряжения на секции также равен нулю, а реактивная мощность двигателя

$$Q_{СД} = \frac{U^2}{X_d} - \frac{E_q U}{X_d} \quad (2.49)$$



а — схема выбега; б — зависимости реактивной мощности СД и батареи конденсаторов от напряжения на секции

Рисунок 2.19 – Выбег СД, подключенного к секции РУ совместно с батареей конденсаторов

Реактивная мощность батареи конденсаторов

$$Q_{БК} = -U^2 B, \quad (2.50)$$

где B — емкостная проводимость батареи. Напряжение на секции при выбеге определяется балансом реактивной мощности

$$Q_{СД} + Q_{БК} = 0. \quad (2.51)$$

Зависимости реактивных мощностей двигателя и батареи конденсаторов от напряжения на секции приведены на рисунке 2.19,б. Баланс реактивной мощности соответствует точке 1, т.е. напряжению на секции $U_{сек}$ более, чем в два раза превышающему номинальное. С учетом насыщения стали СД баланс реактивных мощностей будет сдвинут в сторону меньших напряжений, но и в этом случае напряжение на секции при выбеге будет в полтора раза больше номинального.

Групповой самозапуск двигателей. Режим группового самозапуска двигательной нагрузки возникает, как правило, после срабатывания АВР на секционных выключателях промышленных подстанций. Время выдержки АВР определяется необходимостью ожидания снижения напряжения на потерявших питание секциях до безопасных значений и существенно зависит от эффективности гашения поля отключенных СД. Допустимое по условиям несинфазности включения остаточное напряжение составляет $(0,3 \div 0,4)U_{ном}$.

При наличии в узлах нагрузки СД с бесщеточными возбудительными устройствами, не обладающими эффективным способом гашения поля, суммарная выдержка времени АВР составляет не менее 1,5—2 с. За это время двигатели потерявших питание секций успевают существенно затормозиться, поэтому их токи включения после срабатывания АВР будут близки к пусковым, т.е. в 5—7 раз превышать номинальные, что приведет к заметному снижению напряжения на секциях.

Одна из основных причин ограничения применения самозапуска СД — превышение заданного допустимого тока включения двигателей в момент самозапуска, поэтому определение обоснованных значений этого тока является актуальной задачей. Допустимый ток включения при самозапуске определяется электродинамической стойкостью обмоток двигателей. При проектировании серии двигателей электро-динамическая стойкость обмоток рассчитывается, как правило, на токи двух режимов: трехфазного КЗ на выводах двигателя и пуска двигателя.

Первый режим характеризуется сверхпереходным током $I'' = I_{п0}$, который является действующим значением периодической составляющей тока КЗ на выводах СД в первый момент после КЗ.

Второй — характеризуется средним значением периодической составляющей пускового тока (указывается в каталожных данных двигателя).

Сравнение электродинамической стойкости обмоток двигателей в различных режимах можно проводить только по периодической составляющей тока (исходя из предположения о том, что максимальное значение апериодической составляющей тока равно амплитуде соответствующей периодической составляющей). В режиме пуска максимальное значение периодической составляющей тока за счет свободных составляющих, появляющихся в момент включения двигателя, на 30—35 % больше пускового тока, указанного в каталожных данных двигателя

$$I_{n \max} \approx 1,3 \div 1,5 I_{п}. \quad (2.52)$$

Это значение больше сверхпереходного тока КЗ I'' , поэтому допустимый ток включения при самозапуске СД можно принять равным току $I_{n \max}$, т.е. $I_{\text{доп.вкл}} = I_{n \max} \approx 1,31 I_{п}$. Допустимое остаточное напряжение на выводах СД перед включением соответственно составит $U_{\text{ост}} = (0,35 \div 0,4) U_N$.

2.5 Синхронный установившийся режим синхронных двигателей

В синхронном установившемся режиме реализуется основное функциональное назначение СД: быть приводом с синхронной частотой вращения для механизмов и служить управляемым источником реактивной мощности в результате регулирования тока в обмотке возбуждения.

В настоящей главе рассмотрены исходные, эквивалентные и комплексные схемы замещения СД, используемые в расчетах синхронного установившегося режима.

2.5.1 Исходные схемы замещения

Параметрам режима трехфазных систем электроснабжения переменного тока соответствуют обобщенные вращающиеся векторы, характеризующие либо изменения во времени (в частности, синусоидальные изменения тока или напряжения статорной обмотки), либо пространственные перемещения (например, вращение магнитного потока) этих параметров режима. Проекции обобщенных векторов на неподвижные фазные оси (a , b , c) равны фазным значениям соответствующих параметров режима. Например, на рисунке (2.20) представлен обобщенный вектор напряжения U , модуль которого U характеризует амплитудное (или действующее) значение напряжения, а частота вращения ω совпадает с частотой напряжения.

Положение обобщенных векторов можно задавать в различных системах координат. Наиболее применяемые следующие системы координат:

α, β , (β — неподвижная относительно статора; u, U — вращающаяся с синхронной частотой; d, q — вращающаяся с частотой ротора).

Для трехфазных электрических машин более предпочтительна двумерная ортогональная система координат, вращающаяся с частотой обобщенных векторов. В такой системе координат обобщенные векторы неподвижны относительно осей, и для определения векторов может быть использован математический аппарат теории комплексных чисел и функций. Например, вектор напряжения U в этой системе координат может быть записан в виде

$$U = U' + jU'' \quad (2.53)$$

где U' ; U'' — проекции вектора напряжения на действительную и мнимую оси комплексной плоскости.

Для синхронных двигателей (СД) естественная вращающаяся система координат — система d, q , задаваемая осями ротора d — продольная ось, совпадающая с осью обмотки возбуждения; q — поперечная, ортогональная продольной).

Проекции вектора параметра режима на оси d и q называются соответственно продольной и поперечной составляющими. Например, векторы напряжения и тока статорной обмотки СД в системе координат d, q представляются в виде:

$$\left. \begin{aligned} U &= U_d + jU_q \\ I &= I_d + jI_q \end{aligned} \right\} \quad (2.54)$$

Переход от трехфазных неподвижных осей a, b, c к ортогональным вращающимся d, q математически эквивалентен линейному преобразованию системы координат (рисунок 2.20).

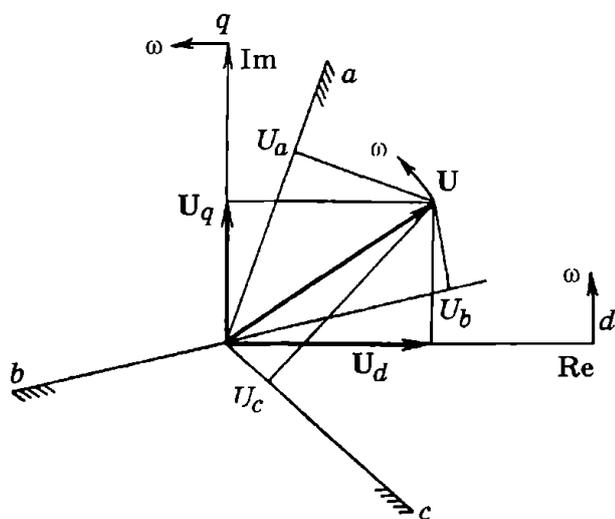


Рисунок 2.20 — Системы координат для обобщенных векторов параметров режима

В реальных обмотках СД токи и I_d и I_q напряжения U_d и U_q измерить нельзя. Однако в системе координат d, q существенно упрощаются уравнения переходных процессов и установившегося режима, а зная продольные и поперечные составляющие параметров режима, при необходимости всегда можно вычислить и фазные значения.

Физическая модель СД в системе координат d, q показана на рисунке 2.21. Реальная трехфазная статорная обмотка представлена системой из двух ортогональных вращающихся контуров — продольного (d, d) и поперечного (q, q), а обмотка ротора — контуром обмотки возбуждения (f, f) и продольным (d_1, d_1) и поперечным (q_1, q_1) контурами демпферной обмотки.

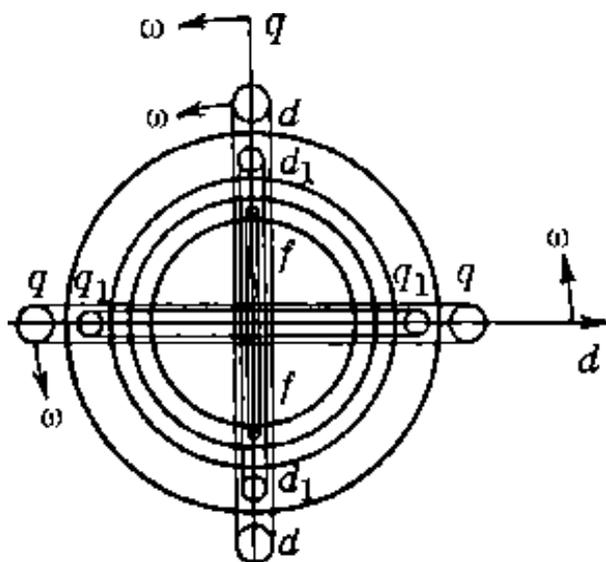


Рисунок 2.21 – Модель синхронной машины в осях d

Ввиду магнитной и электрической несимметрии ротора схемы замещения СД по продольной и поперечной осям различаются (рисунок 2.22).

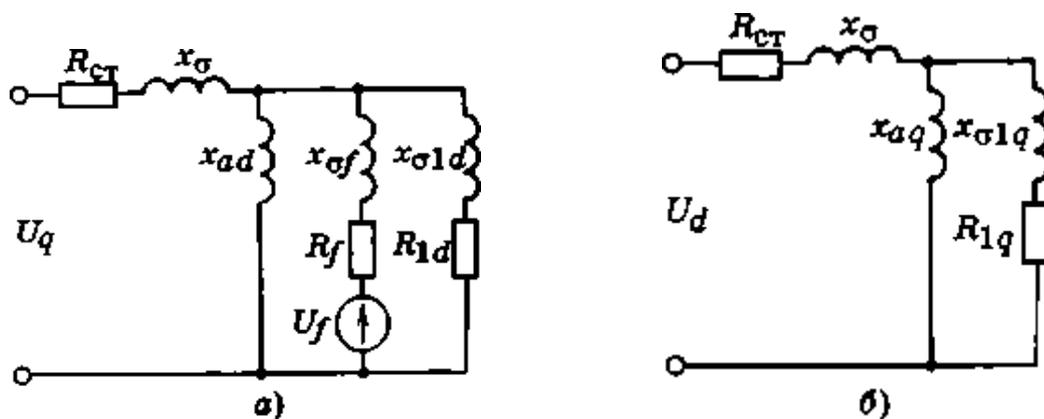


Рисунок 2.22 – Исходные схемы замещения синхронной машины по продольной (а) и поперечной (б) осям

К параметрам исходных схем замещения СД относятся :

R_c и x_σ – активное и индуктивное сопротивления рассеяния статорной обмотки (ввиду симметрии статора принимаются одинаковыми по продольной и поперечной осям);

x_{ad} и x_{aq} – сопротивления взаимоиндукции между статорной и роторными обмотками по продольной и поперечной осям;

$x_{\sigma 1d}$ и $x_{\sigma 1q}$ – индуктивные сопротивления рассеяния демпферной обмотки по продольной и поперечной осям;

R_f , $x_{\sigma f}$ – активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки возбуждения.

Из исходных схем замещения могут быть получены также следующие параметры СД:

полное индуктивное сопротивление обмотки возбуждения при разомкнутой статорной обмотке:

$$x_f = x_{\sigma f} + x_{ad}; \quad (2.55)$$

полные индуктивные сопротивления демпферной обмотки по продольной и поперечной осям:

$$\left. \begin{aligned} x_{1d} &= x_{\sigma 1d} + x_{ad}; \\ x_{1q} &= x_{\sigma 1q} + x_{aq}. \end{aligned} \right\} \quad (2.56)$$

индуктивные сопротивления этих же обмоток, но при короткозамкнутой статорной обмотке:

$$\left. \begin{aligned} x'_f &= x_{\sigma f} + x'_{ad}; \\ x'_{1d} &= x_{\sigma 1d} + x'_{ad}; \\ x'_{1q} &= x_{\sigma 1q} + x'_{aq}. \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

где

$$\left. \begin{aligned} x'_{ad} &= \frac{x_{ad} x_\sigma}{x_{aq} + x_\sigma}; \\ x'_{aq} &= \frac{x_{aq} x_\sigma}{x_{aq} + x_\sigma} \end{aligned} \right\} \quad (2.58)$$

сопротивление взаимоиндукции между статорной и роторной обмотками по продольной и поперечной осям при короткозамкнутом статоре;

постоянные времени обмотки возбуждения при разомкнутой и короткозамкнутой статорной обмотке:

$$\begin{aligned} T_{f0} &= x_f / R_f ; \\ T'_f &= x'_f / R_f ; \end{aligned} \quad (2.59)$$

постоянные времени демпферной обмотки по продольной и

поперечной осям при разомкнутой и короткозамкнутой статорной обмотке:

$$\begin{aligned} T_{1d0} &= x_{1d}/R_{1d}; T_{1q0} = x_{1q}/R_{1q} \\ T'_{1d} &= x'_{f1d}/R_{1d}; T'_{1q} = x'_{f1q}/R_{1q} \end{aligned} \quad (2.60)$$

Коэффициент магнитной связи двух магнитно-связанных обмоток с самоиндукцией L_1 , и L_2 и взаимоиндукцией M определяется соотношением:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (2.61)$$

а общий коэффициент рассеяния этих обмоток

$$\sigma = 1 - K^2 = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}. \quad (2.62)$$

С учетом (2.62) общий коэффициент рассеяния обмотки возбуждения и демпферной обмотки по продольной оси (см. рисунок 2.22,а) можно представить в виде:

при разомкнутой статорной обмотке

$$\sigma_0 = 1 - \frac{X_{ad}^2}{X_f X_{1d}}. \quad (2.63)$$

при короткозамкнутой статорной обмотке

$$\sigma' = 1 - \frac{X_{ad}^2}{X_f - X_{1d}}. \quad (2.64)$$

К обобщенным параметрам СД относится следующее:

$X_d X_q$ — синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям;

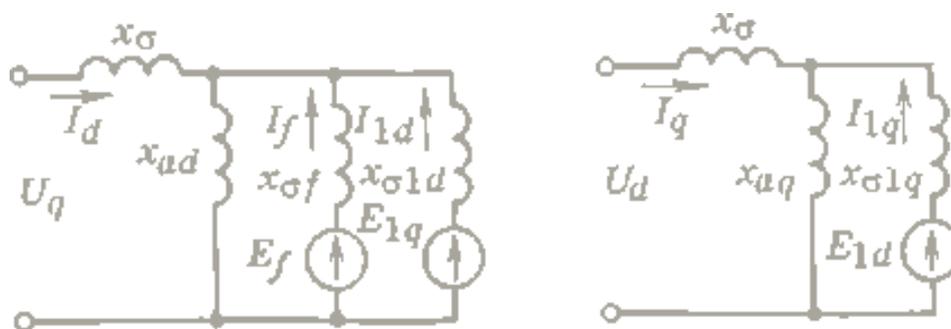
X'_{d0} , X'_d — переходные индуктивные сопротивления по продольной оси без учета и с учетом демпферной обмотки;

X''_d , X''_q — сверхпереходные сопротивления по продольной и поперечной осям.

Активное сопротивление статорной обмотки СД обычно может либо не учитываться (ввиду его малости), либо может быть отнесено к цепи питания двигателя. В этом случае исходные схемы замещения могут быть преобразованы к виду, представленному на рисунке 2.23. На схеме приняты обозначения:

I_{1d} и I_{1q} — приведенные к статору токи в демпферной обмотке по продольной и поперечной осям (в синхронном установившемся режиме равны нулю);

I_f – приведенный к статору ток в обмотке возбуждения;
 E_f – приведенная к статору эквивалентная ЭДС обмотки возбуждения;
 E_{1d} E_{1q} – приведенные к статору эквивалентные ЭДС демпферной обмотки по продольной и поперечной осям.



а)

б)

Рисунок 2.23 – Схемы замещения синхронной машины по продольной (а) и поперечной (б) осям

В схемах замещения СД (рисунок 2.23) одни и те же параметры режима могут быть выражены с помощью разных соотношений в зависимости от того, как рассматриваются процессы или режимы — относительно статора или ротора. В качестве примера рассмотрим эквивалентные ЭДС роторных обмоток.

Обобщенный вектор эквивалентной ЭДС обмотки возбуждения в соответствии с законом электромагнитной индукции

$$E_f = -d\psi_f / dt, \quad (2.55)$$

где

$$\psi_f = -I_d X_{ad} + I_f X_f + I_{1d} X_{ad} \quad (2.56)$$

– вектор суммарного магнитного потока, сцепленного с обмоткой возбуждения.

При рассмотрении процессов относительно статора обычно можно пренебречь частью ЭДС E_f , зависящей от скорости изменения амплитуды потока ψ_f ($d\psi_f / dt \approx 0$). Изменение вектора магнитного потока ψ_f проявляется в пространственном перемещении потока относительно статора с частотой ω_0 , поэтому дифференцирование вектора ψ_f равносильно его повороту на 90° ($d/dt = j\omega_0 = j$) и в относительных единицах

$$E_f = \psi_f \cdot \quad (2.57)$$

Ротор СД неподвижен в системе координат d, q . При рассмотрении процессов относительно ротора дифференцирование вектора ψ_f равносильно повороту его на 90° и пренебрегать скоростью изменения амплитуды потока $d\psi_f / dt$ нельзя. В этом и проявляется различие в

выражениях для одних и тех же параметров, характеризующих процессы относительно статора и ротора.

Электромагнитные переходные процессы в обмотке возбуждения описываются уравнением

$$d \psi_f / dt = U_f - I_f R_f \quad (2.58)$$

Соотношение (2.57) позволяет исключить из этого уравнения магнитный поток ψ_f , т.е. представить уравнение (2.58) в виде

$$d E_f / dt = U_f - I_f R_f \quad (2.59)$$

Эквивалентные ЭДС демпферной обмотки при рассмотрении процессов или режима относительно статора будут равны в относительных единицах суммарным магнитным потокам, сцепленным с этой обмоткой:

$$E_{1q} = \psi_{1d} = I_d X_{ad} + I_f X_{ad} + I_{1d} X_{1d} ; \quad (2.60)$$

$$E_{1d} = \psi_{1q} = - I_q X_{aq} - I_q X_{aq} . \quad (2.61)$$

Эквивалентные ЭДС демпферной обмотки при рассмотрении процессов или режима относительно статора будут равны в относительных единицах суммарным магнитным потокам, сцепленным с этой обмоткой:

$$d E_{1q} / dt = - I_{1d} R_{1d} ; \quad (2.62)$$

$$d E_{1d} / dt = - I_{1q} R_{1q} \quad (2.63)$$

2.5.2 Эквивалентные схемы замещения

В исходной схеме замещения СД по продольной оси ротора отражены три основных контура: обмотки статора, обмотки возбуждения и демпферной обмотки. В зависимости от способа преобразования этой схемы могут быть получены три эквивалентные схемы замещения, представленные на рисунке 2.24.

Если обмотку возбуждения и демпферную обмотку в схеме на рисунке 2.23, *a* заменить соответствующими источниками токов I_f и I_{1d} исходную схему можно преобразовать в эквивалентную (рисунок 2.24, *a*). В этой схеме E_q — синхронная ЭДС по поперечной оси, которая пропорциональна сцепленному со статорной обмоткой магнитному потоку, обусловленному токами в обмотках ротора по продольной оси. В соответствии со способом преобразования исходной схемы замещения СД по продольной оси

$$E_q = (I_f + I_{1d}) X_{ad} . \quad (2.64)$$

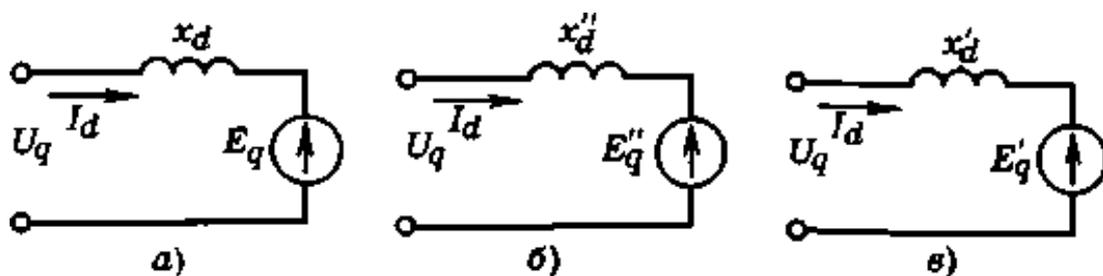


Рисунок 2.24 – Эквивалентные синхронная (а), сверхпереходная (б) и переходная (в) схемы замещения СМ

В синхронном установившемся режиме ($I_{1d} = 0$) эта ЭДС однозначно определяется током в обмотке возбуждения

$$E_q = I_f X_{ad}. \quad (2.65)$$

и играет главную роль в создании синхронного электромагнитного момента, что и нашло отражение в ее названии.

Сопротивление X_d , за которым приложена ЭДС E_q в эквивалентной схеме замещения, называется синхронным индуктивным сопротивлением по продольной оси и является полным индуктивным сопротивлением статорной обмотки по этой оси. В соответствии со способом преобразования оно определяется выражением

$$X_d = X_\sigma + X_{ad}. \quad (2.66)$$

Сопротивление X_d – характерный параметр СД и обычно приводится в каталожных данных двигателя.

Если при преобразовании исходной схемы объединить три параллельные ветви, получится эквивалентная схема замещения (рисунок 2.24, б), в которой E''_q – сверхпереходная ЭДС по поперечной оси, определяемая в соответствии со способом преобразования соотношением

$$\frac{E''_q}{X''_d - X_\sigma} = \frac{E_f}{X_{\sigma f}} + \frac{E_{1q}}{X_{\sigma 1d}}. \quad (2.67)$$

Используя выражения (2.57), (2.60), (2.64), после преобразований можно получить уравнение

$$E''_q = I_d (X_d - X''_d) + (I_f + I_{1d})X_{ad} = I_d(X_d - X''_d) + E_q. \quad (2.68)$$

Сверхпереходная ЭДС по поперечной оси E''_q пропорциональна суммарному магнитному потоку ψ''_d , сцепленному со статорной обмоткой по продольной оси. Суммарный магнитный поток обладает свойством

непрерывности, т.е. в первый момент после изменения режима он сохраняет свое значение, поэтому ЭДС тоже обладает свойством непрерывности:

$$E_q''(-0) = E_q''(+0), \quad (2.69)$$

где $E_q''(-0)$ – значение ЭДС в последний момент перед изменением режима;

$E_q''(+0)$ — значение ЭДС в первый момент после изменения режима.

Сопротивление X_d'' , за которым приложена ЭДС E_q'' в эквивалентной схеме замещения СД, называется сверхпереходным индуктивным сопротивлением и является входным индуктивным сопротивлением исходной схемы замещения. В соответствии со способом преобразования исходной схемы оно определяется соотношением

$$X_d'' = X_\sigma + \left(\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma 1d}} \right)^{-1}, \quad (2.70)$$

или эквивалентным ему выражением

$$X_d'' = X_d \frac{\sigma T_f T_{1d}}{\sigma_0 T_{f0} T_{1d0}}, \quad (2.71)$$

Сопротивление X_d'' – характерный параметр СД и обычно приводится в каталожных данных двигателя. Исторически сложившийся термин «сверхпереходные» отражает то обстоятельство, что в соответствующих ему параметрах учитывается влияние демпферной обмотки.

Отмечалось, что в схемах замещения СД одни и те же параметры режима могут быть выражены с помощью разных соотношений в зависимости от того, как рассматриваются процессы — относительно ротора или статора. В частности, при рассмотрении процессов со стороны статора уравнение (2.67) следует записать в виде

$$\frac{dE_q''/dt}{X_d'' - X_\sigma} = \frac{dE_f/dt}{X_{\sigma f}} + \frac{dE_{1q}/dt}{X_{\sigma 1d}} \quad (2.72)$$

Подставляя в это уравнение выражения (2.59) и (2.62) и обозначая первую производную от ЭДС E''_d , после преобразований получаем

$$T_{\sigma 1d} I_f + T_{\sigma f} I_{1d} = -\frac{T_{\sigma 1d} T_{\sigma f}}{X_d'' - X_\sigma} E'_\tau + \frac{T_{\sigma 1d}}{R_{f\sigma}} U_f, \quad (2.73)$$

где

$$T_{\sigma 1d} = X_{\sigma 1d} / R_f; \quad (2.74)$$

$$T_{\sigma f} = X_{\sigma f} / R_f; \quad (2.75)$$

– постоянные времени, определяемые индуктивными сопротивлениями рассеяния демпферной обмотки по продольной оси и обмотки возбуждения.

Рассматривая уравнения (2.64) и (2.73) как систему двух уравнений относительно токов I_f и I_{1d} получаем следующие выражения для их определения:

$$I_f = \frac{1}{T_{\sigma 1d} - T_{\sigma f}} \left[\frac{T_{\sigma 1d}}{R_f} U_f - \frac{T_{\sigma 1d} T_{\sigma f}}{X'_d - X_\sigma} E'_\tau - \frac{T_{\sigma f}}{X_{ad}} E_q \right]; \quad (2.76)$$

$$I_{1d} = \frac{1}{T_{\sigma 1d} - T_{\sigma f}} \left[-\frac{T_{\sigma 1d}}{R_f} U_f + \frac{T_{\sigma 1d} T_{\sigma f}}{X'_d - X_\sigma} E'_\tau + \frac{T_{\sigma 1d}}{X_{ad}} E_q \right]; \quad (2.77)$$

В синхронном установившемся режиме $I_f = U_f / R_f$ и $= 0$.

Преобразование к эквивалентной схеме, представленной на рисунке 2.24, в, рассмотрим вначале для случая отсутствия (либо неучета) демпферной обмотки ($R_{1d} = \infty$). Схема получается при объединении двух оставшихся параллельных ветвей в исходной схеме (см. рисунок 2.23, а). В этой эквивалентной схеме E'_q – переходная ЭДС по поперечной оси, определяемая в соответствии со способом преобразования соотношением

$$\frac{E'_q}{X''_{d0} - X_\sigma} = \frac{E_f}{X_{\sigma f}}. \quad (2.78)$$

Подставляя в это соотношение выражения (2.56), (2.57), после преобразований получаем

$$E'_q = I_d (X_d - X'_{d0}) + I_f X_{ad} = I_d (X_d - X'_{d0}) + E_q. \quad (2.79)$$

Переходная ЭДС E'_q пропорциональна суммарному магнитному потоку ψ'_d , сцепленному со статорной обмоткой по продольной оси, который при отсутствии демпферной обмотки остается неизменным в первый момент при любых изменениях режима. Поэтому и ЭДС E'_q при отсутствии демпферной обмотки сохраняет неизменным свое значение в первый момент после изменения режима, т.е. является связующим звеном между предшествующим (до изменения) и последующим (после изменения) режимами. Это и нашло отражение в термине «переходная».

Сопротивление X'_{d0} , за которым приложена ЭДС E'_q в эквивалентной схеме замещения, называется переходным индуктивным сопротивлением и является индуктивным сопротивлением статорной обмотки при короткозамкнутой обмотке возбуждения и разомкнутой демпферной обмотке. Это сопротивление в соответствии со способом преобразования исходной схемы определяется соотношением

$$X'_{d0} = X_{\sigma} + \left(\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} \right)^{-1} . \quad (2.80)$$

или с помощью эквивалентного ему выражения

$$X'_{d0} = X_{\sigma} \frac{T^f}{T_{f0}} . \quad (2.81)$$

Переходное сопротивление X'_{d0} (без учета демпферной обмотки) — характерный параметр СД и обычно приводится в каталожных данных двигателей.

Переходные ЭДС E'_q и сопротивление X'_d имеют вполне реальный физический смысл и при учете влияния демпферной обмотки. Ток в демпферной обмотке I_d ввиду магнитной связи с обмоткой возбуждения зависит от тока в обмотке возбуждения. Это приводит к изменению путей рассеяния магнитного потока обмотки возбуждения и, как следствие, к некоторому изменению значений E'_q и X'_d по сравнению со значениями для случая, когда демпферная обмотка отсутствует.

Преобразование исходной схемы замещения СД к эквивалентной с переходными параметрами с учетом влияния демпферной обмотки осуществляется следующим образом:

вначале продольная демпферная обмотка и обмотка возбуждения заменяются одной эквивалентной обмоткой возбуждения, в которой полностью учитывается влияние демпферной обмотки;

затем полученная схема преобразуется к эквивалентной (см. рисунок 2.24, в) так же, как при отсутствии демпферной обмотки.

Уравнения электромагнитных переходных процессов в обмотке возбуждения (2.59) и демпферной обмотке по продольной оси (2.62) можно преобразовать к виду:

$$X_{ad} \frac{d(I_f + I_{1d} + I_d)}{dt} = U_f - X_{\sigma f} \frac{dI_f}{dt} - I_f R_f ; \quad (2.82)$$

$$X_{ad} \frac{d(I_f + I_{1d} + I_d)}{dt} = -X_{\sigma 1d} \frac{dI_{1d}}{dt} - I_{1d} R_{1d} . \quad (2.83)$$

Умножая первое из этих уравнений на $R_{1d}/(R_f + R_{1d})$, второе — на $R_f/(R_f + R_{1d})$, и складывая их, получаем следующее уравнение:

$$X_{ad} \frac{d(I_f + I_{1d} + I_d)}{dt} = \frac{U_f R_{1d}}{R_f + R_{1d}} - \frac{X_{\sigma f} + R_{1d} + X_{\sigma 1d} R_f}{R_f + R_{1d}} \frac{d(I_f + I_{1d})}{dt} - \frac{R_f R_{1d}}{R_f + R_{1d}} (I_f + I_{1d}) + \frac{X_{\sigma 1d} R_f}{R_f + R_{1d}} \frac{dI_f}{dt} + \frac{X_{\sigma f} R_{1d}}{R_f + R_{1d}} \frac{dI_{1d}}{dt} \quad (2.84)$$

Это уравнение может рассматриваться как уравнение эквивалентной

обмотки возбуждения, в которой полностью учитывается влияние демпферной обмотки.

Параметры эквивалентной обмотки возбуждения обозначим следующим образом:

эквивалентное индуктивное сопротивление рассеяния

$$X_{\sigma f \varepsilon} = \frac{X_{\sigma f} R_{1d} + X_{\sigma 1d} R_f}{R_f + R_{1d}} ; \quad (2.85)$$

эквивалентное активное сопротивление

$$R_{f \varepsilon} = \frac{R_f R_{1d}}{R_f + R_{1d}} ; \quad (2.86)$$

эквивалентное напряжение на обмотке

$$U_{f \varepsilon} = \frac{U_f R_{1d}}{R_f + R_{1d}} + \frac{X_{\sigma 1d} R_f}{R_f + R_{1d}} \frac{dI_f}{dt} + \frac{X_{\sigma f} R_{1d}}{R_f + R_{1d}} \frac{dI_{1d}}{dt} \quad (2.87)$$

эквивалентный ток обмотки

$$I_{f \varepsilon} = I_f + I_{1d} . \quad (2.88)$$

С учетом принятых обозначений уравнение (2.84) можно записать в виде дифференциального уравнения переходных процессов в эквивалентной обмотке возбуждения

$$X_{ad} \frac{d(I_{f \varepsilon} + I_d)}{dt} = U_{f \varepsilon} - X_{\sigma f \varepsilon} \frac{dI_{f \varepsilon}}{dt} - I_{f \varepsilon} R_{f \varepsilon} . \quad (2.89)$$

Таким образом, с помощью проведенных преобразований удалось две обмотки ротора (возбуждения и демпферную по продольной оси) заменить одной эквивалентной, в которой полностью учтено влияние демпферной обмотки. Для полученной в результате преобразования исходной схемы замещения СД с эквивалентной обмоткой возбуждения справедлива эквивалентная схема (см. рисунок 2.24, в), в которой X'_d и E'_q – переходные индуктивное сопротивление и ЭДС по поперечной оси с учетом влияния демпферной обмотки по продольной оси:

$$X'_d = X_\sigma + \left(\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f \varepsilon}} \right)^{-1} = X_d \frac{T'_f T'_{1d}}{T_{f0} T_{1d0}} ; \quad (2.90)$$

$$E'_q = \frac{X'_d - X_\sigma}{X_{\sigma f \varepsilon}} E_{f \varepsilon} \quad (2.91)$$

Здесь $E_{f \varepsilon}$ ЭДС эквивалентной обмотки возбуждения, определяемая из

уравнения

$$\frac{dE_{f\varepsilon}}{dt} = U_{f\varepsilon} - I_{f\varepsilon}R_{f\varepsilon}. \quad (2.92)$$

После дифференцирования соотношения (2.91) получим

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{X'_d - X_\sigma}{X_{\sigma f\varepsilon}} \frac{dE_{f\varepsilon}}{dt} = \frac{X'_d - X_\sigma}{X_{\sigma f\varepsilon}} (U_{f\varepsilon} - X_{f\varepsilon}R_{f\varepsilon}) \quad (2.93)$$

Это уравнение после подстановки выражений (2.85)—(2.88) для эквивалентных параметров обмотки возбуждения можно преобразовать к следующему виду:

$$\frac{T_{\sigma f} + T_{\sigma 1d}}{X'_d - X_\sigma} \frac{dE'_q}{dt} + (I_f + I_{1d}) = \frac{U_f}{R_f} + T_{\sigma 1d} \frac{dI_f}{dt} + T_{\sigma 1d} \frac{dI_{1df}}{dt}. \quad (2.94)$$

С учетом соотношения

$$\frac{T_{\sigma f} + T_{\sigma 1d}}{X'_d - X_\sigma} X_{ad} = T_{f0} + T_{1d0}. \quad (2.95)$$

уравнение (2.94) можно упростить:

$$(T_{\sigma f} + T_{\sigma 1d}) \frac{dE'_q}{dt} + E_q = X_{ad} \left(T_{\sigma 1d} \frac{dI_f}{dt} + T_{\sigma f} \frac{dI_{1d}}{dt} \right) + X_{ad} \frac{U_f}{R_f}. \quad (2.96)$$

Дифференциальное уравнение (2.96) — уравнение электромагнитных переходных процессов в СД по продольной оси.

Влияние демпферной обмотки на электромагнитные процессы в СД проявляется в появлении быстрозатухающих (сверхпереходных) составляющих за счет увеличения порядка дифференциального уравнения и в изменении медленно затухающих (переходных) составляющих процесса. При пренебрежении быстрозатухающими (сверхпереходными) составляющими переходного процесса уравнение (2.96) упрощается:

$$(T_{\sigma f} + T_{\sigma 1d}) \frac{dE'_q}{dt} + E_q = X_{ad} \frac{U_f}{R_f}. \quad (2.97)$$

В этом случае электромагнитные переходные процессы по продольной оси определяются дифференциальным уравнением (2.97) первого порядка, а ЭДС E'_q сохраняет свое значение в первый момент при любых изменениях режима. Влияние демпферной обмотки при этом сказывается в изменении постоянной времени электромагнитного переходного процесса

$$T'_{d0} = T_{f0} + T_{1d0}. \quad (2.98)$$

и переходного сопротивления в соответствии с выражением (2.90).

При учете сверхпереходных составляющих уравнение электромагнитных переходных процессов по продольной оси является дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\sigma_0 T_{f0} T_{1d0} \frac{d^2 E_q''}{dt^2} + (T_{f0} + T_{1d0}) \frac{d E_q'}{dt} + E_q = \frac{X_{ad}}{R_f} \left(U_f + T_{\sigma 1d} \frac{dU_f}{dt} \right). \quad (2.99)$$

Это уравнение может быть получено после дифференцирования (2.80) с учетом выражения (2.96) и следующего соотношения:

$$\frac{T_{\sigma f} + T_{\sigma 1d}}{X_d'' - X_\sigma} X_{ad} = \sigma_0 T_{f0} T_{1d0}. \quad (2.100)$$

При учете сверхпереходных составляющих ЭДС E_q' не обладает свойством сохранять неизменным свое значение в первый момент при изменении режима СД, этим свойством обладает только ЭДС E_q'' .

В схеме замещения СД по поперечной оси ротора (см. рисунок 2.23, б) отражены два основных контура: обмотки статора и демпферной обмотки. В зависимости от способа преобразования этой исходной схемы могут быть получены две эквивалентные схемы замещения, приведенные на рисунке 2.25. В схеме, показанной на рисунке 2.25 а, E_d — синхронная ЭДС по продольной оси. Эта ЭДС вызвана сцепленным со статорной обмоткой по поперечной оси магнитным потоком, обусловленным током в демпферной обмотке,

$$E_d = -I_{dq} X_{aq}. \quad (2.101)$$

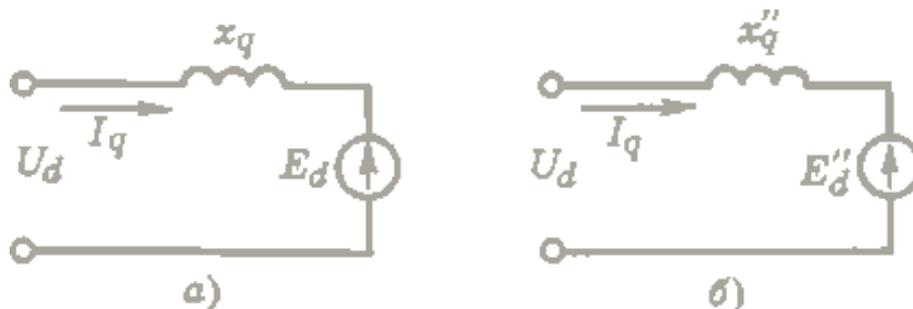


Рисунок 2.25 – Эквивалентные синхронная (а) и сверхпереходная (б) схемы замещения синхронной машины по поперечной оси

В синхронном установившемся режиме ($I_{dq} = 0$) ЭДС $E_d = 0$.

Сопротивление x_q , за которым приложена ЭДС E_d в эквивалентной схеме замещения, является синхронным индуктивным сопротивлением по поперечной оси СД, т.е. полным индуктивным сопротивлением статорной обмотки по этой оси. В соответствии со способом преобразования оно определяется соотношением

$$X_q = X_\sigma + X_{aq}. \quad (2.102)$$

Сопротивление x_q — характерный параметр СД и обычно приводится в каталожных данных двигателя.

В эквивалентной схеме замещения, приведенной на рисунке 1.6, б, E_d'' — сверхпереходная ЭДС по продольной оси. Для ее определения можно воспользоваться выражением

$$\frac{E_d''}{X_{dq}'' - X_\sigma} = \frac{E_{1d}}{X_{\sigma 1q}}. \quad (2.103)$$

Подставляя в это соотношение выражение (2.61), после преобразований получаем

$$E_d'' = -I_q(X_q - X_q'') - I_q X_{aq} = -I_q(X_q - X_q'') + E_d. \quad (2.104)$$

Сверхпереходная ЭДС E_d'' пропорциональна той части суммарного магнитного потока ψ_q'' , сцепленного со статорной обмоткой по поперечной оси, которая не может измениться скачком. Поэтому ЭДС E_d'' сохраняет неизменным свое значение в первый момент при любых изменениях режима, т.е.

$$E_d''(-0) = E_d''(+0). \quad (2.105)$$

Сопротивление X_q'' , за которым приложена ЭДС E_d'' в эквивалентной схеме замещения СД, называется сверхпереходным индуктивным сопротивлением по поперечной оси и является входным индуктивным сопротивлением исходной схемы замещения. В соответствии со способом преобразования исходной схемы замещения СД по поперечной оси оно определяется соотношениями:

$$X_q'' = X_\sigma + \left(\frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_{\sigma 1q}} \right)^{-1}. \quad (2.106)$$

или

$$X_q'' = X_{q\sigma} \frac{T_{1q}'}{T_{1q0}}. \quad (2.107)$$

Сопротивление X_q'' — характерный параметр СД и обычно указывается в каталожных данных двигателя.

Уравнение электромагнитных переходных процессов в СД по поперечной оси

$$T_{1q0} \frac{d E_d''}{dt} + E_d = 0. \quad (2.108)$$

может быть получено при дифференцировании по времени выражения (2.103) и учете соотношения (2.63), т.е. электромагнитные переходные процессы в СД по поперечной оси определяются дифференциальным уравнением первого порядка. Постоянная времени электромагнитного переходного процесса по поперечной оси T_{1q0} одновременно является постоянной времени демпферной обмотки.

Поскольку эквивалентные схемы замещения СД по продольной (см. рисунок 2.24) и поперечной (см. рисунок 2.25) осям различаются лишь способом преобразования исходной схемы замещения, они равноценны и взаимозаменяемы.

Однако ввиду различия свойств, входящих в эквивалентные схемы ЭДС, области рационального использования этих схем различаются. Исследования и расчеты синхронных установившихся режимов СД целесообразно осуществлять по схемам с синхронными ЭДС, т.е. по схемам, приведенным на рисунке 2.24, а и 2.25, а. Это объясняется тем, что значения синхронных ЭДС в таких режимах однозначно определяются током в обмотке возбуждения. Для анализа переходных процессов в СД рационально использовать схемы со сверхпереходными ЭДС, т.е. схемы, приведенные на рисунке 2.24, б и 2.25, б. В этом случае наиболее просто определяются начальные условия, соответствующие изменению режима.

Наименее употребительна при расчетах режимов СД эквивалентная схема с переходной ЭДС (рисунок 2.24, в). Ее можно рекомендовать при расчетах переходных процессов СД в случае, когда не учитываются быстрозатухающие сверхпереходные составляющие этих процессов.

2.5.3. Комплексные схемы замещения и расчет синхронного установившегося режима

Из эквивалентных схем замещения СД по продольной и поперечной осям (см. рисунок 2.24 и 2.25) могут быть получены следующие соотношения, характеризующие режим этих схем:

$$E_q = U_q - I_d X_d; \quad (2.109)$$

$$E'_q = U_q - I_d X'_d; \quad (2.110)$$

$$E''_q = U_q - I_d X''_d; \quad (2.111)$$

$$E_d = U_d - I_q X_q; \quad (2.112)$$

$$E''_d = U_d - I_q X''_q; \quad (2.113)$$

Принимая оси d и q ротора соответственно за действительную Re и мнимую I_m оси системы координат комплексной плоскости, векторы эквивалентных ЭДС СД в этой системе координат можно записать в следующем виде:

для синхронной ЭДС

$$E_c = E_d + jE_q; \quad (2.114)$$

для сверхпереходной ЭДС

$$E'' = E''_d + jE''_q. \quad (2.115)$$

Неявнополюсному СД ($x_d = x_q$) соответствует единое комплексное уравнение состояния

$$E_d + jE_q = (U_d + jU_q) - jX_d(I_d + jI_q), \quad (2.116)$$

или

$$E_c = U - jX_d I. \quad (2.117)$$

Этому уравнению соответствует эквивалентная комплексная схема замещения неявнополюсного СД (рисунок 2.26, а), в которой двигатель отображен синхронной ЭДС E_c , приложенной за синхронным сопротивлением X_d .

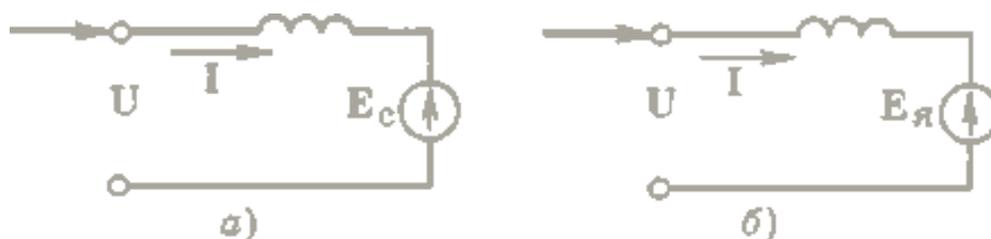


Рисунок 2.26 - Эквивалентные комплексные схемы замещения неявнополюсного (а) и явнополюсного (б) СД

Явнополюсному СД ($X_d \neq X_q$) также соответствует единое комплексное уравнение состояния

$$E_d + jeE_q = (U_d + jU_q) - jX_q(I_d + jI_q), \quad (2.118)$$

или

$$E_я = U - jX_q I, \quad (2.119)$$

где $E_{я}$ — вектор расчетной эквивалентной ЭДС явнополюсного СД. Проекция на ось d вектора этой ЭДС E_d — продольная составляющая синхронной ЭДС, а на ось q — расчетной ЭДС E_Q , приложенной за сопротивлением X_q и определяемой уравнением

$$E_Q = U_q - I_d X_q . \quad (2.120)$$

Эквивалентная ЭДС E_d не входит ни в одну из эквивалентных схем замещения СД по продольной оси (см. рисунок 2.24) и тем самым не соответствует реальным магнитным потокам в СД. В этом смысле она является только расчетной ЭДС и используется в расчетах синхронного установившегося режима двигателя. Эквивалентная комплексная схема замещения явнополюсного СД приведена на рисунке 2.26, б.

Продольную и поперечную составляющие напряжения можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} U_q &= U \cos \theta; \\ U_d &= -U \sin \theta, \end{aligned} \right\} \quad (2.121)$$

где θ — угол между вектором U и поперечной осью q ротора СД.

Из соотношений (2.109)—(2.113) и (2.120) с учетом (2.121) могут быть получены следующие выражения:

$$I_d = \frac{U \cos \theta - E_q}{X_d} = \frac{U \cos \theta - E_q''}{X_d''}; \quad (2.122)$$

$$I_d = \frac{U \sin \theta + E_q}{X_d} = \frac{U \sin \theta - E_q''}{X_d''}; \quad (2.123)$$

$$E_q = E_q'' \frac{X_d}{X_d''} - U \frac{X_d - X_d''}{X_d''} \cos \theta; \quad (2.124)$$

$$E_q' = E_q'' \frac{X_d'}{X_d''} - U \frac{X_d' - X_d''}{X_d''} \cos \theta; \quad (2.125)$$

$$E_q'' = E_q \frac{X_d''}{X_d} + U \frac{X_d - X_d''}{X_d} \cos \theta; \quad (2.126)$$

$$E_d = E_d'' \frac{X_{dq}}{X_q''} - U \frac{X_q - X_q''}{X_q''} \sin \theta; \quad (2.127)$$

$$E_d'' = E_d \frac{X_q''}{X_q} + U \frac{X_q - X_q''}{X_q} \sin \theta; \quad (2.128)$$

$$E_q = E_Q \frac{X_d}{X_q} - U \frac{X_d - X_q}{X_q} \cos \theta. \quad (2.129)$$

Полная мощность, потребляемая СД из сети при напряжении U и токе статора I , определяется по формуле

$$S = U \hat{I}, \quad (2.130)$$

где \hat{I} — сопряженный вектор тока статорной обмотки.

Из этого равенства следует:

$$\left. \begin{aligned} P &= U_q I_q + U_d I_d; \\ Q &= U_q I_d - U_d I_q. \end{aligned} \right\} \quad (2.131)$$

Используя ранее полученные выражения (2.121)—(2.123), активную и реактивную мощности, потребляемые двигателем из сети, можно представить в виде:

$$P = \frac{E_q U}{X_d} \sin \theta + \frac{E_d U}{X_q} \cos \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \sin 2\theta; \quad (2.132)$$

$$Q = -\frac{E_q U}{X_d} \cos \theta + \frac{E_d U}{X_q} \sin \theta + U^2 \left(\frac{\cos^2 \theta}{X_d} + \frac{\sin^2 \theta}{X_q} \right). \quad (2.133)$$

В синхронном установившемся режиме ($E_d = 0$) выражения для активной и реактивной мощности упрощаются:

$$P = \frac{E_q U}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \sin 2\theta; \quad (2.134)$$

$$Q = \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) - \frac{E_q U}{X_d} \cos \theta - \frac{U^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \cos 2\theta. \quad (2.135)$$

При расчетах синхронного установившегося режима СД в качестве основных исходных данных обычно можно принимать коэффициент загрузки по активной мощности K_3 и коэффициент мощности $\cos \varphi$ двигателя. В этом случае

$$P = K_3 \cos \varphi_N, \quad (2.136)$$

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.137)$$

причем положительное значение реактивной мощности соответствует потреблению, а отрицательное — генерации мощности. Эквивалентная ЭДС СД E_Q и угол θ могут быть рассчитаны по выражениям, полученным с помощью эквивалентной комплексной схемы замещения (см. рисунок 2.26):

$$E_Q = \sqrt{\left(U - \frac{Q X_q}{U} \right)^2 + \left(\frac{P X_q}{U} \right)^2}; \quad (2.138)$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{P_{X_q}/U}{U - Q_{X_q}/U}. \quad (2.139)$$

Остальные параметры синхронного установившегося режима двигателя могут быть определены по выражениям (2.121)—(2.129).

2.3 Выводы по главе 2

1. Выбран способ моделирования системы электроснабжения, основанный на представлении СПЭ трехуровневой иерархической структурой и позволяющий отобразить СПЭ произвольной конфигурации структуры и состояния в виде компактных матриц обобщенных параметров Z_{BAD} , Z_{BCD} и Z_y .

2. Для цеховых сетей электроснабжения напряжением до 1 кВ номенклатура элементов цеховой сети дополнена элементами типа трансформаторы тока, предохранители, автоматические выключатели (автоматы), контакторы, пускатели, рубильники, пакетные выключатели.

3. Проведена модернизация комплекса SEZAM с целью расчета статических характеристик потерь активной мощности и нагрузок.

4. Рассмотрены способы оптимизации расчетов режима СПЭ, заключающиеся в разрешении уравнений узловых напряжений относительно доминирующих параметров, использовании для расчетов метода Гаусса-Зейделя и в расчете оптимальных значений начального приближения для узловых напряжений.

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АДК) нашли широкое применение благодаря ряду преимуществ по сравнению с двигателями других типов. Они легче, дешевле, проще в изготовлении и эксплуатации, имеют достаточно высокие КПД и коэффициент мощности. Отсутствие контактных колец и щеточного аппарата делает эти двигатели наиболее надежными и долговечными.

3.1 Схема замещения и основные соотношения, характеризующие режим АДК

АДК может быть представлен двухконтурной схемой замещения (рисунок 1.1), которая характеризуется следующими параметрами: R_1 и $X_{\sigma 1}$ – активное и индуктивное сопротивления рассеяния статорной обмотки; R_{12} и X_{12} – активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания, характеризующие потери мощности в стали магнитной системы; $R_2(s)$ и $X_{\sigma 2}(s)$ – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки, приведенные к обмотке статора.

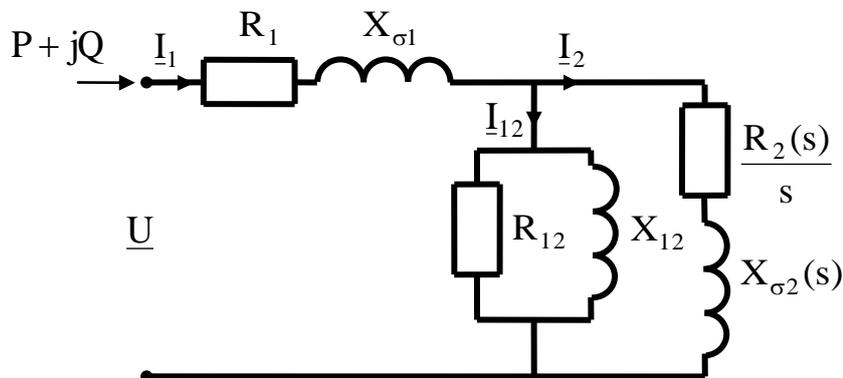


Рисунок 3.1 - Схема замещения АДК

В АДК необходимо учитывать явление поверхностного эффекта, т.е. вытеснение тока в роторной обмотке. Степень этого вытеснения зависит в основном от частоты наводимых в обмотке ротора токов, т.е. в конечном итоге от скольжения двигателя. Эффект вытеснения тока приводит к изменению активного сопротивления и индуктивного сопротивления рассеяния роторной обмотки в зависимости от скольжения двигателя s , что достаточно точно описывается следующими зависимостями

$$\left. \begin{aligned} R_2(s) &= R_{2c} + (R_{2п} - R_{2c})\sqrt{s}, \\ X_{\sigma 2}(s) &= \frac{X_{\sigma 2c} X_{\sigma 2п}}{X_{\sigma 2п} + (X_{\sigma 2c} - X_{\sigma 2п})\sqrt{s}}, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где $R_{2c}(X_{\sigma 2c})$ – сопротивления, соответствующие синхронному режиму ($s=0$); $R_{2п}(X_{\sigma 2п})$ – сопротивления, соответствующие режиму пуска ($s=1$).

Наряду с зависимостями (3.1) для описания закономерностей вытеснения тока в роторе АДК предлагаются также следующие выражения

$$\left. \begin{aligned} R_2(s) &= \sqrt{R_{2c}^2 + (R_{2п}^2 - R_{2c}^2)s}, \\ X_{\sigma 2}(s) &= \frac{X_{\sigma 2c} X_{\sigma 2п}}{\sqrt{X_{\sigma 2п}^2 + (X_{\sigma 2c}^2 - X_{\sigma 2п}^2)s}}, \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

поэтому предстоит выяснить, какие более подходящие для низковольтных АДК.

Исходными данными для расчета параметров схемы замещения АДК являются:

а) номинальные данные

P_N – номинальная активная мощность на валу АДК; U_N – номинальное напряжение статорной обмотки; $\cos \varphi_N$ – коэффициент мощности в номинальном режиме; η_N – коэффициент полезного действия в номинальном режиме АДК; s_N – скольжение АДК в номинальном режиме;

б) данные режима пуска

$I_{п}$ – кратность пускового тока в долях от номинального; $M_{п}$ – кратность пускового момента в долях от номинального;

в) данные критического режима АДК

M_{\max} – максимальный электромагнитный момент в долях от номинального.

Параметры схемы замещения и режима АДК определяются в относительных единицах. За базисные единицы приняты: номинальная полная мощность АДК

$$S_{\sigma} = S_N = \frac{P_N}{\cos \varphi_N \eta_N}; \quad (3.3)$$

и базисное сопротивление

$$Z_{\sigma} = \frac{U_N^2}{S_N}. \quad (3.4)$$

Исключение из этой системы относительных единиц целесообразно сделать для электромагнитного момента. Его принято выражать в долях от номинального полезного момента M_N на валу АДК.

Основные параметры режима АД могут быть представлены через параметры схемы замещения и скольжение по следующим соотношениям:

активная мощность, потребляемая из сети

$$P = U^2 \operatorname{Re} \left[\frac{1}{Z(s)} \right]; \quad (3.5)$$

реактивная мощность, потребляемая из сети

$$Q = U^2 \operatorname{Im} \left[\frac{1}{Z(s)} \right]; \quad (3.6)$$

ток статорной обмотки

$$I_1 = \frac{1}{|Z(s)|}; \quad (3.7)$$

электромагнитный момент

$$M = \frac{(1 - s_N)}{\eta_N \cos \varphi_N} \left[P - I_1^2 R_1 - U_{12}^2 / R_{12} \right] - \Delta M_{\text{мех}}, \quad (3.8)$$

где

$$Z(s) = R_1 + jX_{\sigma 1} + \left[\frac{1}{R_{12}} - j \frac{1}{X_{12}} + \frac{1}{\frac{R_2(s)}{s} + jX_{\sigma 2}(s)} \right]^{-1}, \quad (3.9)$$

эквивалентное комплексное сопротивление двигателя при скольжении s ,

$$U_{12} = \sqrt{\left(U - \frac{PR_1 + QX_{\sigma 1}}{U} \right)^2 + \left(\frac{PX_{\sigma 1} - QR_1}{U} \right)^2}, \quad (3.10)$$

напряжение на ветви намагничивания схемы замещения АДК,

$$\Delta M_{\text{мех}} = \frac{\Delta P_{\text{мех.N}}}{\eta_N \cos \varphi_N (1 - s_N)}, \quad (3.11)$$

момент сопротивления, обусловленный механическими потерями мощности в самом АДК ($\Delta P_{\text{мех}}$), который добавляется к моменту сопротивления механизма и вместе образуют полный момент сопротивления на валу АДК. В дальнейшем момент сопротивления $\Delta M_{\text{мех}}$ в рабочих режимах АДК принимается постоянным, т.е. не зависящим от скольжения и

поэтому его можно определить из номинального режима АДК.

Расчетные параметры режима, выражаются через параметры схемы замещения по следующим соотношениям:

пусковые электромагнитный момент и ток (при $s = 1$)

$$M_{n1} = \frac{(1-s_N)}{\eta_N \cos \varphi_N} \left[\operatorname{Re} \left[\frac{1}{Z(s)} \right] - I_n^2 R_1 - U_{12}^2 / R_{12} \right] - \Delta M_{\text{мех}}, \quad (3.12)$$

$$I_{n1} = \frac{1}{|Z(s)|}; \quad (3.13)$$

номинальные электромагнитный момент и реактивная мощность (при $s=s_N$)

$$M_{N1} = \frac{(1-s_N)}{\eta_N \cos \varphi_N} \left[\operatorname{Re} \left[\frac{1}{Z(s)} \right] - R_1 - U_{12N}^2 / R_{12} - \frac{\Delta P_{\text{мех.}N}}{1-s_N} \right], \quad (3.14)$$

$$Q_{N1} = I_m \left[\frac{1}{Z(s)} \right]; \quad (3.15)$$

баланса реактивной мощности АДК в номинальном режиме (при $s = 1$)

$$Q_N = Q_{X\sigma 1} + Q_{X_{12}} + Q_{X_{\sigma 2}},$$

(где $Q_{X\sigma 1}$, $Q_{X_{12}}$ и $Q_{X_{\sigma 2}}$ – составляющие реактивной мощности АДК, обусловленные соответственно сопротивлениями $X_{\sigma 1}$, X_{12} , $X_{\sigma 2}$), которое в номинальном режиме можно преобразовать к виду

$$\sin \varphi_N = X_{\sigma 1} + \frac{U_{12N}^2}{X_{12}} + \frac{U_{12N}^2 X_{\sigma 2N}}{\left(\frac{R_{2N}}{s_N} \right)^2 + (X_{\sigma 2N})^2}, \quad (3.16)$$

где R_{2N} и $X_{\sigma 2N}$ – сопротивления роторной обмотки в номинальном режиме, определяемые выражениями (1.1), (1.2) при $s = s_N$ и

U_{12N} – напряжение на ветви намагничивания в схеме замещения АДК в номинальном режиме, квадрат которого равен

$$U_{12N}^2 = (1 - R_1 \cos \varphi_N - X_{\sigma 1} \sin \varphi_N)^2 + (X_{\sigma 1} \cos \varphi_N - R_1 \sin \varphi_N)^2;$$

максимальный электромагнитный момент (при $s = s_{\text{кр}}$)

$$M_{\text{max}1} = \frac{(1-s_N)}{\eta_N \cos \varphi_N} \left[\operatorname{Re} \left(\frac{1}{\hat{Z}(s)} \right) - I_{\text{кр}}^2 R_1 - U_{12\text{кр}}^2 / R_{12} \right] - \Delta M_{\text{мех}}; \quad (3.17)$$

баланса потерь активной мощности в номинальном режиме АДК (при $s = s_N$)

$$\Delta P_{\Sigma N} = R_1 + \frac{U_{12N}^2}{R_{12}} + I_{2N}^2 R_{2N} + \Delta P_{\text{мех}}, \quad (3.18)$$

где $\Delta P_{\Sigma N}$ – потери активной мощности в номинальном режиме АДК в долях от S_N , определяемые выражением

$$\Delta P_{\Sigma N} = (1 - \eta_N) \cos \varphi_N. \quad (3.19)$$

Соотношения (3.12) – (3.18) могут рассматриваться как независимые нелинейные уравнения для определения параметров схемы замещения АДК. При правильно определенных параметрах схемы замещения расчетные параметры режима должны соответствовать каталожным данным, т.е. $M_{\text{п1}} = M_{\text{п}}; I_{\text{п1}} = I_{\text{п}}; M_{\text{N1}} = M_N = 1; Q_{\text{N1}} = Q_N = \sin \varphi_N; M_{\text{max1}} = M_{\text{max}}$.

Для определения параметров схемы замещения АДК ($R_1, X_{\sigma 1}, R_{12}, X_{12}, X_{\sigma 2c}, X_{\sigma 2п}, R_{2c}, R_{2п}, \Delta P_{\text{мех}}$) необходимо составить систему из девяти независимых уравнений и разрешить эту систему относительно параметров схемы замещения. В качестве семи уравнений можно использовать нелинейные уравнения (3.12) – (3.18), соответствующие каталожным данным АДК. Поскольку число каталожных данных меньше числа параметров схемы замещения, то эту систему уравнений необходимо дополнить еще двумя уравнениями, вытекающими из устойчивых соотношений между параметрами АДК. Для каждого из уравнений полученной системы необходимо: выделить доминирующий в этом уравнении параметр схемы замещения; преобразовать каждое уравнение к оптимальному виду, удобному для организации расчетов по методу последовательных приближений с быстрой сходимостью; определить начальное приближение – для доминирующего параметра схемы замещения в уравнении.

1. Преобразование уравнения (3.12) для пускового момента. Для пускового момента $M_{\text{п}}$ справедливо следующее приближенное выражение

$$M_{\text{п}} \cong \frac{(1 - s_N)}{\eta_N \cos \varphi_N} I_{\text{п}}^2 R_{2п}, \quad (3.20)$$

из которого следует, что в качестве доминирующего параметра в уравнении (3.12) следует принять сопротивление $R_{2п}$, а само уравнение преобразовать к следующему виду, удобному для организации итерационного процесса решения

$$R_{\text{п}} = R_{2п}^{(0)} \left(1 + \frac{\Delta M_{\text{п}}}{M_{\text{п}}} \right), \quad (3.21)$$

где $R_{2п}^{(0)}$ и $R_{2п}$ – предыдущее и последующее приближения решения; $\Delta M_{п} = M_{п} - M_{п1}$ – разность между каталожным и расчетным (по уравнению (3.12) значениями пускового момента (при сходимости итерационного процесса решения уравнения $\Delta M_{п} \rightarrow 0$). В качестве начального приближения сопротивления $R_{2п}$ можно принять значение, определяемое приближенным соотношением (3.20)

$$R_{2п}^{(0)} = \frac{M_{п} \cos \varphi_N \eta_N}{I_{п}^2 (1 - s_N)} \quad (3.22)$$

2. Преобразование уравнения (2.13) для пускового тока. Для пускового тока АДК справедливо следующее упрощенное выражение

$$\frac{1}{I_{п}} = Z_{п} \cong \sqrt{(R_1 + R_{2п})^2 + (X_{п}'')^2} \quad (3.23)$$

где $X_{п}''$ – сверхпереходное сопротивление АДК в пусковом режиме, определяемое через параметры схемы замещения по соотношению

$$X_{п}'' = X_{\sigma 1} + \frac{X_{\sigma 2п} X_{12}}{X_{\sigma 2п} + X_{12}} \cong X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2п} \quad (3.24)$$

Из выражения (3.23) следует, что в качестве доминирующего параметра в уравнении (3.13) целесообразно принять сопротивление $X_{п}''$, а само уравнение преобразовать к виду

$$X_{п}'' = X_{п}''^{(0)} \left(1 - \frac{\Delta I_{п}}{I_{п}} \right) \quad (3.25)$$

где $X_{п}''$ и $X_{п}''^{(0)}$ – последующее и предыдущее приближение решения; $\Delta I_{п} = I_{п} - I_{п1}$ – разность между каталожным и расчетным значениями пускового тока.

За начальное приближение сопротивления $X_{п}''^{(0)}$ можно принять значение, определяемое приближенным соотношением (3.23)

$$X_{п}''^{(0)} = \frac{1}{I_{п}} \sqrt{1 - I_{п}^2 (R_1^{(0)} + R_{2п}^{(0)})^2} \quad (3.26)$$

Начальное приближение сопротивления $R_1^{(0)}$ будет определено ниже. Между сопротивлением $X_{\sigma 1}$ и X''_{π} имеет место устойчивое приближенное соотношение

$$X_{\sigma 1} = 0,53 X''_{\pi}, \quad (3.27)$$

которое и может быть использовано в качестве одного из дополнительных недостающих уравнений – к системе уравнений (3.12) – (3.18) для определения параметров схемы замещения.

3. Преобразование уравнения (3.14) для номинального момента. Для номинального момента справедливо следующее упрощенное выражение

$$M_N = 1 \cong \frac{(1 - s_N)}{\eta_N \cos \varphi_N} \frac{s_N}{R_{2N} + 2R_1 s_N}, \quad (3.28)$$

где R_{2N} – активное сопротивление роторной обмотки при номинальном скольжении s_N . В качестве доминирующего параметра в уравнении (3.14) следует принять сопротивление R_{2N} , а само уравнение преобразовать к виду

$$R_{2N} = R_{2N}^{(0)} \left(1 - \frac{\Delta M_N}{1 - 2R_1 \eta_N \cos \varphi_N} \right), \quad (3.29)$$

где R_{2N} и $R_{2N}^{(0)}$ – последующее и предыдущее приближение решения; $\Delta M_N = 1 - M_{N1}$ – разность между каталожным и расчетным значением номинального момента.

Для определения начального приближения сопротивления $R_{2N}^{(0)}$ воспользуемся следующими закономерностями номинального режима АДК.

Полезная мощность на валу АДК в номинальном режиме составит

$$P_{в.Н} = \eta_N \cos \varphi_N. \quad (3.30)$$

Активная мощность в роторной обмотке АДК в номинальном режиме равна

$$P_{2N} = P_{в.Н} + \Delta P_{2N} + \Delta P_{\text{мех.Н}}, \quad (3.31)$$

где P_{2N} – потери мощности в роторной обмотке АДК в номинальном режиме, равные

$$\Delta P_{2N} = P_{2N} s_N. \quad (3.32)$$

Из выражений (2.30) – (2.32) вытекает

$$P_{2N} = \frac{\eta_N \cos \varphi_N + \Delta P_{\text{мех.}N}}{1 - s_N}, \quad (3.33)$$

$$\Delta P_{2N} = \frac{\eta_N \cos \varphi_N + \Delta P_{\text{мех.}N}}{(1 - s_N)} s_N. \quad (3.34)$$

С другой стороны, потери ΔP_{2N} могут быть определены следующим образом

$$\Delta P_{2N} = I_{2N}^2 R_{2N} = \frac{U_{12N}^2}{\left(\frac{R_{2N}}{s_N}\right)^2 + (x_{\sigma 2N})^2} R_{2N}. \quad (3.35)$$

Пренебрегая в (1.35) значением $(x_{\sigma 2N})^2$ ввиду выполнения неравенства

$$\left(\frac{R_{2N}}{s_N}\right)^2 \gg (x_{\sigma 2N})^2,$$

из выражений (1.34), (1.35) вытекает

$$R_{2N}^{(0)} = \frac{U_{12N}^2 s_N (1 - s_N)}{\cos \varphi_N \eta_N + \Delta P_{\text{мех.}}} \quad (3.36)$$

По известным значениям сопротивлений R_{2N} и $R_{2\pi}$ из первого уравнения системы (2.1) или (2.2) можно вычислить значение сопротивления R_{2c} .

$$\left. \begin{aligned} R_{2c} &= \frac{R_{2N} - R_{2\pi} \sqrt{s_N}}{1 - \sqrt{s_N}} \\ \text{или} \\ R_{2c} &= \sqrt{\frac{R_{2N}^2 - R_{2\pi}^2 s_N}{1 - s_N}} \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

4. Преобразование уравнения (3.15) для номинальной реактивной мощности. Из выражения (3.16) вытекает соотношение

$$X_{12} = \frac{U_{12N}^2}{Q_N - X_{\sigma 1} - \frac{U_{12N}^2 X_{\sigma 2N}}{\left(\frac{R_{2N}}{s_N}\right)^2 + (X_{\sigma 2N})^2}}, \quad (3.38)$$

из которого следует, что в качестве доминирующего параметра уравнения (3.15) можно принять величину X_{12} , а само уравнение преобразовать к виду

$$X_{12} = X_{12}^{(0)} \left(1 - \frac{X_{12}^{(0)}}{U_{12N}^2} \Delta Q_N \right), \quad (3.39)$$

где X_{12} и $X_{12}^{(0)}$ - последующее и предыдущее приближения решения;

$\Delta Q_N = \sin \varphi_N - Q_{N1}$ - разность между каталожным и расчетным значениями реактивной мощности АДК в номинальном режиме.

За начальное приближение сопротивления x_{12} можно принять значение, следующее из выражения (3.30) при упрощениях

$$X_{12}^{(0)} = \frac{U_{12N}^2}{\sin \varphi_N - X_{\Pi}''}, \quad (3.40)$$

где

$$U_{12N}^2 = (1 - \cos \varphi_N R_1 - \sin \varphi_N X_{\sigma 1})^2 + (\cos \varphi_N X_{\sigma 1} - \sin \varphi_N R_1)^2. \quad (3.41)$$

5. Преобразование уравнения (3.16) баланса реактивной мощности АДК в номинальном режиме. Уравнение (3.16) с учетом выражений (3.34) и (3.35) можно преобразовать к виду

$$\sin \varphi_N = X_{\sigma 1} + \frac{U_{12N}^2}{X_{12}} + \frac{\eta_N \cos \varphi_N + \Delta P_{\text{мех}}}{(1 - s_N) R_{2N}} s_N X_{\sigma 2N} \quad (3.42)$$

и разрешать его относительно сопротивления $X_{\sigma 2N}$

$$X_{\sigma 2N} = \frac{(\sin \varphi_N - X_{\sigma 1} - U_{12N}^2 / X_{12})(1 - s_N) R_{2N}}{s_N (\eta_N \cos \varphi_N + \Delta P_{\text{мех. N}})}. \quad (3.43)$$

В отличие от уравнений (31.21), (3.25), (3.29), (3.39) выражение (3.43) не является итерационным, а однозначно определяет величину $X_{\sigma 2N}$ через другие параметры схемы замещения и каталожные данные АДК. По известным значениям сопротивлений $X_{\sigma 2N}$ и $X_{\sigma 2П}$ из вторых уравнений систем (3.1) или (3.2) можно вычислить значение $X_{\sigma 2c}$

$$\left. \begin{aligned} X_{\sigma 2c} &= \frac{X_{\sigma 2N} X_{\sigma 2П} (1 - \sqrt{s_N})}{X_{\sigma 2П} - X_{\sigma 2N} \sqrt{s_N}} \\ \text{или} \\ X_{\sigma 2c} &= \frac{X_{\sigma 2N} X_{\sigma 2П} (\sqrt{1 - s_N})}{\sqrt{X_{\sigma 2П}^2 - X_{\sigma 2N}^2 s_N}} \end{aligned} \right\} \quad (3.44)$$

6. Преобразование уравнения (3.17) для максимального электромагнитного момента. Для максимального момента справедливо следующее приближенное соотношение

$$M_{\max} \cong \frac{(1 - s_N) \sqrt{R_1^2 + (X_{\text{кр}}'')^2} - R_1}{\eta_N \cos \varphi_N 2X_{\text{кр}}''} \quad (3.45)$$

где $X_{\text{кр}}''$ – сверхпереходное сопротивление АДК при критическом скольжении ($s=s_{\text{кр}}$). Из этого соотношения следует, что в качестве доминирующего параметра уравнения (3.17) можно принять сопротивление R_1 , а само уравнение преобразовать к следующему виду

$$R_1 = R_1^{(0)} \left(1 - \frac{\sqrt{(R_1^{(0)})^2 + (X_{\text{кр}}'')^2}}{R_1^{(0)}} \frac{\Delta M_{\max}}{M_{\max}} \right) \quad (3.46)$$

где R_1 и $R_1^{(0)}$ – последующее и предыдущее приближенное сопротивления R_1 ;

$\Delta M_{\max} = M_{\max} - M_{\max 1}$ – разность между каталожным и расчетным значениями максимального электромагнитного момента АДК. За начальное приближение сопротивления R_1 при расчетах по формуле (3.46), можно принять значение, определяемое выражением (3.45).

$$R_1^{(0)} = \frac{1 - 4 \left(M_{\max} X_{\text{кр}}'' \frac{\eta_N \cos \varphi_N}{1 - s_N} \right)^2}{4 M_{\max} \frac{\eta_N \cos \varphi_N}{1 - s_N}} \quad (3.47)$$

При расчете сопротивления $X_{\text{кр}}''$ в качестве критического скольжения можно принять $s_{\text{кр}} = M_{\max} s_N$.

Следует заметить, что в соответствии с выражением (3.47) значение сопротивления R_1 существенно зависит от значения максимального электромагнитного момента M_{\max} и сверхпереходного сопротивления $X_{\text{кр}}''$. При изменении M_{\max} на $\pm 10\%$ значение R_1 изменяется на $\pm 20\%$. При изменении $X_{\text{кр}}''$ на $\pm 10\%$ значение R_1 также изменяется на $\pm 10\%$. Стандарты на асинхронные двигатели общего назначения допускают отличие реальных значений параметров от указанных в каталожных данных на: по пусковому моменту – 15%; по пусковому току – 20%; по максимальному электромагнитному моменту – 10%. При таких нормах допустимого разброса каталожных данных разброс в значениях сопротивления R_1 составляет $\pm 40\%$. Поэтому наряду по способом расчета сопротивления R_1 , основанном на выражениях (3.46), (3.47), целесообразно использовать способ расчета сопротивления R_1 . Суть этого способа основана на закономерностях изменения массогабаритных размеров и составляющих потерь электрической энергии в серии АДК. При постоянстве плотности тока в статорной обмотке и максимальной электромагнитной индукции для АДК потери мощности в статорной обмотке, отнесенные к полной номинальной мощности двигателя $S_{\text{ном}}$ (а следовательно и активное сопротивление статорной обмотки R_1) изменяются по степенной зависимости от $S_{\text{ном}}$ с показателем степени (-0,25). Анализ совокупности двигателей серии 4А основного исполнения показал, что сопротивление R_1 с хорошим среднеквадратичным отклонением ($R^2 = 0,8279$) может быть определено по формуле

$$R_1 = 0,0802 \cdot S_{\text{ном}}^{(-0,2406)} \quad (3.48)$$

Отличие формулы (2.48) от теоретической (с показателем степени (-0,25)) объясняется тем, что ни плотность тока, ни максимальная индукция в сериях АДК не остается постоянной.

Таким образом, необходимо проанализировать методики расчета сопротивления R_1 , основанную на формулах (3.46), (3.47) и основанную на формуле (3.48) – и выбрать из них наиболее подходящую к целям расчета статических характеристик потерь мощности в цеховых СЭС.

7. Преобразование уравнения (3.18) для баланса потерь активной

мощности в номинальном режиме АДК.

Сумма потерь мощности в стали $\Delta P_{12,N}$ и механических потерь мощности $\Delta P_{\text{мех.}N}$ в номинальном режиме, которую условно можно назвать потерями мощности холостого хода в номинальном режиме $\Delta P_{x,N}$, как следует из уравнения баланса потерь мощности (3.18), равна

$$\Delta P_{x,N} = \Delta P_{\Sigma N} - \Delta P_{1N} - \Delta P_{2N}, \quad (3.49)$$

где

$$\Delta P_{\Sigma N} = (1 - \eta_N) \cos \varphi_N - \quad (3.50)$$

суммарные потери мощности в номинальном режиме АДК;

$$\Delta P_{1N} = R_1 - \quad (3.51)$$

потери мощности в статорной обмотке в номинальном режиме АДК;

$$\Delta P_{2N} = \frac{\eta_N \cos \varphi_N + \Delta P_{\text{мех.}N}}{(1 - s_N)} s_N - \quad (3.52)$$

потери мощности в обмотке ротора в номинальном режиме АДК.

Механические потери мощности и потери мощности в стали АДК составляют устойчивую долю от потерь $\Delta P_{x,N}$, в среднем

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\text{мех.}N} &= 0,3 \Delta P_{x,N}, \\ \Delta P_{12,N} &= 0,7 \Delta P_{x,N}. \end{aligned} \right\} \quad (3.53)$$

Выражение (3.52) наряду с (3.27), основанное на устойчивых соотношениях между параметрами АДК, может быть использовано в качестве второго из недостающих уравнений к системе уравнений (3.12) – (3.18) для определения параметров схемы замещения АДК.

Из выражений (3.49) – (3.53) следует

$$\Delta P_{\text{мех.}N} = \frac{0,3 \left[\cos \varphi_N \left(1 - \frac{\eta_N}{1 - s_N} \right) - R_1 \right]}{1 + 0,3 s_N / (1 - s_N)}, \quad (3.54)$$

$$\Delta P_{12N} = \frac{0,7 \left[\cos \varphi_N \left(1 - \frac{\eta_N}{1 - s_N} \right) - R_1 \right]}{1 + 0,3 s_N / (1 - s_N)}, \quad (3.55)$$

$$R_{12} = \frac{U_{12N}^2}{\Delta P_{12N}} . \quad (3.56)$$

Итак, составлена система из девяти независимых уравнений, которая позволяет определить все девять параметров схемы замещения АДК.

Расчеты по методу последовательных приближений продолжаются до тех пор, пока не будет выполнено условие

$$|\Delta M_n| U |\Delta I_n| U |\Delta M_N| U |\Delta Q_N| < \varepsilon ,$$

где $\varepsilon = 0,001$ – заданная точность по методу последовательных приближений.

Для окончательного выбора алгоритма расчета параметров схемы замещения АДК необходимо:

1. Выбрать из выражений (3.1) или (3.2) закономерности учета вытеснения тока в роторе наиболее подходящие для низковольтных АДК.

2. Исследовать методики расчета сопротивления R_1 , одна из которых основана на выражениях (3.46), (3.47), а другая (3.48), и выбрать подходящую к целям расчета статических характеристик потерь мощности в цеховых СЭС.

3.2 Оценка алгоритмов расчета параметров схемы замещения низковольтных АДК

Среди алгоритмов расчета параметров схемы замещения АДК, представленных в предыдущем разделе, необходимо выбрать наиболее подходящий целям расчета статических характеристик потерь мощности в цеховых СЭС. Что понимать под словами "наиболее подходящий"? При допустимом разбросе каталожных параметров АДК от $\pm 10\%$ до $\pm 20\%$, для различных исполнений, различных синхронных скоростей вращения ротора и различных номинальных мощностей АДК параметры схемы замещения должны отражать среднюю тенденцию изменения отдельных составляющих потерь мощности, в рамках суммарных потерь, определяемых КПД АДК. Здесь важна не точность определения параметров схемы замещения каждого АДК (она при использовании в качестве исходных данных каталожных параметров относительна, что обусловлено их допустимым разбросом), а средняя тенденция их изменения на большой совокупности АДК. В цеховых СЭС имеются от нескольких десятков до сотен АДК, а при сохранении средних тенденций в изменениях параметров схемы замещения погрешности от определения составляющих потерь в отдельных двигателях, в суммарных потерях мощности для такого количества АДК взаимно ликвидируются.

Для расчетных исследований были составлены четыре программы для

персональных ЭВМ, реализующих все четыре модификации алгоритмов:

- программа PAD1 (параметры асинхронных двигателей) реализует алгоритм, в котором вытеснение тока в роторе учитывается по выражениям (3.1), а расчет активного сопротивления статорной обмотки R_1 осуществляется по выражениям (3.46), (3.47) через максимальный электромагнитный момент M_{\max} ;

- программа PAD2 реализует алгоритм, в котором вытеснение тока в роторе учитывается по выражению (3.2), а расчет сопротивления R_1 осуществляется по выражениям (3.46), (3.47);

- программа PAD3 реализует алгоритм, в котором вытеснение тока в роторе учитывается по выражениям (3.1), а расчет активного сопротивления статорной обмотки R_1 осуществляется по выражению (3.48) в виде степенной функции от полной номинальной мощности двигателя $S_{\text{ном}}$;

- программа PAD4 реализует алгоритм, в котором вытеснение тока в роторе учитывается по выражению (3.2), а расчет сопротивления R_1 - по выражению (3.48).

Таким образом, программы PAD1 и PAD2 (соответственно PAD3 и PAD4) различаются только способом учета вытеснения тока в роторе, а программы PAD1 и PAD3 (соответственно PAD2 и PAD4) - способом расчета активного сопротивления статорной обмотки. В остальном алгоритмы всех программ одинаковы. Рассмотрим параметры ряда АДК различающиеся номинальной мощностью более чем в 400 раз.

АДК1: $P_{\text{ном}} = 132$ кВт; $\cos \varphi_N = 0,85$; $\eta_N = 0,935$; $s_N = 0,013$; $I_{\text{п}} = 6,5$; $M_{\text{п}} = 1,2$; $M_{\max} = 3,1$.

Активные сопротивления схемы замещения АДК, рассчитываемые по всем четырем программам представлены в таблице 3.1, а реактивные – в таблице 3.2.

Таблица 3.1 - Активные сопротивления схемы замещения АДК

	R_1	$R_{2\text{п}}$	$R_{2\text{N}}$	$R_{2\text{с}}$	R_{12}	$\Delta P_{\text{мех}}$
PAD1	0,0279	0,0244	0,014	0,0126	74,74	0,005
PAD2	0,0205	0,0245	0,0141	0,0139	52,74	0,072
PAD3	0,0234	0,0245	0,0141	0,0127	59,46	0,0064
PAD4	0,0234	0,0245	0,0141	0,0139	59,46	0,0064
PAD1	0,0234	0,0245	0,0141	0,0127	59,53	0,0064
PAD2	0,0234	0,0245	0,0141	0,0139	59,19	0,0064

Две последние строки в таблице 3.1, 3.2 соответствуют исходным данным, когда все каталожные параметры АДК приняты прежними, за исключением максимального момента M_{\max} , который для программы PAD1 равен $M_{\max} = 3,145$, а для программы PAD2 - $M_{\max} = 3,076$.

Таблица 3.2 - Реактивные сопротивления схемы замещения АДК

	$X_{\sigma 1}$	$X_{\sigma 2п}$	$X_{\sigma 2N}$	$X_{\sigma 2с}$	X_{12}	$X''_{п}$
PAD1	0,077	0,0701	0,0893	0,0926	2,30	0,145
PAD2	0,0782	0,0712	0,0932	0,0936	2,35	0,1473
PAD3	0,0778	0,0708	0,0891	0,0922	2,315	0,1465
PAD4	0,0778	0,0708	0,0901	0,0904	2,32	0,1465
PAD1	0,0778	0,0708	0,091	0,0945	2,32	0,1464
PAD2	0,0778	0,0708	0,092	0,0925	2,32	0,1465

Из анализа рассчитанных параметров схемы замещения АДК следует, что программы PAD1 и PAD2 очень чувствительны к значению максимального момента. При изменении в программе PAD1 M_{\max} со значения $M_{\max}=3,1$ до значения $M_{\max}=3,145$, т.е. на 1,45% значение активного сопротивления статорной обмотки изменяется с $R_1 = 0,0279$ до $R_1 = 0,0234$, т.е. на 16,2 %. Аналогично для программы PAD2: при изменении максимального момента с $M_{\max} = 3,1$ до $M_{\max} = 3,076$, т.е. на 0,77 % значение сопротивления R_1 меняется с $R_1 = 0,0205$ до $R_1 = 0,0234$, т.е. на 14,15 %. Допустимое отклонение максимального момента реального АДК от каталожных данных составляет $\pm 10\%$. При таком разбросе максимального момента разброс сопротивлений R_1 по программам PAD1 и PAD2 превышает разумные пределы. Следовательно, использование максимального момента (т.е. выражений (3.46), (3.47)) для расчета активного сопротивления статорной обмотки при существующих нормах допустимого разброса реальных значений M_{\max} для АДК одного типа не представляется возможным.

Сравнивая способы учета вытеснения тока в роторе по формулам (3.1) и (3.2) следует отметить, что при использовании формул (3.2) (программы PAD2 и PAD4) значения активных и реактивных сопротивлений обмотки ротора в синхронном (с индексом "с") и номинальном (с индексом "N") режимах практически совпадают, в то время как при использовании формул (3.2) (программы PAD1 и PAD3) эти значения различаются более существенно. Общая теория вытеснения тока в обмотках ротора показывает, что при изменении скольжения в рабочих режимах АДК (от $s=0$ до $s = s_N$) вытеснения тока в обмотках ротора практически не происходит, а изменения параметров роторной обмотки существенно сказывается лишь при скольжениях $s > s_{кр}$. Этому выводу теории лучше соответствует способ учета вытеснения тока в обмотках ротора, основанный на выражениях (3.2). Следовательно, наиболее подходящую целям расчета статических характеристик потерь мощности в цеховых СЭС следует признать программу PAD4.

Проверим эти выводы на других АДК.

АДК2: $P_{ном} = 55$ кВт; $\cos \varphi_N = 0,79$; $\eta_N = 0,92$; $s_N = 0,018$; $I_{п} = 5,5$; $M_{п} = 1,3$; $M_{\max} = 2,7$.

Активные сопротивления схемы замещения АДК, рассчитываемые по всем четырем программам представлены в таблице 3.3, а реактивные – в

таблице 3.4. Две последние строки таблицы соответствуют измененному по сравнению с каталожными данными максимальному моменту: для программы PAD1 $M_{\max} = 2,767$, для программы PAD2 $M_{\max} = 2,685$.

Таблица 3.3 - Активные сопротивления схемы замещения АДК

	R_1	$R_{2п}$	R_{2N}	R_{2c}	R_{12}	$\Delta P_{\text{мех}}$
PAD1	0,0392	0,0348	0,0201	0,0178	112,86	0,0032
PAD2	0,0253	0,0349	0,0204	0,02	50,13	0,0073
PAD3	0,0283	0,0349	0,0203	0,0181	56,84	0,0064
PAD4	0,0283	0,0349	0,0203	0,02	56,84	0,0064
PAD1	0,0283	0,0349	0,0203	0,0181	56,82	0,0064
PAD2	0,0283	0,0349	0,0203	0,02	56,83	0,0064

Таблица 3.4 - Индуктивные сопротивления схемы замещения АДК

	$X_{\sigma 1}$	$X_{\sigma 2п}$	$X_{\sigma 2N}$	$X_{\sigma 2c}$	X_{12}	X''_{Π}
PAD1	0,0886	0,0816	0,1135	0,1208	1,87	0,1668
PAD2	0,0913	0,0842	0,1208	0,122	1,94	0,172
PAD3	0,0908	0,0837	0,1167	0,1242	1,92	0,171
PAD4	0,0908	0,0837	0,1185	0,1196	1,92	0,171
PAD1	0,0908	0,0837	0,1184	0,1265	1,92	0,171
PAD2	0,0908	0,0837	0,1193	0,1205	1,92	0,171

Для АДК меньшей мощности при расчетах параметров схемы замещения сохраняются те же тенденции. Программы PAD1 и PAD2 очень чувствительны к вариациям максимального момента. При изменении максимального момента с $M_{\max}=2,7$ до $M_{\max}=2,767$, т.е. на 2,48 % в программе PAD1 значение активного сопротивления статорной обмотки изменяется с $R_1=0,0392$ до $R_1=0,0283$, т.е. на 27,8 %. Аналогично для программы PAD2: при изменении с $M_{\max}=2,7$ до $M_{\max}=2,685$, т.е. на 0,55 % значение активного сопротивления статорной обмотки изменяется с $R_1=0,0253$ до $R_1=0,0283$, т.е. на 11,6 %. Следовательно, использование программ PAD1 и PAD2 в условиях допустимых норм отклонений реальных значений M_{\max} от каталожных представляется недопустимым, поскольку значение сопротивления R_1 при таких отклонениях M_{\max} может выйти за допустимые пределы. Способ учета вытеснения тока в роторе, основанный на выражениях (3.2), лучше соответствует общим закономерностям вытеснения тока и для расчета параметров схемы замещения АДК предпочтение следует отдать программе PAD4.

Следующий двигатель АДК3 с каталожными данными: $P_{\text{ном}} = 15$ кВт; $\cos \varphi_N = 0,85$; $\eta_N = 0,87$; $s_N = 0,026$; $I_{\Pi} = 5,5$; $M_{\Pi} = 1,5$; $M_{\max} = 2,7$. В таблице 3.3а,б представлены расчетные параметры схемы замещения. Последние строки таблиц соответствуют измененному по сравнению с каталожными данными максимальному моменту: для программы PAD1 $M_{\max} = 2,785$, для программы PAD2 $M_{\max} = 2,712$.

Из анализа данных таблице 3.5, 3.6 можно сделать следующие выводы: программы PAD1 и PAD2 очень чувствительны к вариации максимального момента; способ учета вытеснения тока в роторе, основанный на выражении (3.2) лучше отражает картину общей теории вытеснения тока; предпочтение следует отдать программе PAD4.

Таблица 3.5 - Активные сопротивления схемы замещения АДК

	R_1	$R_{2п}$	R_{2N}	R_{2c}	R_{12}	$\Delta P_{мех}$
PAD1	0,0363	0,0399	0,0292	0,0271	23,84	0,0153
PAD2	0,0224	0,04	0,0297	0,0293	19,19	0,0194
PAD3	0,0385	0,0399	0,0291	0,0271	24,85	0,0146
PAD4	0,0385	0,0398	0,0291	0,0288	24,85	0,0146
PAD1	0,0386	0,0398	0,0291	0,0271	24,88	0,0146
PAD2	0,0385	0,0399	0,0291	0,0288	24,85	0,0146

Таблица 3.6 - Индуктивные сопротивления схемы замещения АДК

	$X_{\sigma 1}$	$X_{\sigma 2п}$	$X_{\sigma 2N}$	$X_{\sigma 2c}$	X_{12}	$X''_{п}$
PAD1	0,0881	0,0808	0,1128	0,1221	2,07	0,1659
PAD2	0,091	0,0835	0,1205	0,1223	2,16	0,1714
PAD3	0,0876	0,0803	0,1118	0,1209	2,06	0,1649
PAD4	0,0876	0,0803	0,1136	0,1151	2,07	0,1649
PAD1	0,0875	0,0803	0,1118	0,1209	2,06	0,1649
PAD2	0,0876	0,0803	0,1128	0,1143	2,07	0,1649

Таблица 3.7- Активные сопротивления схемы замещения АДК

	R_1	$R_{2п}$	R_{2N}	R_{2c}	R_{12}	$\Delta P_{мех}$
PAD1	0,0486	0,0464	0,0455	0,0453	17,11	0,0686
PAD2	0,0340	0,0466	0,0462	0,0462	14,47	0,0249
PAD3	0,0521	0,0463	0,0454	0,0451	17,91	0,0196
PAD4	0,0521	0,0463	0,0453	0,0453	17,91	0,0196
PAD1	0,0521	0,0463	0,0454	0,0451	17,93	0,0196
PAD2	0,0521	0,0463	0,0454	0,0453	17,93	0,0196

Следующий двигатель АДК4 с каталожными данными: $R_{ном} = 4$ кВт; $\cos \varphi_n = 0,81$; $\eta_N = 0,82$; $s_N = 0,04$; $I_n = 5,0$; $M_n = 1,5$; $M_{max} = 2,6$. В таблице 3.7,б представлены параметры схемы замещения. Две последние строки таблиц соответствуют измененному максимальному моменту: для программы PAD1 $M_{max} = 2,582$, для программы PAD2 $M_{max} = 2,52$. При изменении с $M_{max}=2,6$ до $M_{max}=2,582$, т.е. на 0,69% сопротивление R_1 при расчетах по программе PAD1 изменяется с $R_1= 0,0486$ до $R_1=0,0521$, т.е. на 7,2 %. Программа PAD2 дает изменение с $R_1=0,034$ до $R_1 =0,0521$, т.е. на 53 %, при изменении максимального момента с $M_{max}=2,6$ до $M_{max}=2,52$, т.е.

на 3,1 %. Таким образом подтверждается вывод, что программы PAD1 и PAD2 в виду особой чувствительности их алгоритмов к вариации максимального момента не могут быть рекомендованы для расчетов параметров схемы замещения.

Таблица 3.8 - Индуктивные сопротивления схемы замещения АДК

	$X_{\sigma 1}$	$X_{\sigma 2п}$	$X_{\sigma 2N}$	$X_{\sigma 2с}$	X_{12}	X_{Π}''
PAD1	0,0941	0,0868	0,1265	0,1429	1,99	0,1773
PAD2	0,0977	0,0901	0,135	0,1386	2,08	0,1841
PAD3	0,0932	0,0859	0,1262	0,143	1,98	0,1755
PAD4	0,0932	0,0859	0,1284	0,1318	1,98	0,1755
PAD1	0,0932	0,0859	0,1249	0,1409	1,97	0,1755
PAD2	0,0932	0,0859	0,1259	0,129	1,97	0,1758

Следующий двигатель АДК5 с каталожными данными: $R_{ном} = 2,2$ кВт; $\cos \varphi_N = 0,71$; $\eta_N = 0,765$; $s_N = 0,06$; $I_{п} = 4,0$; $M_{п} = 1,9$; $M_{max} = 2,4$. В таблице 3.9, 3.10 представлены параметры схемы замещения. Две последние строки таблиц соответствуют измененному максимальному моменту: для программы PAD1 $M_{max} = 2,413$, для программы PAD2 $M_{max} = 2,362$.

Таблица 3.9 - Активные сопротивления схемы замещения АДК

	R_1	$R_{2п}$	R_{2N}	$R_{2с}$	R_{12}	$\Delta P_{мех}$
PAD1	0,0694	0,0805	0,0752	0,0753	17,75	0,0185
PAD2	0,0403	0,0815	0,0766	0,0762	12,58	0,027
PAD3	0,0573	0,081	0,0756	0,0738	15,08	0,022
PAD4	0,0573	0,081	0,0755	0,0751	15,08	0,022
PAD1	0,0573	0,081	0,0758	0,0741	15,1	0,022
PAD2	0,0385	0,0399	0,0291	0,0288	24,85	0,0146

Таблица 3.10 - Индуктивные сопротивления схемы замещения АДК

	$X_{\sigma 1}$	$X_{\sigma 2п}$	$X_{\sigma 2N}$	$X_{\sigma 2с}$	X_{12}	X_{Π}''
PAD1	0,1085	0,1024	0,1825	0,2446	1,5	0,2044
PAD2	0,1175	0,1109	0,1978	0,2131	1,6	0,2213
PAD3	0,1126	0,1026	0,1966	0,2716	1,56	0,212
PAD4	0,1126	0,1062	0,2024	0,2219	1,57	0,2121
PAD1	0,1125	0,1062	0,1882	0,2510	1,55	0,2119
PAD2	0,1125	0,1062	0,1887	0,2032	1,54	0,212

Из анализа расчетных данных таблице 1.9, 1.10 по параметрам схемы замещения могут быть подтверждены прежние выводы: уравнение максимального момента не может быть использовано для расчета активного сопротивления статорной обмотки R_1 , поэтому программы PAD1 и PAD2 не могут быть рекомендованы для расчета параметров схемы замещения АДК;

учет вытеснения тока в роторе по выражению (2.2) более соответствует общей теории вытеснения тока; программа PAD4 лучше соответствует целям расчета статических характеристик потерь мощности.

Следующий двигатель АДК6 с каталожными данными: $R_{ном}=1,1$ кВт; $\cos \varphi_N = 0,74$; $\eta_N = 0,74$; $s_N = 0,08$; $I_{п} = 4,0$; $M_{п} = 1,5$; $M_{max} = 2,3$. В таблице 3.6а,б представлены параметры схемы замещения. Две последние строки таблиц соответствуют измененному максимальному моменту: для программы PAD1 $M_{max} = 2,2763$, для программы PAD2 $M_{max} = 2,23$.

Таблица 3.11- Активные сопротивления схемы замещения АДК

	R_1	$R_{2п}$	R_{2N}	$R_{2с}$	R_{12}	$\Delta P_{мех}$
PAD1	0,0596	0,0659	0,0971	0,1094	13,31	0,0249
PAD2	0,0452	0,0663	0,0981	0,1004	11,61	0,0291
PAD3	0,0678	0,0657	0,0963	0,1084	14,58	0,0225
PAD4	0,0678	0,0656	0,0962	0,0984	14,55	0,0225
PAD1	0,0678	0,0656	0,0965	0,1087	14,56	0,0225
PAD2	0,0678	0,0656	0,0965	0,0987	14,56	0,0225

Таблица 3.12 - Индуктивные сопротивления схемы замещения АДК

	$X_{\sigma 1}$	$X_{\sigma 2п}$	$X_{\sigma 2N}$	$X_{\sigma 2с}$	X_{12}	$X_{п}''$
PAD1	0,1163	0,1095	0,1827	0,2488	1,67	0,219
PAD2	0,1201	0,1113	0,1937	0,2124	1,74	0,2262
PAD3	0,1137	0,1072	0,1856	0,2606	1,65	0,2145
PAD4	0,01139	0,1071	0,1898	0,2104	1,66	0,2148
PAD1	0,1139	0,1072	0,1786	0,2422	1,64	0,2145
PAD2	0,1139	0,1072	0,1805	0,197	1,64	0,2145

Последний из рассматриваемых двигателей АДК7 с каталожными данными: $R_{ном}=0,3$ кВт; $\cos \varphi_N = 0,62$; $\eta_N = 0,736$; $s_N=0,057$; $I_{п}=3,5$; $M_{п}=2$; $M_{max}=2,3$. В таблице 3.13, 3.14 представлены параметры схемы замещения. Две последние строки таблиц соответствуют измененному максимальному моменту: для программы PAD1 $M_{max} = 2,3409$, для программы PAD2 $M_{max} = 2,2773$.

Таблица 3.13- Активные сопротивления схемы замещения АДК

	R_1	$R_{2п}$	R_{2N}	$R_{2с}$	R_{12}	$\Delta P_{мех}$
PAD1	0,1342	0,0978	0,0809	0,0772	522,85	0,0006
PAD2	0,0645	0,0983	0,0807	0,0795	15,05	0,0211
PAD3	0,0887	0,0964	0,0797	0,0745	22,25	0,014
PAD4	0,0887	0,0962	0,0794	0,0783	22,25	0,014
PAD1	0,0887	0,0968	0,0803	0,0752	22,22	0,014
PAD2	0,0887	0,0967	0,0804	0,0793	22,3	0,0139

Таблица 3.14 - Индуктивные сопротивления схемы замещения АДК

	$X_{\sigma 1}$	$X_{\sigma 2п}$	$X_{\sigma 2N}$	$X_{\sigma 2с}$	X_{12}	$X''_{п}$
PAD1	0,0979	0,0928	0,2421	0,4836	1,17	0,1844
PAD2	0,1279	0,1236	0,2522	0,2804	1,31	0,2408
PAD3	0,1195	0,115	0,2775	0,4987	1,28	0,225
PAD4	0,1195	0,115	0,2873	0,3476	1,29	0,225
PAD1	0,1195	0,1152	0,2471	0,3855	1,25	0,225
PAD2	0,1194	0,1151	0,2435	0,2740	1,25	0,2248

Анализ данных по параметрам схем замещения последних двух АДК полностью подтверждают выводы, сделанные по предыдущим двигателям. Эти выводы в следующем:

1. Уравнение максимального момента не может быть использовано для определения активного сопротивления статорной обмотки R_1 ввиду особой чувствительности этого сопротивления к вариациям максимального момента. Для АДК каждого типа допустимое отклонение реального значения максимального момента от каталожного значения составляет $\pm 10\%$. При таких допустимых отклонениях M_{\max} отклонения значений сопротивления R_1 может выйти за допустимые границы. Поэтому программы PAD1 и PAD2, использующие этот алгоритм расчета сопротивления R_1 , не могут быть использованы для расчета параметров схем замещения АДК.

2. Из двух рассмотренных способов учета вытеснения тока в обмотке ротора АДК, основанных на выражениях (3.1) и (3.2) более подходящим является способ, использующий выражение (3.2). Этот способ обеспечивает минимальное изменение параметров роторной обмотки в диапазоне рабочих скольжений от $s=0$ до $s=s_N$, что соответствует выводам более общей теории вытеснения тока.

3. Для расчета параметров схем замещения АДК с целью дальнейшего расчета статических характеристик потерь мощности следует рекомендовать программу PAD4.

3.3 Особенности определения параметров схем замещения высоковольтных АДК

Основные расчетные формулы для определения параметров схемы замещения и пусковых характеристик высоковольтных АДК приведены в уравнениях (3.20)-(3.56). Исключение для высоковольтных двигателей составляют потери в статорной обмотке, которые определяются как 0,4 о.е. от общих потерь активной мощности в номинальном режиме, поэтому для этих двигателей выражение (3.48) имеет вид:

$$R_1 = 0,4 \cdot (1 - \eta_N) \cdot \eta_N \cdot \cos \varphi_N. \quad (3.57)$$

По вышеописанному алгоритму разработана программа на ЭВМ для

расчета параметров схем замещения АДК. На основе полученных параметров схемы замещения осуществляется расчет и построение пусковых характеристик двигателей.

В таблице 3.15, 3.16 приведены расчеты параметров схем замещения АДК по разработанной программе, включая исходные (каталожные) данные самих электродвигателей.

Таблица 3.15 - Каталожные данные АДК

№ двиг.	Тип	P _N , кВт	U _N , В	s _{a,N} , %	η _N , %	cosφ _N	Пусковые характеристики		
							$\frac{I_{II}}{I_N}$	$\frac{M_{II}}{M_N}$	$\frac{M_M}{M_N}$
1	АТД-1600	1600	6000	0,8	95,6	0,91	5,5	0,7	2,5
2	АТД-5000	5000	6000	0,5	96,5	0,91	5,6	0,7	2,4

Таблица 3.16 - Расчетные параметры схемы замещения

№ двиг.	Тип	R ₁	X _{σ1}	R ₁₂	X ₁₂	R _{2п}	R _{2с}	X _{σ2п}	X _{σ2с}	ΔP _{мех}
1	АТД-1600	0,0153	0,0944	73	3,78	0,0214	0,00792	0,0856	0,0939	0,0053
2	АТД-5000	0,0123	0,0931	85,9	3,77	0,0208	0,00488	0,0844	0,0921	0,00454

3.4 Статические характеристики потерь мощности в АДК

Преобразование электрической энергии в механическую в асинхронном двигателе, как и в других электрических машинах, связано с потерями энергии, поэтому полезная мощность на выходе двигателя P₂ всегда меньше мощности на входе (потребляемой мощности) P₁ на величину потерь с ΣP [33]:

$$P_2 = P_1 - \Sigma P \quad (3.58)$$

Потери ΣP преобразуются в тепло, что в конечном итоге ведет к нагреву машины. Потери в электрических машинах разделяются на основные и добавочные. Основные потери включают в себя магнитные, электрические и механические.

Потери активной мощности в асинхронных двигателях подразделяются на потери в обмотках статора ΔP₁, ротора ΔP₂ и потери в стали магнитных систем ΔP_{ст}

$$\Delta P_d = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_{ст}. \quad (3.59)$$

Потери мощности в двигателях нагрузки практически ничем не отличаются от потерь в элементах электрической сети и поэтому обязательно должны учитываться в статических характеристиках потерь мощности. Следует также помнить, что нагрузочные потери (включая потери в обмотках двигателей) и потери в стали существенно по-разному зависят от напряжения в узле нагрузки. Первые (ΔP_n) определяются соотношением

$$\Delta P_n \cong \frac{P^2(U) + Q^2(U)}{U^2} R, \quad (3.60)$$

где $P(U)$ и $Q(U)$ – активная и реактивная мощности, передаваемые через элемент с сопротивлением R , которые увеличиваются с уменьшением напряжения. Вторые ($\Delta P_{ст}$) определяются соотношением

$$\Delta P_{ст} \cong \frac{U^2}{R_m(U)}, \quad (3.61)$$

где R_m – активное сопротивление ветви намагничивания и уменьшаются с уменьшением напряжения.

От соотношения этих видов потери мощности, которые в конечном итоге определяются коэффициентами загрузки электрических двигателей, существенно зависит вид статических характеристик потерь мощности.

Для исследований статических характеристик потерь мощности рассмотрены на примере асинхронных двигателей. Построены графики статистических характеристик потерь активной и реактивной мощности высоковольтных и низковольтных АД.

На рисунке 3.2 представлены статические характеристики суммарных потерь активной мощности в высоковольтном асинхронном двигателе АД-5000 ($P_{ном}=5000$ кВт) при коэффициентах загрузки (K_3) от 0,5 до 1. Приняты обозначения: $\Delta P_{\Sigma АД}(K_3=1)$ – суммарные потери активной мощности в АД при коэффициенте загрузки 1; $\Delta P_{\Sigma АД}(K_3=0,9)$ – суммарные потери активной мощности в АД при коэффициенте загрузки 0,9 т.д..

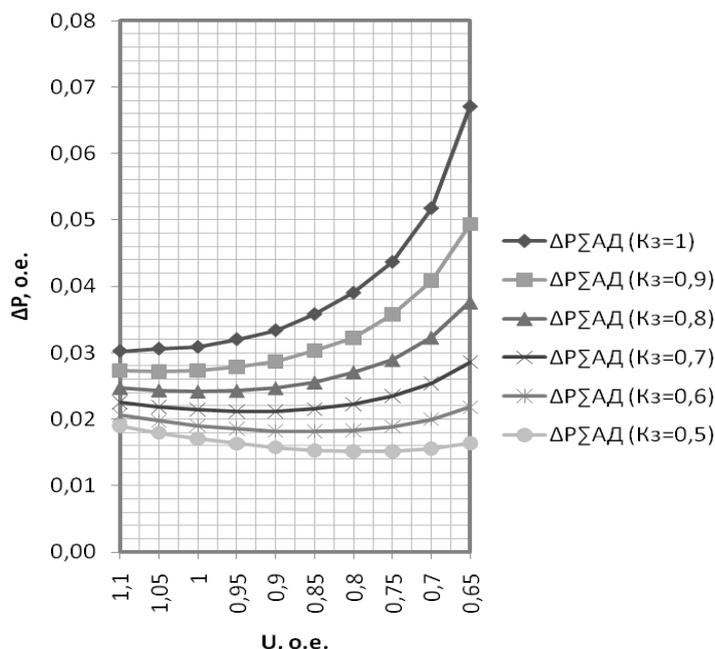


Рисунок 3.2 - Статические характеристики потерь активной мощности в АТД-5000 при различных коэффициентах загрузки

На рисунке 3.3 представлены статические характеристики суммарных потерь активной мощности в высоковольтном асинхронном двигателе АТД-1600 ($P_{\text{ном}}=1600$ кВт) при коэффициентах загрузки (K_z) от 0,5 до 1.

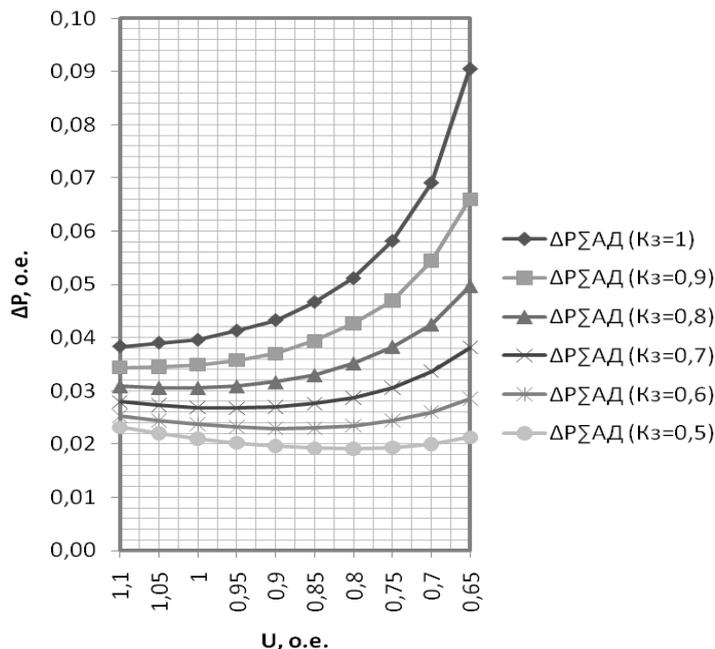


Рисунок 3.3 - Статические характеристики потерь активной мощности в АТД-1600 при различных коэффициентах загрузки

На рисунке 3.4 представлены статические характеристики суммарных потерь активной мощности в низковольтном асинхронном двигателе А-52-2 ($P_{\text{ном}}=10$ кВт) при коэффициентах загрузки (K_z) от 0,5 до 1

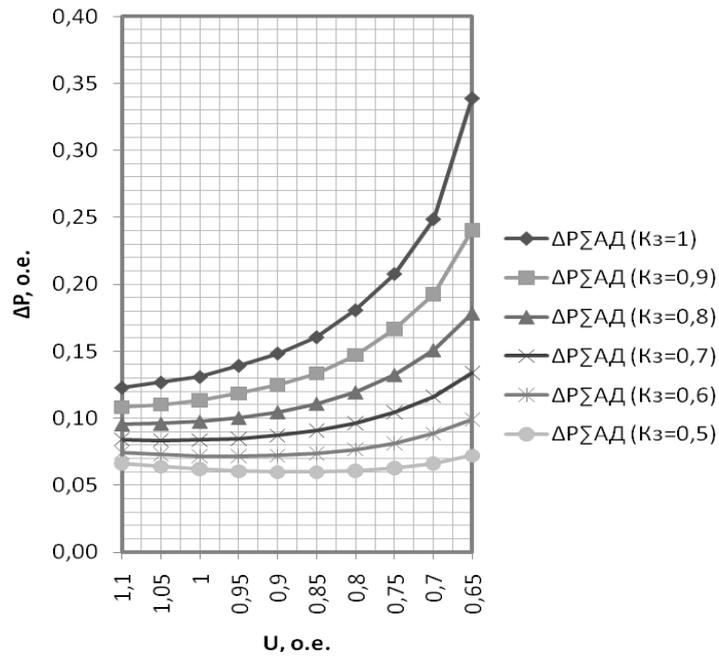


Рисунок 3.4 - Статические характеристики потерь активной мощности в А-52-2 при различных коэффициентах загрузки

На рисунке 3.5 представлены статические характеристики суммарных потерь активной мощности в низковольтном асинхронном двигателе АО-112-6 ($P_{\text{НОМ}}=250$ кВт) при коэффициентах загрузки (K_3) от 0,5 до 1.

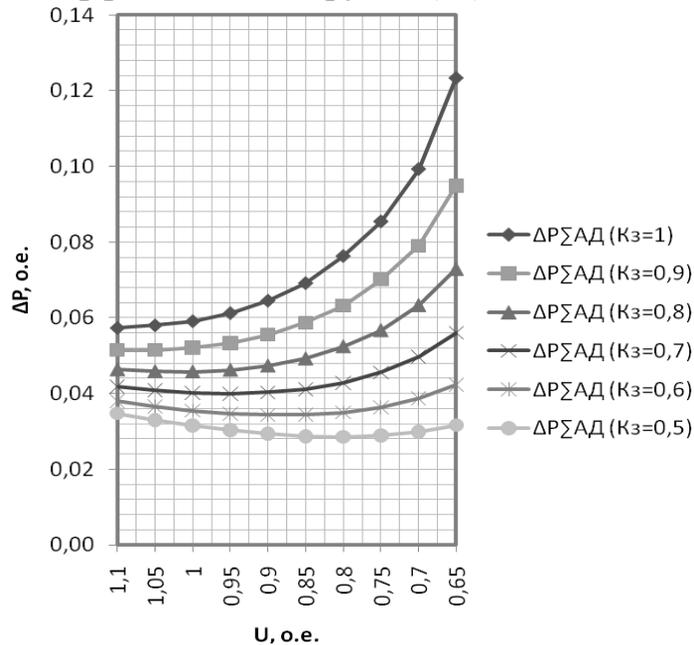


Рисунок 3.5 - Статические характеристики потерь активной мощности в АО-112-6 при различных коэффициентах загрузки

На рисунке 3.6 представлены статические характеристики потребления реактивной мощности в высоковольтном асинхронном двигателе АД-5000 при коэффициентах загрузки (K_3) от 0,5 до 1. Приняты обозначения: $\Delta Q_{\Sigma\text{АД}}(K_3=1)$ – потребление реактивной мощности в АД при коэффициенте загрузки 1 и т.д..

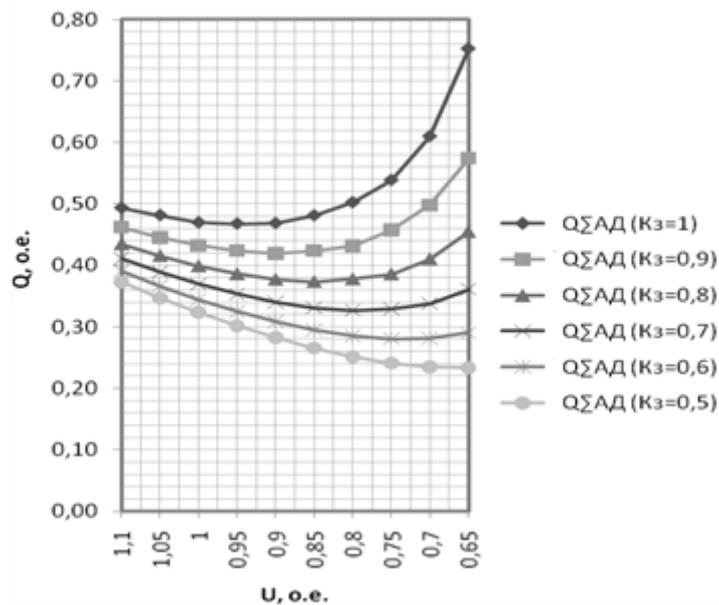


Рисунок 3.6 - Статические характеристики потребления реактивной мощности в АД-5000 при различных коэффициентах загрузки

На рисунке 3.7 представлены статические характеристики потребления реактивной мощности в высоковольтном асинхронном двигателе АД-1600 при коэффициентах загрузки (K_z) от 0,5 до 1.

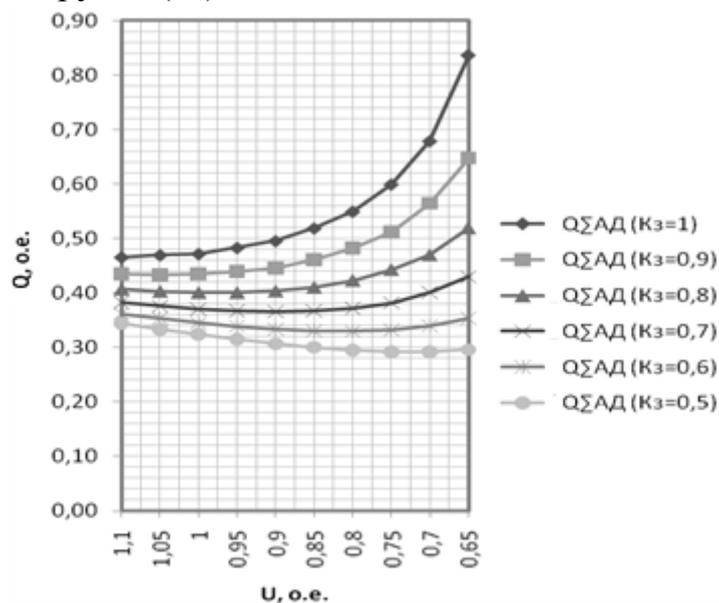


Рисунок 3.7 - Статические характеристики потребления реактивной мощности в АД-1600 при различных коэффициентах загрузки

На рисунке 3.8 представлены статические характеристики потребления реактивной мощности в низковольтном асинхронном двигателе А-52-2 при коэффициентах загрузки (K_z) от 0,5 до 1.

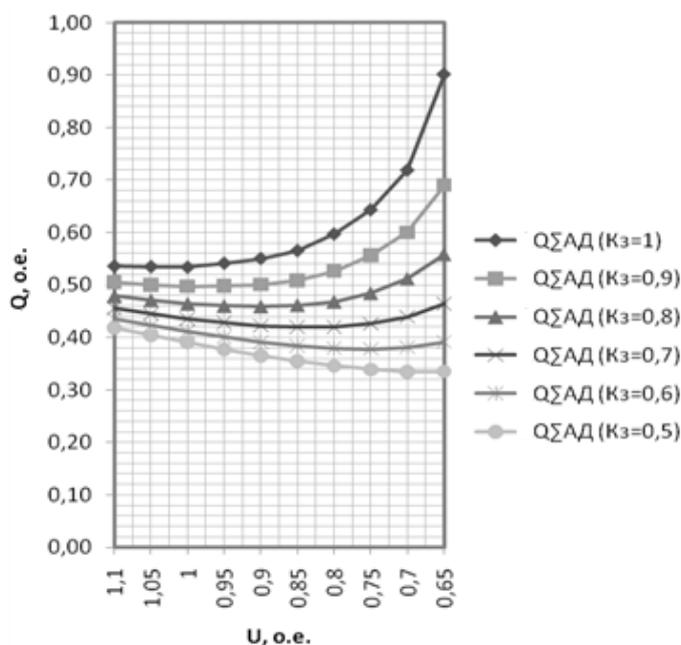


Рисунок 3.8 - Статические характеристики потребления реактивной мощности в А-52-2 при различных коэффициентах загрузки

На рисунке 3.9 представлены статические характеристики потребления реактивной мощности в низковольтном асинхронном двигателе АО-112-6 при коэффициентах загрузки (K_z) –от 0,5 до 1..

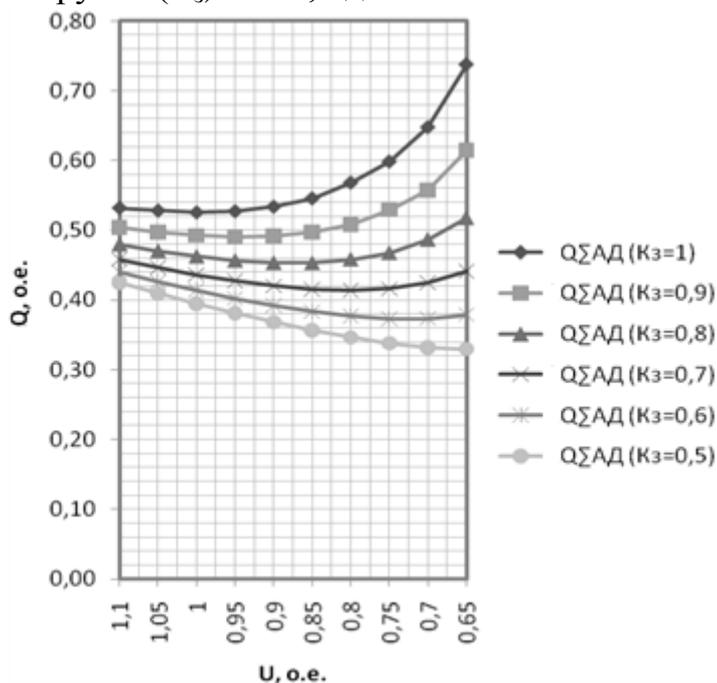


Рисунок 3.9 - Статические характеристики потребления реактивной мощности в АО-112-6 при различных коэффициентах загрузки

При номинальном напряжении на зажимах асинхронный двигатель, работая с полной загрузкой, потребляет из сети активную и реактивную мощность. В случае изменения напряжения сети активная мощность на валу двигателя остается практически постоянной, изменяются лишь потери

активной мощности в двигателе.

Анализ зависимостей изменения величины активных и реактивных потерь для различных типов двигателей от напряжения на их зажимах показывает, что наиболее существенное влияние имеет значение коэффициента загрузки двигателя.

Установлено, что общим для рассмотренных двигателей является увеличение потребляемой реактивной мощности при увеличении подведенного напряжения.

Кроме того, удельное потребление реактивной мощности растет с уменьшением коэффициента загрузки.

При изменении напряжения на зажимах двигателя изменяется скольжение, а следовательно, и скорость вращения.

При снижении напряжения скорость вращения двигателей заметно снижается, особенно для двигателей меньшей мощности. Наоборот, повышение напряжения приводит к увеличению скорости двигателей.

При работе двигателей с малыми коэффициентами загрузки изменения напряжения влияет на скорость двигателей практически очень мало.

При оценке влияния изменения напряжения на экономичность работы асинхронных двигателей следует учитывать стоимость дополнительных потерь электроэнергии, вызванных отклонением напряжения, увеличение реактивной мощности, потребляемой двигателем, а также изменение экономических показателей, связанных с влиянием изменения скорости вращения на производительность соответствующих механизмов.

В настоящее время отсутствует единая методика оценки экономичности работы асинхронных двигателей.

В то же время имеются данные о том, что правильная оценка влияния изменений напряжения на экономичность работы асинхронных электродвигателей в ряде случаев позволяет получить существенный эффект.

Если влияние скорости вращения двигателя на производительность механизмов имеет место, то напряжение на зажимах двигателей должно поддерживаться не ниже номинального при малых коэффициентах загрузки, и в пределах наибольшего допустимого значения при больших коэффициентах загрузки (близких к номинальной).

При отсутствии влияния скорости вращения двигателя на производительность механизмов целесообразно поддерживать напряжение на зажимах двигателей не выше номинального при больших коэффициентах загрузки и ниже номинального при малых коэффициентах загрузки.

3.5 Разработка программного комплекса «Расчет параметров и статические характеристики потерь мощности асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором»

Основные технические характеристики:

Требования к операционной системе: Windows XP/7/10
Требования к ОЗУ: не ниже 256 Mb

Требования к видео: режимы VGA
Требования к процессору: Pentium 4 и выше
Требования к жесткому диску: наличие как минимум 20
мегабайта свободного пространства.

Среда программирования: Delphi

Тип реализующей ЭВМ: Персональный компьютер

Принцип работы заключается в использовании каталожных данных двигателя и заранее подготовленные алгоритмы расчета (составленные по общеизвестным формулам для расчета параметров двигателей), программа выдает пользователю результаты расчетов, строит графики потерь.

Основные функции при работе с программой:

- позволяет хранить в себе каталожные данные двигателей для последующего использования в расчётах;
- производить расчет параметров и характеристик асинхронных двигателей, представляя их удобочитаемом виде;
- создает графики зависимостей потерь мощности от напряжения;
- позволяет сохранить все полученные данные расчетов.

Для начала работы с программой необходимо наличие исходных данных о двигателе. Их можно взять из справочных изданий, либо воспользоваться каталогом, встроенным в программу, это можно сделать, нажав на главное меню программы и выбрав параметр «показать каталог двигателей»

После того, как исходные данные будут введены, как это показано на рисунке 3.10, достаточно нажать на кнопку «произвести расчёт», чтобы получить результаты расчётов.

Каталожные данные АД	
Номинальные данные	
Мощность, кВт	1000
Напряжение, В	1E4
Скольжение, отн.ед.	0,02
КПД, отн.ед.	0,943
cosФ, отн.ед.	0,86

Пусковые характеристики	
Пусковой ток, отн.ед.	5,2
Пусковой момент, отн.ед.	1
Макс момент, отн.ед.	2,2
Коэффициент загрузки, о.е.	0,6

Напряжение

Напряжение, относ. номинального: 1,05

ПРОИЗВЕСТИ РАСЧЕТ

Рисунок 3.10 – Окно ввода исходных данных

Окно с результатами расчетов состоит из четырех вкладок. Первая вкладка изображена на рисунке 3.11 и предоставляет пользователю

результаты расчётов параметров итерационного процесса, активные и реактивные потери в двигателе, данные по сопротивлениям для схемы замещения, а также токи и полную мощность АД.

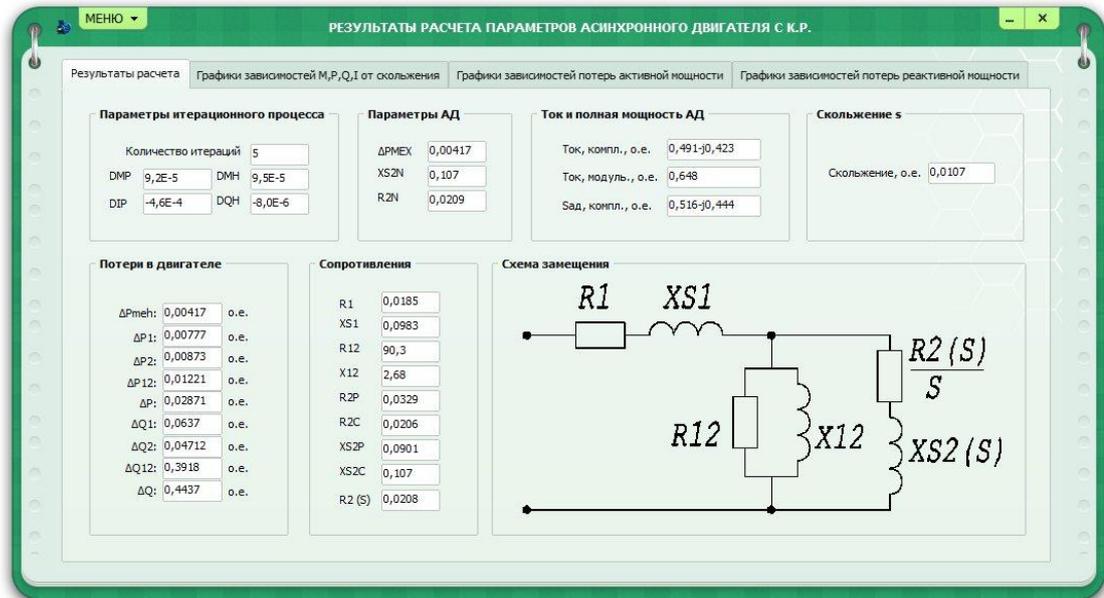


Рисунок 3.11 – Первая вкладка окна с результатами расчетов

На второй вкладке показаны графики зависимостей M , P , Q , I , $\cos\Phi$ и КПД от скольжения (рисунок 3.12). Для наглядности каждый график имеет свой цвет.

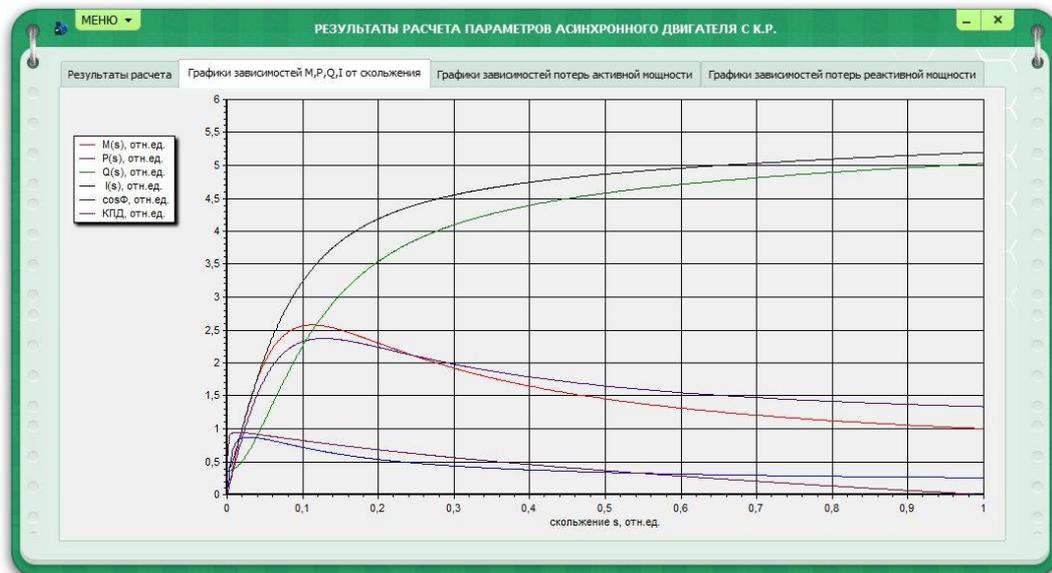


Рисунок 3.12 – Графики зависимостей M , P , Q , I , $\cos\Phi$ и КПД от скольжения

Третья и четвертая вкладки показывают пользователю графики зависимостей потерь активной мощности от напряжения. В поле «настройка графиков» можно ввести свои параметры, чтобы найти оптимальное напряжение, при котором потери будут минимальными. Построение графиков по новым данным происходит нажатием на кнопку «перерисовать»

графики». Ниже приведена таблица с точными значениями минимального и максимального значения для потерь активной и реактивной мощности. Третья и четвертая вкладки идентичны, различия только в том, что в третьей показаны графики для потерь активной мощности, а в четвертой для потерь реактивной мощности.

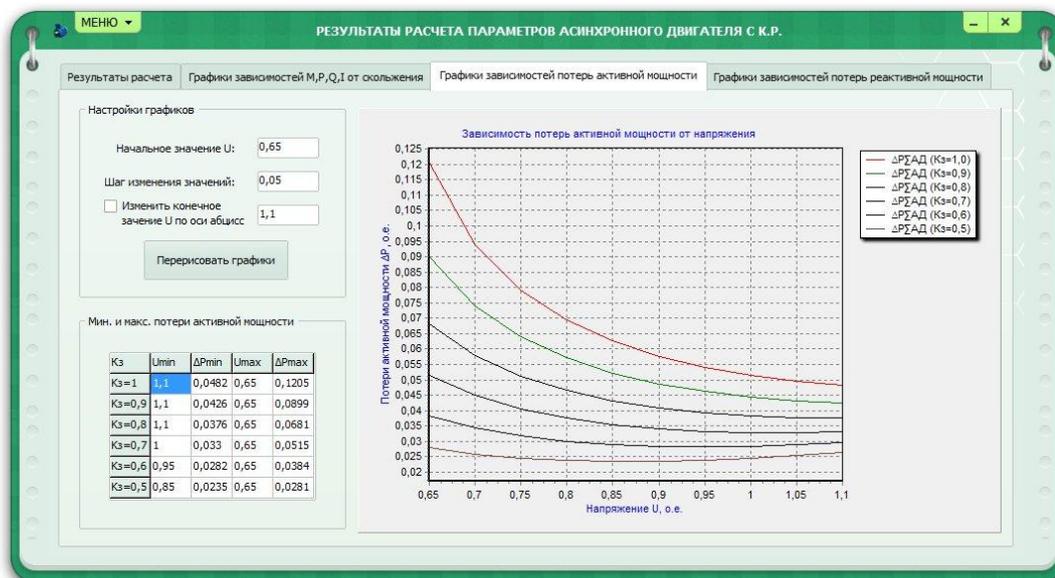


Рисунок 3.13 – Графики зависимостей потерь мощности от напряжения

В меню окна результатов расчета есть функция сохранения всех результатов расчетов полученных в программе. Данные сохраняются в файл с расширением .doc, который можно открыть любым редактором, читающим подобный формат текстового документа, например Microsoft Word, версией не ниже 2000.

Теоретические и практические результаты, их новизна заключается в разработке алгоритма расчета, учитывающий все исходные данные, а также использующий в расчетах напряжение. Показано наглядное построение графиков зависимостей потерь мощности от напряжения

3.6 Выводы по разделу 3

1. Разработаны методика, алгоритм и программа расчета параметров схемы замещения и пусковых характеристик, высоковольтных АДК применительно к определению статических характеристик потерь мощности.

2. Разработаны методика, алгоритм и программа расчета параметров схемы замещения и пусковых характеристик, низковольтных АДК применительно к определению статических характеристик потерь мощности.

3. Из двух рассмотренных способов учета вытеснения тока в обмотке ротора АДК, основанных на выражениях (2.1) и (2.2) более подходящим является способ, использующий выражение (2.2). Этот способ обеспечивает минимальное изменение параметров роторной обмотки в диапазоне рабочих скольжений от $s=0$ до $s=s_N$, что соответствует выводам более общей теории вытеснения тока;

4. Уравнение максимального момента не может быть использовано для определения активного сопротивления статорной обмотки R_1 ввиду особой чувствительности этого сопротивления к вариациям максимального момента. Для АДК каждого типа допустимое отклонение реального значения максимального момента от каталожного значения составляет $\pm 10\%$. При таких допустимых отклонениях M_{\max} отклонения значений сопротивления R_1 может выйти за допустимые границы. Поэтому программы PAD1 и PAD2, использующие этот алгоритм расчета сопротивления R_1 , не могут быть использованы для расчета параметров схем замещения АДК.

5. Напряжение на выводах АДК, при котором обеспечивается минимум суммарных потерь активной мощности, существенно зависят от коэффициента загрузки и изменяются при изменении коэффициента загрузки от 1 до 0.5, в пределах от 1.1 до 0.75 от номинального.

6. Напряжение на выводах АДК, при котором обеспечивается минимум суммарных потерь реактивной мощности, существенно зависят от коэффициента загрузки и изменяются при изменении коэффициента загрузки от 1 до 0.5, в пределах от 1.1 до 0.65 от номинального.

7. Разработанный программный комплекс Расчет параметров и статические характеристики потерь мощности асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором внедрен в учебный процесс:

- специальности «Электроэнергетика» Рудненского индустриального института для проведения лабораторных работ по дисциплине «Электрические сети и системы» и практического занятия по дисциплине «Электроснабжение ПП»

- специальности «Электроэнергетика» Костанайского государственного университета имени А.Байтурсынова для проведения лабораторных работ по дисциплине «Электрические машины» и практического занятия по дисциплине «Электроэнергетика»

- специальности «Электроэнергетика» Павлодарского государственного университета имени С.Торайгырова для проведения лабораторных работ по дисциплине «Электрические машины» и практического занятия по дисциплине «Электроснабжения»

- специальности «Теплоэнергетика» Государственного университета имени Шакарима города Семей для проведения лабораторных работ и практического занятия по дисциплине «Электротехника и электроника»

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С МАССИВНЫМ ГЛАДКИМ РОТОРОМ И С ШИХТОВАННЫМИ ПОЛЮСАМИ, ПО КАТАЛОЖНЫМ ДАННЫМ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ

Схемы замещения СД с шихтованными полюсами по продольной (а) и поперечной (б) осям приведены на рисунке 4.1.

Параметрами схемы замещения являются: R_{ad} , R_{aq} , R_{cr} , R_f , R_{1d} , R_{1q} – соответственно активные сопротивления ветви намагничивания по продольной и поперечной осям ротора, статорной обмотки, обмотки возбуждения и демпферных обмоток по продольной и поперечной осям ротора; X_{ad} , X_{aq} – сопротивления взаимоиндукции между статорными и роторными обмотками по осям d и q; X_{σ} , $X_{\sigma f}$, $X_{\sigma 1d}$, $X_{\sigma 1q}$ – соответственно индуктивные сопротивления рассеяния статорной обмотки, обмотки возбуждения и демпферных обмоток по осям d и q; R_{fn} – активное сопротивление обмотки возбуждения при пуске СД, когда обмотки возбуждения замкнуты на дополнительное пусковое сопротивление R_n ($R_{fn} = R_f + R_n$). Коэффициент кратности пускового сопротивления по отношению к сопротивлению обмотки возбуждения K_p равен отношению пускового сопротивления к сопротивлению обмотки возбуждения

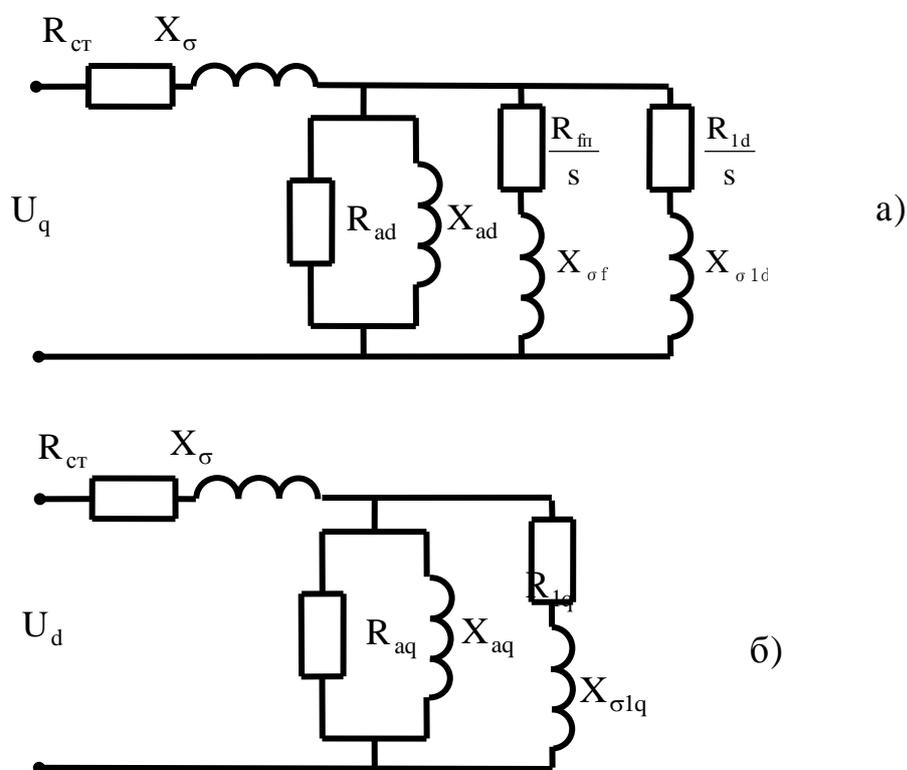


Рисунок 4.1 Схемы замещения по продольной (а) и поперечной (б) осям СДШП.

Основным требованием к алгоритму является соответствие расчетных

параметров схемы замещения СД каталожным данным, т.е. параметры режима, соответствующие каталожным данным (например, $M_{п}$, $M_{в}$, $M_{м}$, $I_{п}$), но вычисленные через параметры схемы замещения, должны равняться этим каталожным данным.

Активное сопротивление статорной обмотки в относительных единицах равняется потерям активной мощности в этой обмотке в номинальном режиме СД, которые составляют устойчивую долю (в среднем 0,4) от суммарных потерь активной мощности в СД

$$R_{ст} = 0,4 \cdot (1 - \eta_N) \cdot \eta_N \cdot \cos\varphi_N. \quad (4.1)$$

Основным расчетным выражением для определения синхронного сопротивления X_d служит выражение для максимального синхронного момента

$$M_M \cdot \frac{P_N}{S_N} = P_M = \frac{E_{qN}}{X_d} \sin \delta_M + \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\delta_M, \quad (4.2)$$

где δ_M – внутренний угол СД, соответствующий максимальному синхронному моменту и максимальной активной мощности P_M в синхронном режиме; S_N – номинальная полная мощность СД

Остальные параметры схемы замещения СДШП определяются по методу последовательных приближений из условия совпадения одноименных каталожных и расчетных данных. Однако, поскольку каталожных данных существенно меньше, чем параметров схемы замещения, уравнения последовательных приближений необходимо дополнить рядом приближенных соотношений, характеризующих относительно устойчивые свойства СД.

Схемы замещения СД с массивным ротором (СДМР) по продольной (а) и поперечной (б) осям ротора аналогична приведенной на рисунке 4.

В отличие от СД с шихтованным ротором СДМР характеризуются следующими особенностями.

1. В связи с симметрией ротора по продольной (d) и поперечной (q) осям имеют место следующие соотношения:

$$\begin{aligned} X_d &= X_q, \\ X_{ad} &= X_{aq}, \\ X_{\sigma 1d} &= X_{\sigma 1q} = X_{\sigma 1}, \\ R_{1d} &= R_{1q} = R_1, \\ R_{ad} &= R_{aq}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

2. В массивном роторе СДМР необходимо учитывать вытеснение тока в демпферных контурах ротора. Степень вытеснения в основном зависит от частоты наводимых в роторе токов, т.е. в конечном итоге от скольжения двигателя. Эффект вытеснения тока приводит к изменению активного R_1 и индуктивного сопротивления рассеяния $X_{\sigma 1}$ эквивалентного демпферного контура в зависимости от скольжения ротора.

Изменения сопротивлений эквивалентного демпферного контура определяются следующими зависимостями, вытекающими из теории массивного ротора:

$$R_1(s) = \sqrt{R_{lc}^2 + (R_{ln}^2 - R_{lc}^2)s}, \quad (4.4)$$

$$X_{\sigma 1}(s) = \frac{X_{\sigma 1c} X_{\sigma 1n}}{\sqrt{X_{\sigma 1n}^2 + (X_{\sigma 1c}^2 - X_{\sigma 1n}^2)s}}, \quad (4.5)$$

где R_{ln} , $X_{\sigma 1n}$, R_{lc} , $X_{\sigma 1c}$ – активные и индуктивные сопротивления рассеяния демпферного контура соответственно при пуске ($s = 1$) и в синхронном режиме ($s = 0$).

3. В связи с тем, что сопротивления $R_1(s)$ и $X_{\sigma 1}(s)$ эквивалентного демпферного контура зависят от скольжения, то и обобщенные параметры СДМР, в расчетные выражения для которых входят сопротивления $R_1(s)$ и $X_{\sigma 1}(s)$ также зависят от скольжения.

Алгоритм расчета параметров схемы замещения СДМР реализуется следующим образом. Ненасыщенное значение синхронного сопротивления X_d определяется как

$$X_d = \frac{1,13}{\cos \varphi_N \cdot \sqrt{P_M^2 - 1} - \sin \varphi_N}. \quad (4.6)$$

Остальные параметры схемы замещения СДМР определяются по методу последовательных приближений из условия совпадения одноименных каталожных и расчетных данных.

Для исследований статические характеристики потерь мощности рассмотрены на примере синхронных двигателей с шихтованным и массивным ротором.

На рисунке 4.2 представлены статические характеристики суммарных потерь активной мощности в синхронных двигателях СДН-18-74-16 ($P_{ном}=4000$ кВт), СТД-10000-2 ($P_{ном}=10000$ кВт), СД2-74/25-604 ($P_{ном}=225$ кВт) при коэффициентах загрузки (K_3) от 0,5 до 1. Приняты обозначения: $\Delta P_{\Sigma СД}(K_3=1)$ – суммарные потери активной мощности при соответствующих K_3 .

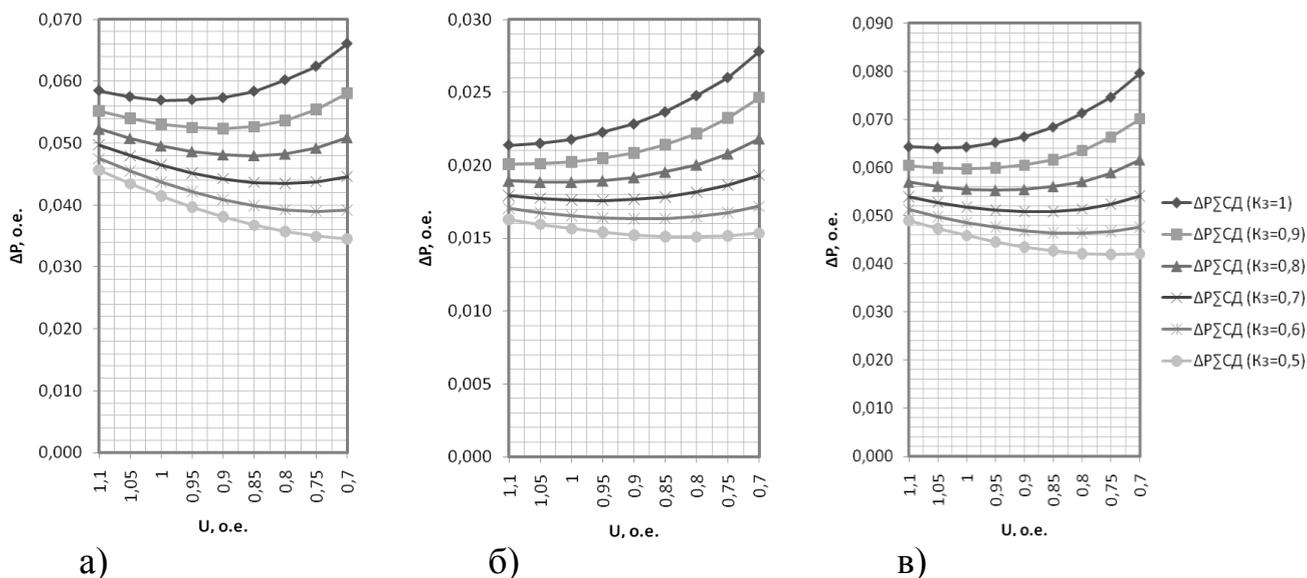


Рисунок 4.2 - Статические характеристики потерь активной мощности при различных коэффициентах загрузки: а) СДН-18-74-16; б) СД-10000-2; в) СД2-74/25-604

Напряжение на выводах, при котором обеспечивается минимум суммарных потерь активной мощности СД с шихтованными полюсами, существенно зависят от коэффициента загрузки и изменяются при изменении коэффициента загрузки от 1 до 0,5 в пределах от 1,1 до 0,7 от номинального.

Напряжение на выводах, при котором обеспечивается минимум суммарных потерь активной мощности СД с массивным гладким ротором, существенно зависят от коэффициента загрузки и изменяются при изменении коэффициента загрузки от 1 до 0,5 в пределах от 1,1 до 0,7 от номинального.

Разработка программного комплекса «Расчет параметров и статические характеристики потерь мощности синхронного двигателя с массивным ротором» и «Расчет параметров и статические характеристики потерь мощности синхронного двигателя с шихтованными полюсами»

Принцип работы заключается в использовании каталожных данных двигателя и заранее подготовленные алгоритмы расчета (составленные по общеизвестным формулам для расчета параметров двигателей), программа выдает пользователю результаты расчетов, строит графики потерь.

Основные функции при работе с программой:

- позволяет хранить в себе каталожные данные двигателей для последующего использования в расчётах;
- производить расчет параметров и характеристик асинхронных двигателей, представляя их удобочитаемом виде;
- создает графики зависимостей потерь мощности от напряжения;
- позволяет сохранить все полученные данные расчетов.

Для начала работы с программой необходимо наличие исходных данных о двигателе. Их можно взять из справочных изданий, либо

воспользоваться каталогом, встроенным в программу, это можно сделать, нажав на главное меню программы и выбрав параметр «показать каталог двигателей»

После того, как исходные данные будут введены, как это показано на рисунке 4.3, достаточно нажать на кнопку «произвести расчёт», чтобы получить результаты расчётов.

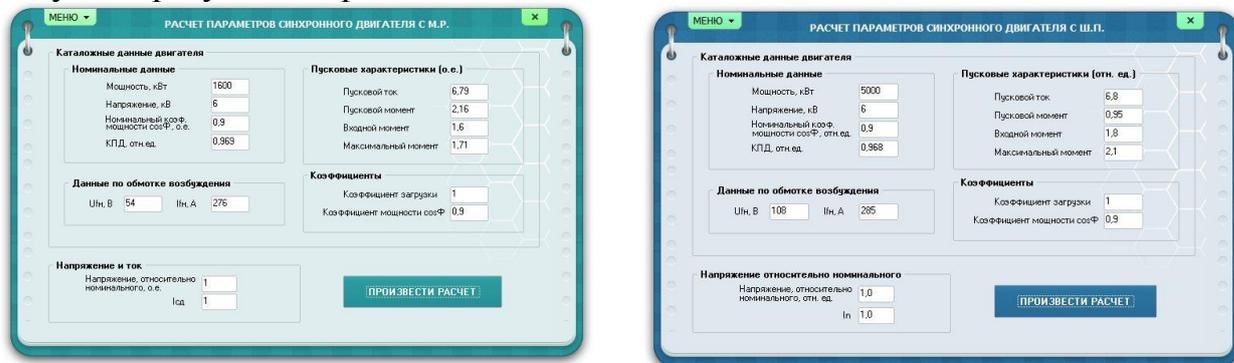


Рисунок 4.3 – Окно ввода исходных данных

Окно с результатами расчетов состоит из четырёх вкладок. Первая вкладка изображена на рисунке 4.4 и предоставляет пользователю результаты расчётов параметров итерационного процесса, активные и реактивные потери в двигателе, а также токи и полную мощность СД.

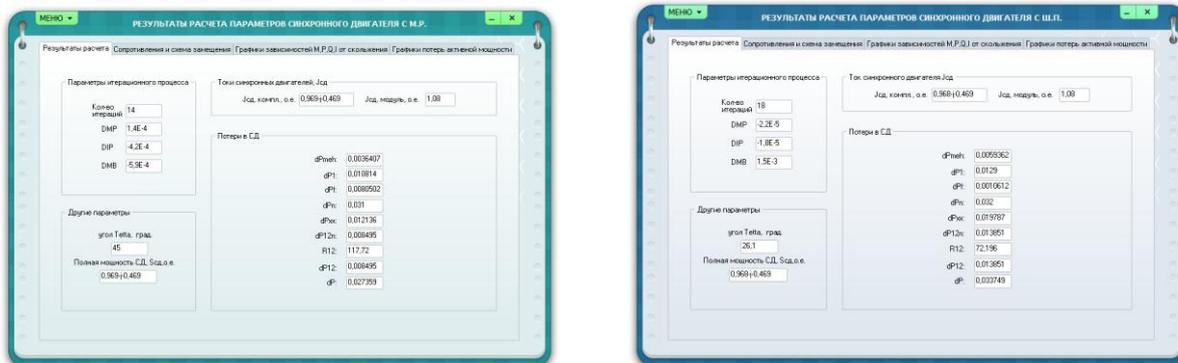


Рисунок 4.4 – Первая вкладка окна с результатами расчетов

На второй вкладке показана схема замещения для СД и параметры сопротивлений для этой схемы.

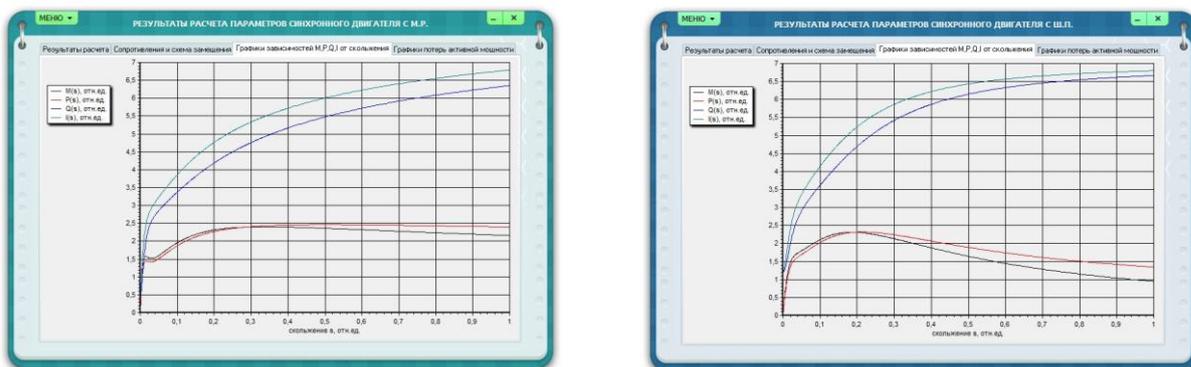


Рисунок 4.5 – графики зависимостей M , P , Q , I , $\cos\Phi$ и КПД от скольжения

На третьей вкладке показаны графики зависимостей M , P , Q , I , $\cos\Phi$ и КПД от скольжения (рисунок 4.5). Для наглядности каждый график имеет свой цвет.

Четвертая вкладка показывает пользователю графики зависимостей потерь активной мощности от напряжения. В поле «настройка графиков» можно ввести свои параметры, чтобы найти оптимальное напряжение, при котором потери будут минимальными. Построение графиков по новым данным происходит нажатием на кнопку «перерисовать графики». Ниже приведена таблица с точными значениями минимального и максимального значения для потерь активной мощности.

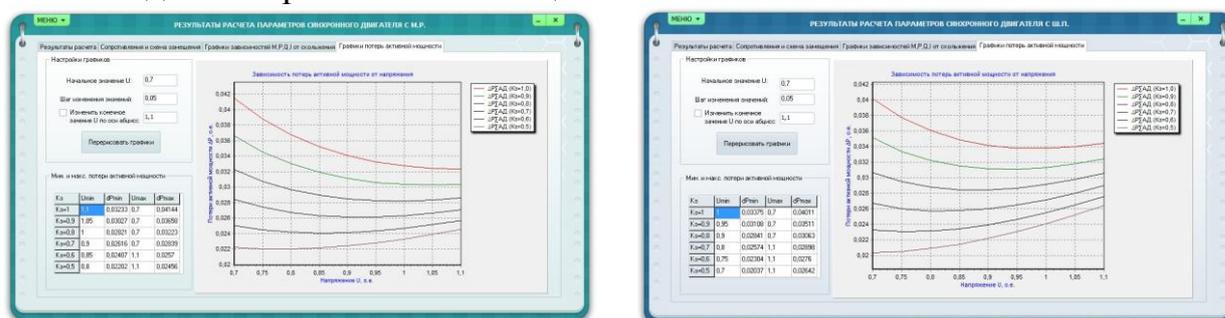


Рисунок 4.6 – Графики зависимостей потерь мощности от напряжения

В меню окна результатов расчета есть функция сохранения всех результатов расчетов полученных в программе. Данные сохраняются в файл с расширением .doc, который можно открыть любым редактором, читающим подобный формат текстового документа, например Microsoft Word, версией не ниже 2000.

Теоретические и практические результаты, их новизна заключается в разработке алгоритм расчета, учитывающий все исходные данные, а также использующий в расчетах напряжение. Наглядное построение графиков зависимостей потерь мощности от напряжения

5. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАГРУЗОК И ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ДЛЯ РЕАЛЬНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ

Для исследований статических характеристик потерь мощности выбрана система электроснабжения цеха по производству окатышей (ЦПО) подстанций ТП-26 АО «ССГПО» (рисунок 5.1).

Электроснабжение ЦПО осуществляется от подстанций – ПС №34 (ПС 110/6 и 35/6).

Электроснабжение механического участка осуществляется от двухтрансформаторной подстанции № 26 6/0,4кВ через трансформаторы по 1000 кВА каждый. В свою очередь ПС №26 питается по взаиморезервируемым токопроводам, проложенных над землей, от вышестоящей двухтрансформаторной подстанции №34. На подстанции №34 установлено 2х(40 МВА) трансформатора 110/6 и 35/6 кВ, питание ПС №34 осуществляется от ВЛ Сарбайская-Агломерат №1 напряжением 110 кВ от ПС «Сарбайская» АО «КЕГОС» и по ВЛ напряжением 35 кВ от ТЭЦ.

Общее число элементов СЭС – 352, в том числе кабели (117 присоединений общей длиной около 9000 м, разброс длин присоединений – от 10 до 180 м, разброс сечений кабельных жил присоединений от $2 \times (3 \times 240)$ до $3 \times 4 \text{ мм}^2$, а также 91 АД и 12 СД суммарной установленной мощностью 17915 кВт; средняя мощность двигателей 173,93 кВт (двадцать имеют мощность свыше 100 кВт: 2 по 2000; 10 по 800; 4 по 500; 4 по 400 кВт; минимальная мощность – 0,5 кВт).

Прочая (недвигательная) нагрузка 0,38 кВт представлена освещением, сигнализацией и тиристорные воздушительные устройства (ТВУ) СД.

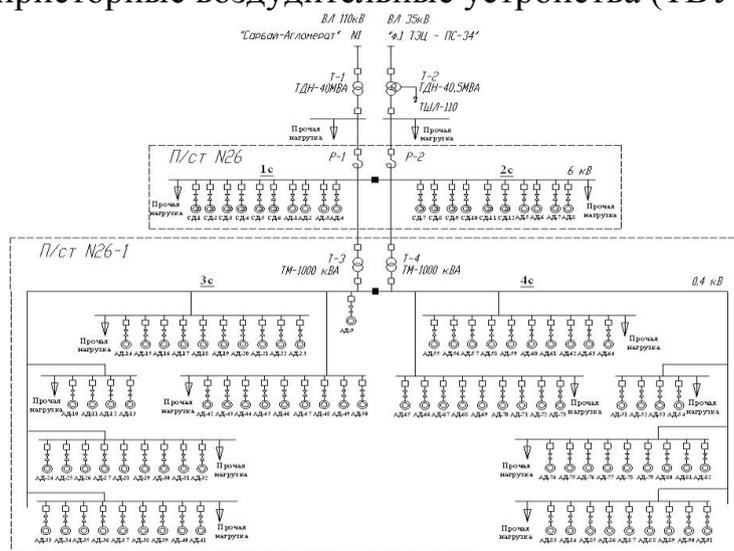


Рисунок 5.1 - Расчетная схема ТП-26 АО «ССГПО»

На рисунке 5.2 представлены статические характеристики суммарных потерь активной мощности в рассматриваемой схеме при коэффициенте

загрузки (K_3) - 0,9 и 0,8 АД и СД. Приняты обозначения: $\Delta P_{\Sigma СД}$ – суммарные потери активной мощности в СД (включающие потери в цепи присоединения двигателей); $\Delta P_{\Sigma АД}$ – суммарные потери активной мощности в АД (включающие потери в цепи присоединения двигателей); $\Delta P_{\text{сети}}$ – активные потери мощности в электрической сети, за исключением потерь в присоединениях АД и СД; $\Delta P_{\Sigma \text{трансф}}$ – суммарные активные потери стали в трансформаторах; ΔP_{Σ} – суммарные активные потери мощности в СЭС, включающие активные потери мощности в сети, АД и СД.

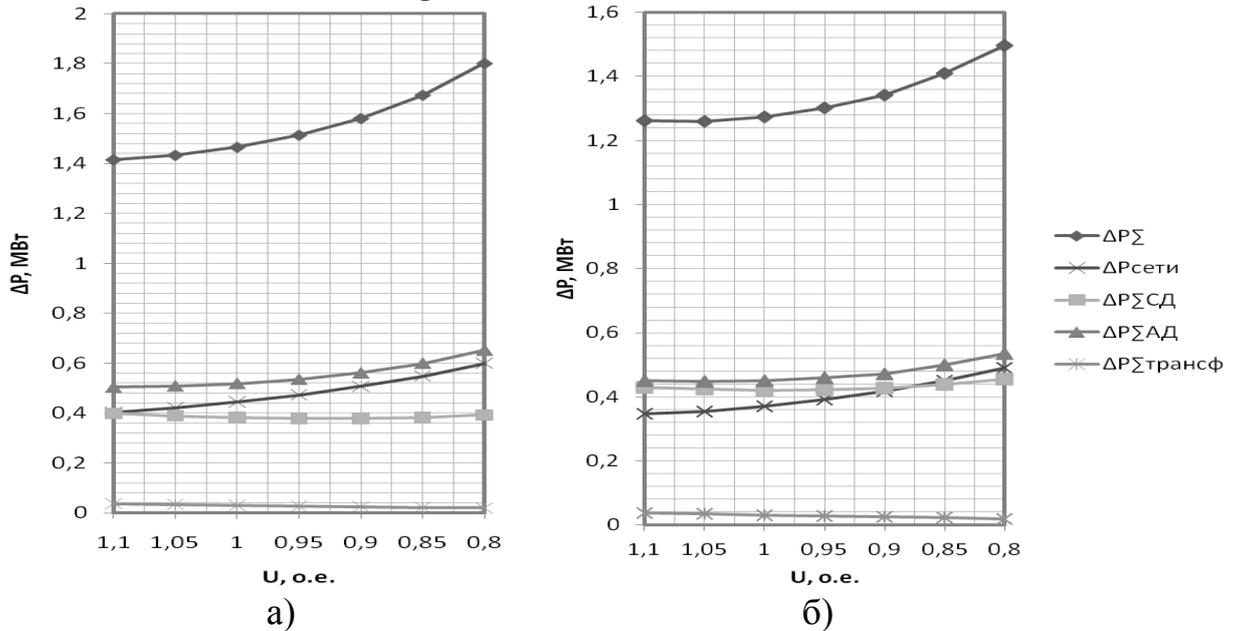
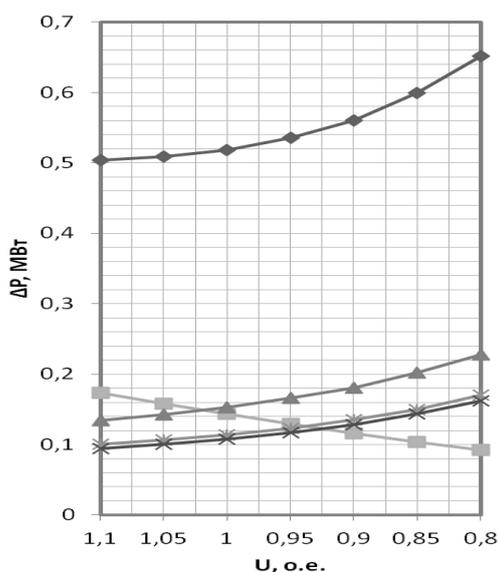
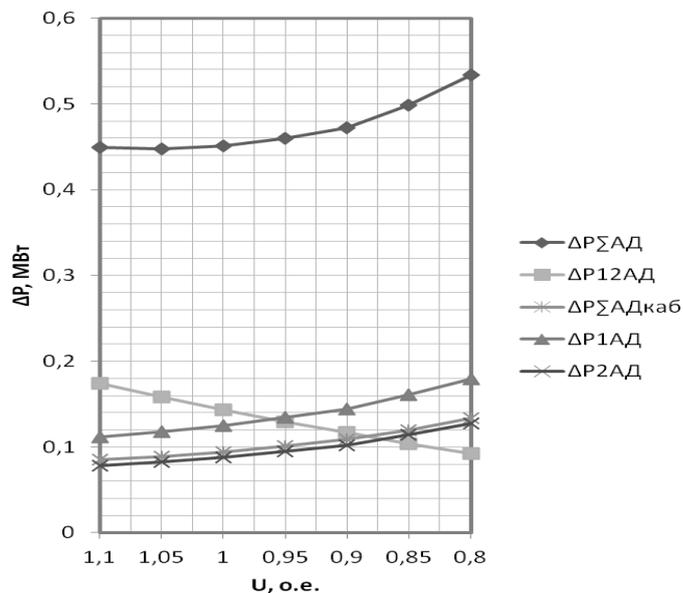


Рисунок 5.2 - Статические характеристики потерь активной мощности для ТП-26: а) при $K_3 = 0,9$; б) при $K_3 = 0,8$

На рисунке 5.3 представлены статические характеристики суммарных потерь активной мощности АД в рассматриваемой схеме при $K_3 = 0,9$ и $0,8$. Приняты обозначения: $\Delta P_{\Sigma АД}$ – суммарные потери активной мощности АД (включающие потери в цепи присоединения двигателей); $\Delta P_{12АД}$ – суммарные потери активной мощности в стали магнитных систем АД; $\Delta P_{1АД}$ – суммарные потери активной мощности в статорных обмотках АД; $\Delta P_{2АД}$ – суммарные потери активной мощности в роторных обмотках АД; $\Delta P_{\Sigma АД \text{каб}}$ – суммарные потери активной мощности в присоединениях АД.



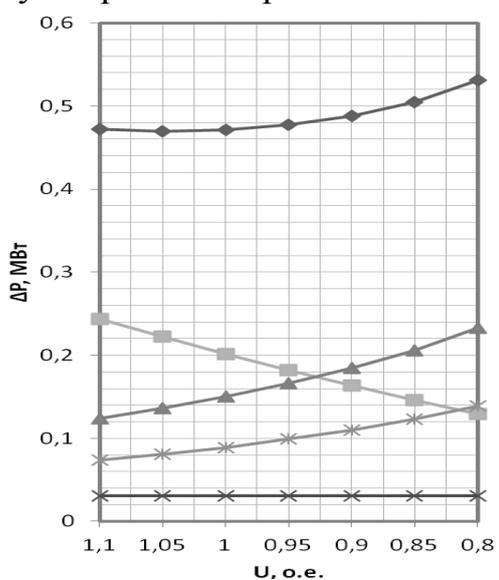
а)



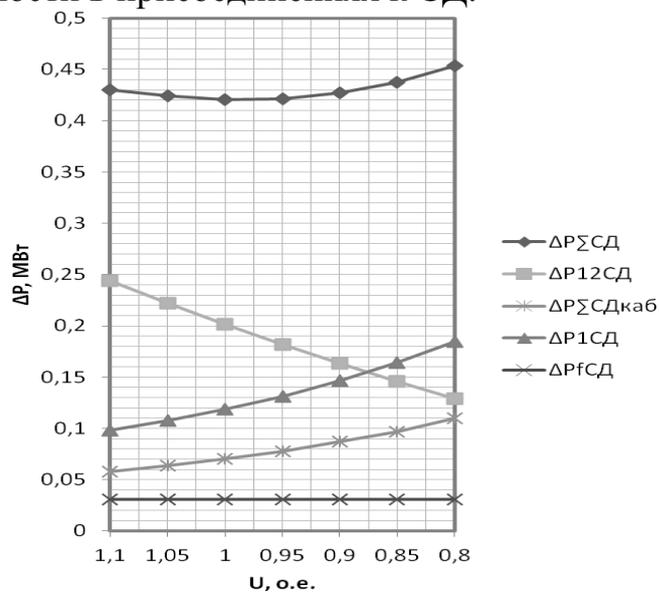
б)

Рисунок 5.3 - Статические характеристики потерь активной мощности в АД: а) при $K_3 = 0,9$ б) при $K_3 = 0,8$

На рисунке 5.4 представлены статические характеристики суммарных потерь активной мощности СД в рассматриваемой схеме при $K_3 = 0,9$ и $0,8$. Приняты обозначения: $\Delta P_{\Sigma СД}$ – суммарные потери активной мощности СД (включая потери в цепи присоединения двигателей); $\Delta P_{12 СД}$ – суммарные потери активной мощности в стали магнитных систем СД; $\Delta P_{1 СД}$ – суммарные потери активной мощности в статорных обмотках СД; $\Delta P_{f АД}$ – суммарные потери активной мощности в обмотках возбуждения СД; $\Delta P_{\Sigma СД каб}$ – суммарные потери активной мощности в присоединениях к СД.



а)



б)

Рисунок 5.4 - Статические характеристики потерь активной мощности в СД: а) при $K_3 = 0,9$; б) при $K_3 = 0,8$

На рисунке 5.5 представлены статические характеристики потребления реактивной мощности в рассматриваемой схеме при $K_3 = 0,9$ АД и СД. Приняты обозначения: $Q_{\Sigma АД}$ – потребление реактивной мощности в АД (включая потери в цепи присоединения двигателей); $Q_{\text{сети}}$ – потребление реактивной мощности в электрической сети, за исключением потерь в присоединениях АД и СД; $Q_{\Sigma \text{трансф}}$ – потребление реактивной мощности стали в трансформаторах; Q_{Σ} – потребление реактивной мощности в СЭС, включающие потери мощности в сети, АД и СД.

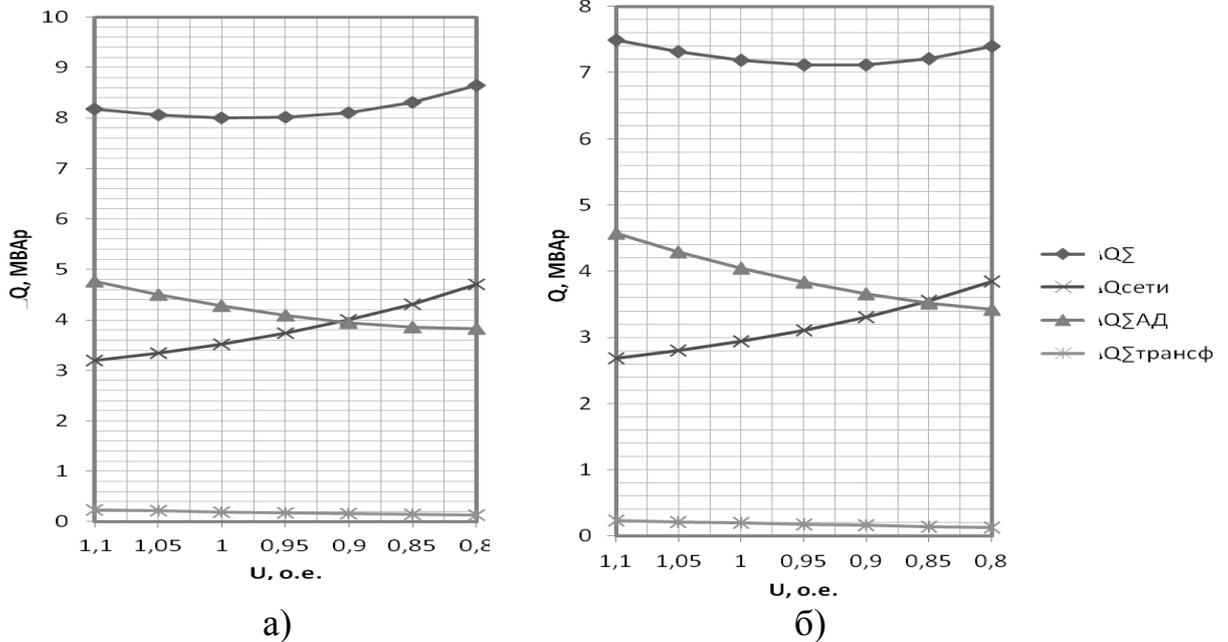


Рисунок 5.5- Статические характеристики потребления реактивной мощности для ТП-26: а) при $K_3 = 0,9$ б) при $K_3 = 0,8$

На рисунке 5.6 представлены статические характеристики потребления реактивной мощности АД в рассматриваемой схеме при $K_3 = 0,9$. Приняты обозначения: $Q_{\Sigma АД}$ – потребление реактивной мощности АД (включая потери в цепи присоединения двигателей); $Q_{12 АД}$ – потребление реактивной мощности в стали магнитных систем АД; $Q_{1 АД}$ – потребление реактивной мощности в статорных обмотках АД; $Q_{2 АД}$ – потребление реактивной мощности в роторных обмотках АД; $Q_{\Sigma АД \text{каб}}$ – потребление реактивной мощности в присоединениях АД.

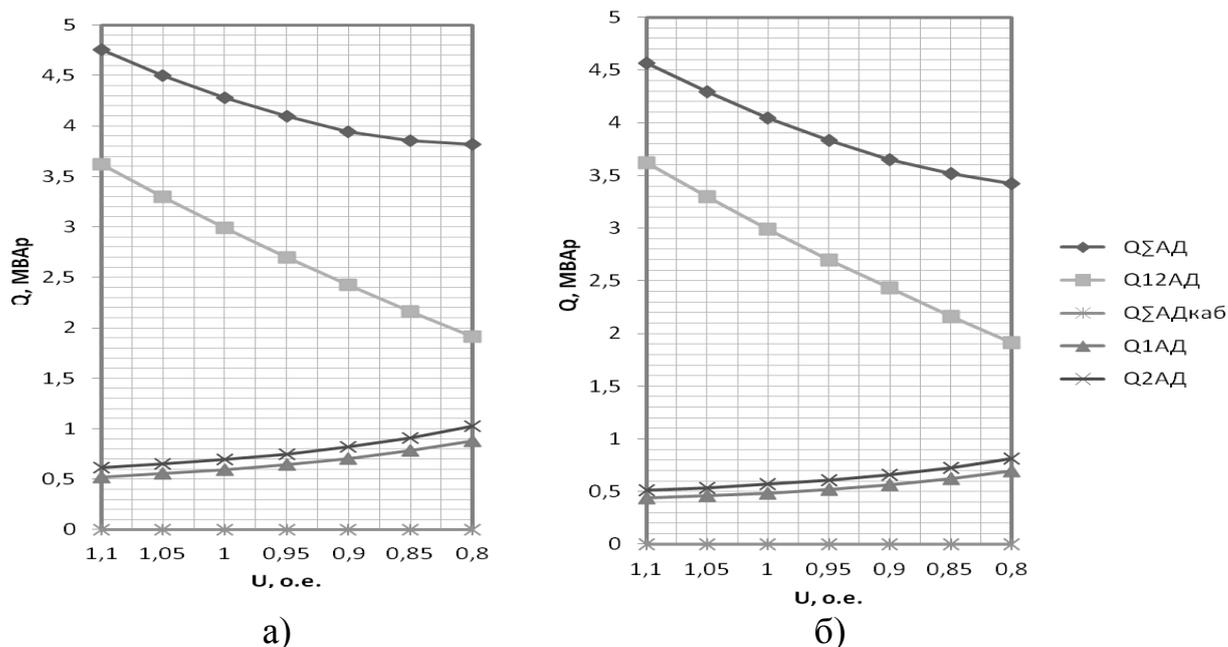


Рисунок 5.6- Статические характеристики потребления реактивной мощности в АД: а) при $K_3 = 0,9$ б) при $K_3 = 0,8$

Аналогичные статические характеристики были построены для ТП-26 АО «ССГПО» при $K_3=0,7$; $0,6$; $0,5$ АД и СД.

Далее для исследований статических характеристик потерь мощности и нагрузки выбрана система электроснабжения цеха по производству окатышей (ЦПО) подстанций ТП-26 АО «ССГПО» (рисунок 5.1). Для подтверждения адекватности полученных результатов на «ССГПО» и выявления некоторых общих закономерностей в характере статических характеристик аналогичные исследования были проведены в системе электроснабжения цеховой подстанции ТП-75 ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» (Московская область) (рисунок 5.7) при существующих $K_3=0,7$ АД и $K_3=0,8$ СД, что соответствует наиболее вероятному режиму работы двигателей.

На рисунке 12 представлена расчетная схема электроснабжения от трансформатора Т1 ТП-75 (мощность трансформатора $S_{ном} = 1600$ кВА). Общее число элементов СЭС – 134, в том числе кабели (29 присоединений общей длиной 1500 м, разброс длин присоединений – от 10 до 99 м, разброс сечений кабельных жил присоединений от $2 \times (3 \times 120)$ до $3 \times 2,5$ мм², а также 27 АД суммарной установленной мощностью 1110, 28 кВт; средняя мощность двигателей 41,12 кВт (пять имеют мощность свыше 100 кВт: 250; 160; 132; 2 по 110 кВт; минимальная мощность – 0,8 кВт).

Прочая (недвигательная) нагрузка 0,38 кВ представлена освещением и сваркой (суммарная расчетная мощность 64 кВт, или 7,4 % от общей мощности нагрузки трансформатора). Также присоединена батарея конденсаторов мощностью $Q_{БК} = 221$ квар.

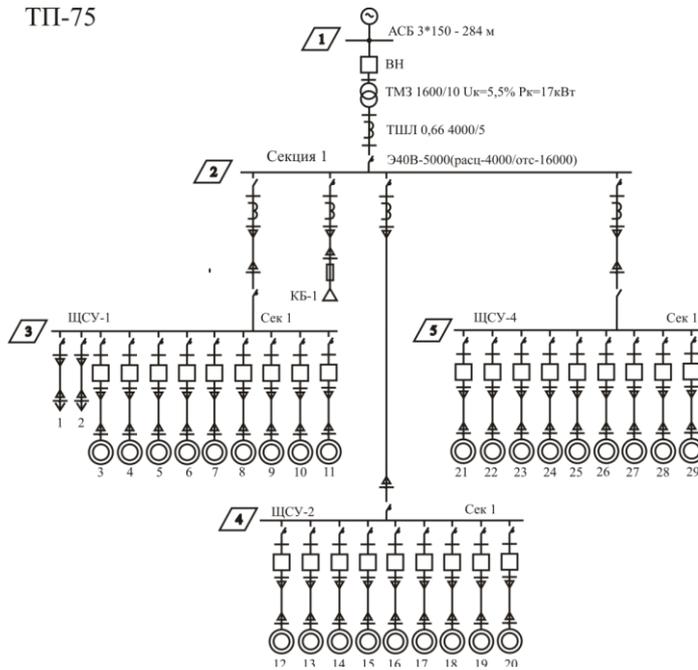
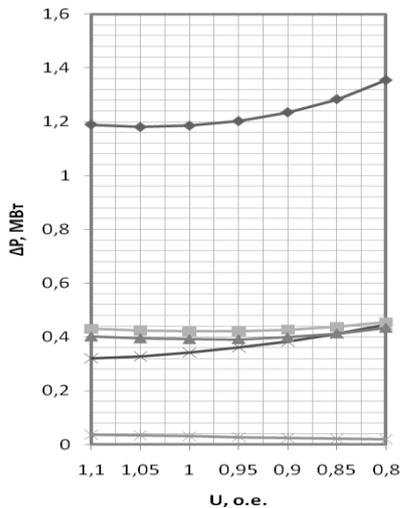


Рисунок 5.7 – Расчетная схема 1 секции ТП-75
ОАО «Воскресенские минеральные удобрения»

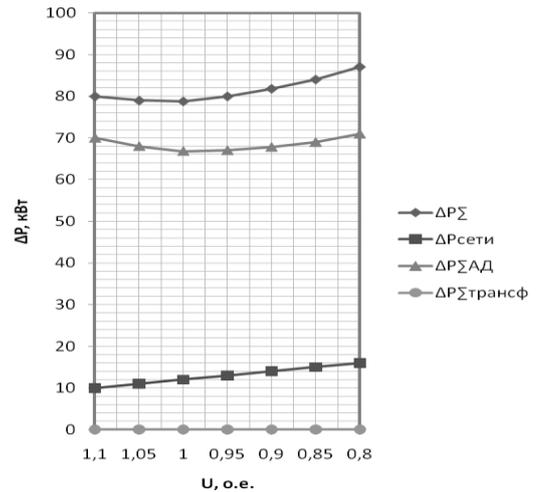
На рисунке 5.8 представлены статические характеристики суммарных потерь активной мощности для ТП 26 и ТП-75 при существующих коэффициентах загрузки. Принятые обозначения аналогичны рисунку 5.2.

На рисунке 5.9 представлены статические характеристики суммарных потерь активной мощности АД для ТП 26 и ТП-75 при существующих коэффициентах загрузки. Принятые обозначения аналогичны рисунку 5.3.

На рисунке 5.10 представлены статические характеристики суммарных потерь активной мощности СД для ТП-26 при существующих коэффициентах загрузки. Принятые обозначения аналогичны рисунку 5.4.

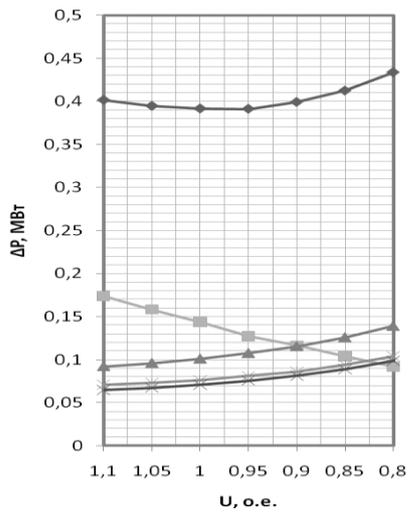


а)

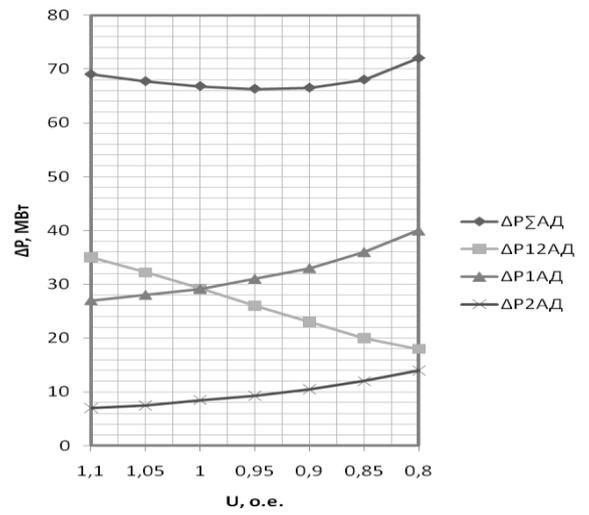


б)

Рисунок 5.8 - Статические характеристики потерь активной мощности: а) ТП-26 б) ТП-75



а)



б)

Рисунок 5.9 - Статические характеристики потерь активной мощности в АД: а) ТП-26 б) ТП-75

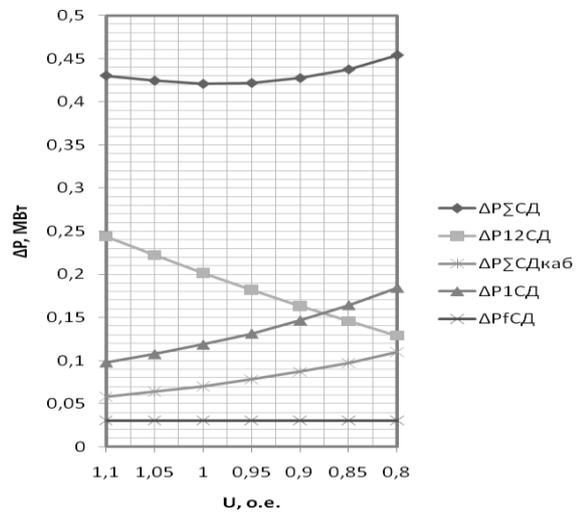


Рисунок 5.9 - Статические характеристики потерь активной мощности в СД (ТП-26)

6. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКС ПРОГРАММ, ПРЕНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО - ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ЦЕЛЮ ПОЛУЧЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И НАГРУЗОК В СЭС И УСТАНОВЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ЭТИХ ХАРАКТЕРИСТИК.

Используя каталожные данные элементов системы электроснабжения, а также зная структуру и схему системы и заранее подготовленные алгоритмы расчета (составленные по общеизвестным формулам для расчета параметров СПЭ), программа выдает пользователю результаты расчетов, строит графики потерь мощностей.

Основные функции при работе с программой:

- позволяет хранить в себе каталожные данные двигателей, КЛ, ВЛ, токопроводов, трансформаторов, реакторов;
- производить расчет параметров и характеристик элементов сети, представляя их удобочитаемом виде;
- создает графики зависимостей потерь мощностей;
- позволяет сохранить все полученные данные расчетов.

Для нормальной работы потребителей необходимо поддерживать определенный уровень напряжения на шинах подстанций. В электрических сетях предусматриваются способы регулирования напряжения, одним из которых является изменение коэффициента трансформации трансформаторов.

Для расчетно-экспериментальных исследований установившихся режимов СПЭ в качестве базового использовался программный комплекс «SEZAM», созданный на кафедре Электроснабжения промышленных предприятий Национального исследовательского университета «МРЕИ».

Применительно к целям и задачам работы проведена модернизация комплекса, которая заключалась:

- в переработке программы расчета параметров схем замещения высоковольтных и низковольтных асинхронных двигателей;
- в переработке программы расчета параметров схем замещения высоковольтных и низковольтных синхронных двигателей различных типов ;
- разработке алгоритма расчета потерь мощности в двигателях с учетом эффекта вытеснения тока в демпферных обмотках СД и АД;
- разработке программы определения статических характеристик потерь мощности как в отдельных электродвигателях, так и во всей системе электроснабжения;
- изменение интерфейса программного комплекса под задачи исследования статических характеристик потерь мощности.

На рисунке 6.1 показаны данные об основных параметрах сети. Указано количество ветвей в схеме замещения, синхронных и асинхронных двигателей, трансформаторов, кабельных линий, воздушных линий, токопроводов, реакторов, выключателей, секций, электрических систем, а

так же указано значение базисной мощности и номинальное напряжение ступени ЭДС системы.

Для точного определения места элементов (трансформатор, КЛ, ВЛ, реактор и т.д.) электрической сети, в схеме замещения имеются узлы или точки, которые имеют каждый свой номер. Это необходимо для того, что бы при вбивании координат элемента электросети, программа видела к чему прикреплён данный элемент сети и с каким элементом связан в электрической сети. Элементов, которых нет в данной схеме замещения не указывается их количество, т.е. 0. Показаны данные о структуре сети. Указаны элементы сети на каждом узле, присоединения асинхронных двигателей, секций, а так же типы и состояния выключателей.

Как видно на рисунке 6.1 в исходных данных по конфигурации электрической сети нужно указывать код элемента, которые расписаны справа в виде списка. В данной схеме замещения электрическая система имеет код элемента 1, начало узла ветви 0 и конец узла ветви 1. Очень важно указывать начало и конец ветви, иначе программа не сможет понять к чему прикреплен элемент. Вторая система на рисунке 24 имеет начало узла ветви тот же номер, что и первая система, т.е. 0.

Исходные данные по конфигурации выключателей рассматривается также методика заполнения ячеек, только еще обязательно указывается тип выключателя и его состояние, иначе программа не будет производить расчет.

Нумерация узлов, соответствующих месту присоединения асинхронного двигателя указывается узел его присоединения.

Все данные элементов системы необходимо указывать в таком же порядке как было указано в структуре сети.

На рисунке 6.1 представлены параметры электрической сети: номинальное напряжение, ток трехфазного КЗ на шинах и ток однофазного КЗ на шинах. Параметры реакторов: индуктивное сопротивление, номинальное напряжение сети в месте установки реактора.

В двухобмоточных трансформаторах указываются следующие параметры: номинальная мощность, напряжение КЗ, активные потери мощности КЗ, напряжение обмотки на ВН и на НН, шаг регулирования напряжения и число регулировочных отпаек. Технические данные брались из справочника Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования.

На рисунке 6.1 показаны данные о КЛЭП, ВЛЭП и токопроводах.

В токопроводах указывают следующие параметры: погонное индуктивное сопротивление, погонное активное сопротивление, длина, напряжение сети в месте прокладки.

В воздушных ЛЭП указываются следующие параметры: погонное индуктивное сопротивление, сечение, длина, напряжение сети в месте прокладки, Индуктивное погонное сопротивление нулевой последовательности.

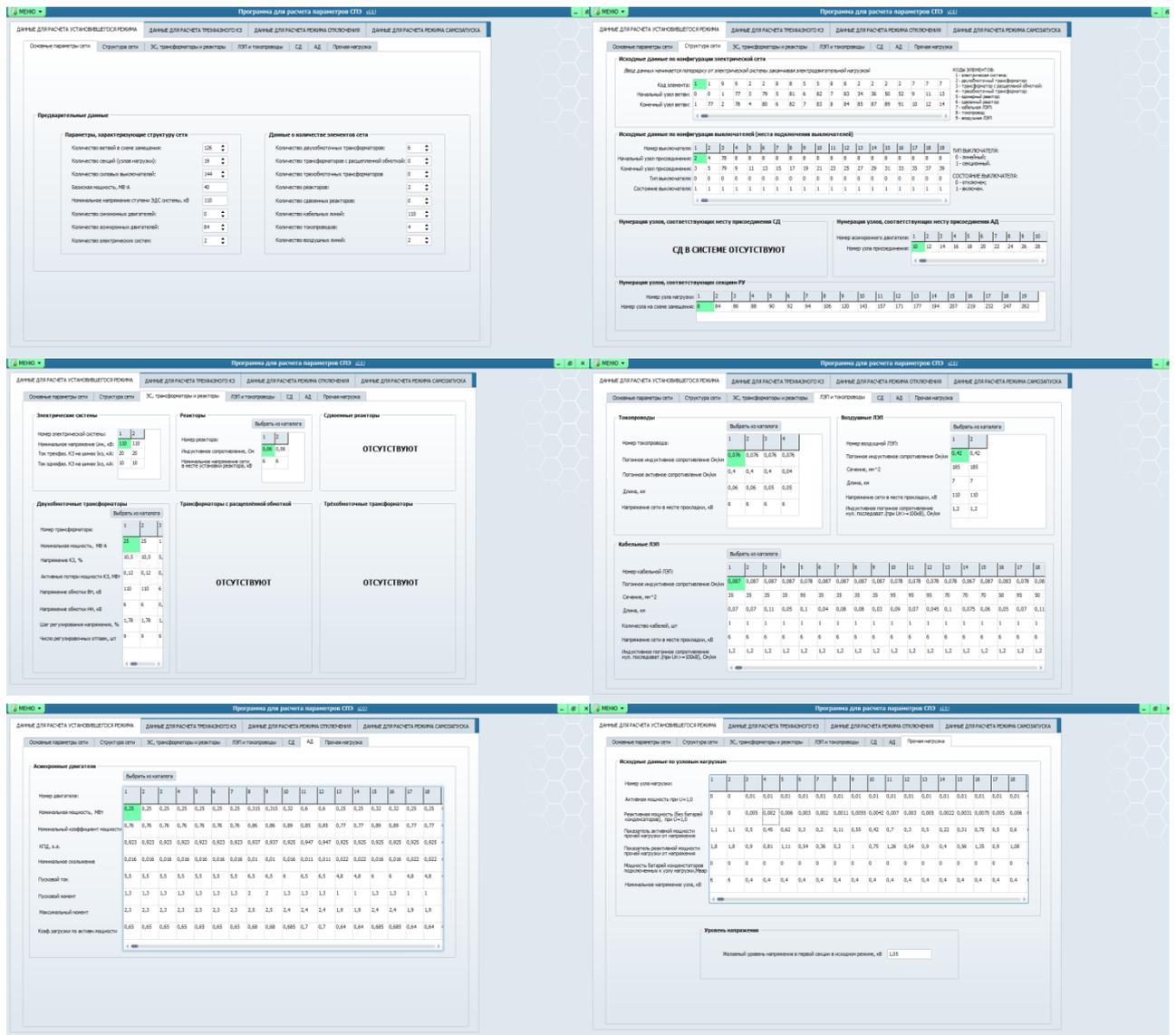


Рисунок 6.1 – Исходные данные программного комплекса

В кабельных ЛЭП указываются следующие параметры: погонное индуктивное сопротивление, сечение, длина, количество кабелей, напряжение сети в месте прокладки и индуктивное погонное сопротивление нулевой последовательности.

На рисунке 6.2 представлены технические параметры асинхронных и синхронных двигателей: номинальная мощность, номинальный коэффициент мощности, КПД, номинальное скольжение, пусковой ток, пусковой момент, максимальный момент, коэффициент загрузки по активности мощности.

В исходных данных по узловым нагрузкам вводятся следующие параметры: активная мощность, реактивная мощность, показатель активной мощности прочей нагрузки от напряжения, показатель реактивной мощности прочей нагрузки от напряжения, мощность батарей конденсаторов подключенных к узлу нагрузки, номинальное напряжение узла.

В уровне напряжения указывается желаемый уровень напряжения в первой секции в исходном режиме.

При правильно введенных данных вылезет новое окно с надписью «результаты расчетов», где проведено расчет параметров режима узлов нагрузки, асинхронные двигатели, потери в системе электроснабжения и строятся графики потерь мощности.

На рисунке 6.2 произведен расчет и указываются параметры режима узлов нагрузки, их активная мощность, реактивная мощность, ток узла нагрузки, напряжение на секции РУ, угол между векторами напряжения на секции и ЭДС электрической системы, угол между векторами тока и напряжения узла нагрузки.

В параметрах режима элементов электрической сети показаны результаты расчета напряжения в начальном узле, напряжения в конечном узле, активная и реактивная мощности в начале ветви, активная и реактивная мощности в конце пути.

На рисунке 6.2 показаны результаты параметров режима асинхронных двигателей: активная мощность, реактивная мощность, ток ЭДС, напряжение на выводах и скольжение.

Расчитаны потери активной мощности в системе электроснабжения: суммарные потери активной мощности, суммарные потери активной мощности в электрической сети, суммарные потери активной мощности в асинхронных и асинхронных двигателях.

Представлены графики потерь мощности. График строится по показаниям в таблице. Для этого надо нажать кнопку «нарисовать графики для всех напряжений», после чего появится график зависимостей потерь активной мощности от напряжения и график зависимостей потерь реактивной мощности от напряжения.

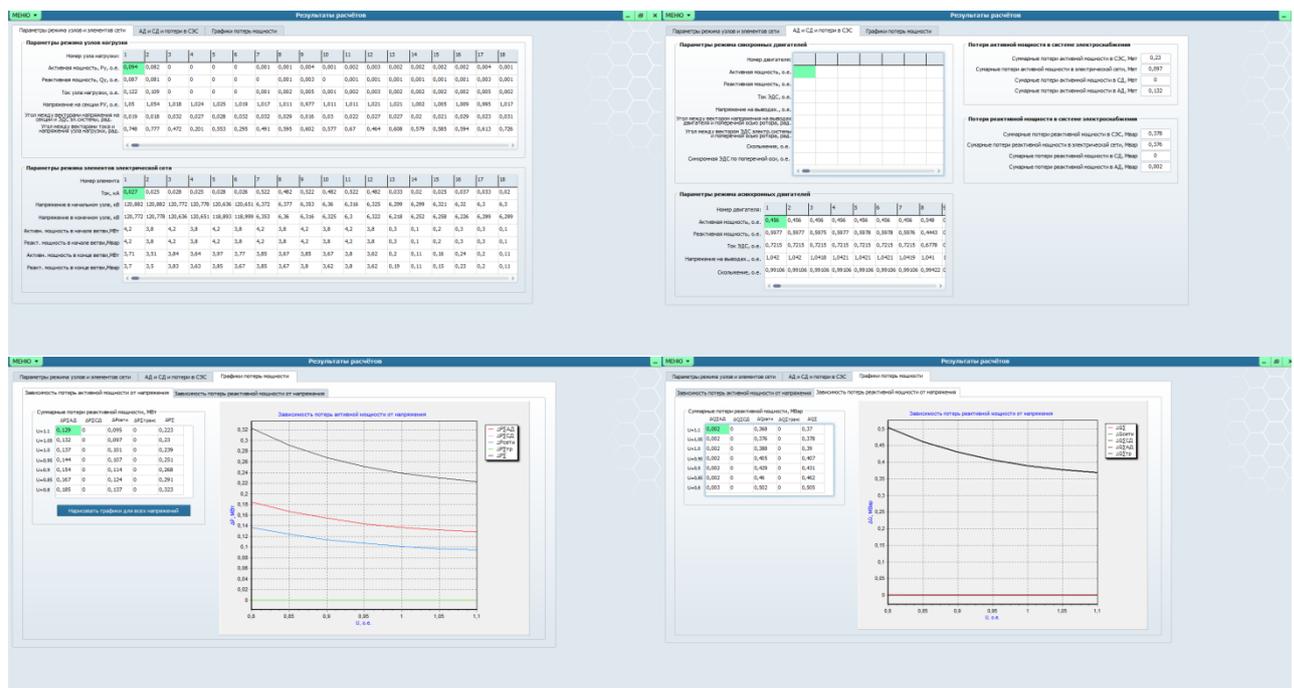


Рисунок 6.2 – Выходные данные программного комплекса

Программа для расчетов параметров СПЭ определила параметры режима узлов и элементов сети, режима элементов электрической сети, режима асинхронных двигателей, потери активной и реактивной мощности в системе электроснабжения, и построила графики зависимости потерь активной и реактивной мощности от напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в монографии теоретические и расчетно-экспериментальные исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Разработаны методика, алгоритм и программа расчета параметров схемы замещения и пусковых характеристик, низковольтных и высоковольтных АДК применительно к определению статических характеристик потерь мощности.

2. Разработаны методика, алгоритм и программа расчета параметров схемы замещения и пусковых характеристик СД с шихтованными полюсами и массивным гладким ротором применительно к определению статических характеристик потерь мощности.

3. На основе разработанных методик, алгоритмов и программ разработан программный комплекс для расчета установившихся режимов СЭС, предназначенный для выполнения комплексной оценки эффекта регулирования напряжения на шинах подстанций на уровень общих потерь мощности во всех элементах системы электроснабжения.

4. На основании расчетных исследований статических характеристик потерь мощности электрических двигателей определено, что минимум потерь активной мощности в АДК, СД с шихтованными полюсами и массивным гладким ротором существенно зависит от их загрузки и изменяется при изменении коэффициента загрузки от 1 до 0,5 в пределах напряжения от 1,1 до 0,65 от номинального.

5. Расчетные исследования статических характеристик мощности для реальных промышленных объектов показали, что в структуре электрических потерь в СЭС потери мощности в электрических двигателях при существующих коэффициентах загрузки АД и СД составляют 70% для АО «ССГПО», ТП-26 и 85% для ОАО «Воскресенские минеральные удобрения», ТП-75 и зависят от состава нагрузок и их единичной мощности.

6. Программный комплекс использован при выполнении работ по разработке энергосберегающих мероприятий для АО «ССГПО» (республика Казахстан) посредством определения оптимальных уровней напряжения с целью минимизации потерь мощности. Установлено, что эффект сокращения потерь в результате регулирования напряжения на шинах подстанции ПТ-26 в пределах значений допускаемых ГОСТ 13109-97 может составить 55 кВт или 5% от общих потерь мощности в СЭС, а сокращение непроизводительного расхода электроэнергии - 360 250 кВт*час в год или в денежном выражении 2700 тыс. тенге при числе часов использования максимума $T_{\max} = 6550$ час.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В исследуемом проекте применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Автоматический выключатель - выключатель, предназначенный для автоматической коммутации электрической цепи.

Асинхронный двигатель — электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой не равна (в двигательном режиме меньше) частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора.

Асинхронная двигатель с короткозамкнутым ротором - асинхронный двигатель , у которой ротор выполнен в виде беличьей клетки.

Асинхронная двигатель с фазным ротором - асинхронный двигатель, у которой обмотка ротора присоединена к контактным кольцам

Выключатель - контактный коммутационный аппарат, способный включать, проводить и отключать токи при нормальных условиях в цепи, а также включать, проводить в течение нормированного времени и отключать токи при нормированных ненормальных условиях в цепи, таких как короткое замыкание.

Единая энергосистема – совокупность объединенных энергосистем, соединенных межсистемными связями, охватывающая значительную часть территории страны при общем режиме работы и имеющая диспетчерское управление

Качество энергии – система показателей, устанавливаемая государственными стандартами или иными нормативными актами, подтверждающая потребительские свойства и пригодность энергии для потребления.

Комплектная трансформаторная подстанция - Подстанция, состоящая из шкафов или блоков со встроенным в них трансформатором и другим оборудованием распределительного устройства, поставляемая в собранном или подготовленном для сборки виде.

Коэффициент мощности - отношение активной мощности к полной.

Коэффициент полезного действия - Отношение полезной мощности к полной мощности.

Линия электропередачи - Электроустановка, состоящая из проводов, кабелей, изолирующих элементов и несущих конструкций, предназначенная для передачи электрической энергии между двумя пунктами энергосистемы.

Математическая модель — математическое представление реальности, один из вариантов модели, как системы, исследование которой позволяет получать информацию о некоторой другой системе.

Надежность работы энергосистемы – способность энергосистемы обеспечивать бесперебойность энергоснабжения потребителей и поддержание в допустимых пределах электроэнергетики и тепла.

Норма качества электрической энергии – установленное предельное

значение показателя качества электрической энергии.

Номинальная величина – значение величины, применяемое для обозначения или идентификации компонента, устройства или материала.

Система электроснабжения – система, объединенная общим процессом генерирования и (или) преобразования, передачи и распределения электрической энергии, и состоящая из источников и (или) преобразователей электрической энергии, электрических сетей, распределительных устройств, а также устройств, обеспечивающих поддержание ее параметров в заданных пределах.

Объединенная энергосистема – совокупность нескольких энергетических систем, объединенных общим режимом работы, имеющая общее диспетчерское управление как высшую степень управления по отношению к диспетчерским управлениям входящим в нее энергосистем.

Нагрузка потребителя – значение мощности или количества тепла, потребляемых энергоустановкой в установленный момент времени

Показатель качества электрической энергии – величина, характеризующая качество электрической энергии по одному или нескольким ее параметрам.

Показатель надежности – количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

Потери – разность между потребляемой мощностью и полезной мощностью какой-либо системы или устройства.

Потребитель электрической энергии – предприятие, организация, территориально обоснованный цех, строительная площадка, квартира, у которых приемники электрической энергии присоединены к электрической сети и используют электроэнергию.

Программное обеспечение – совокупность программ, выполняемых вычислительной системой.

Переходный режим работы энергосистемы - режим работы энергосистемы, при котором скорости изменения параметров настолько значительны, что они должны учитываться при рассмотрении конкретных практических задач.

Переходный процесс в электрической цепи - электромагнитный процесс, возникающий в электрической цепи при переходе от одного установившегося режима к другому.

Ротор - вращающаяся часть электрической машины.

Синхронный двигатель — это электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой равна частоте вращения магнитного поля в воздушном зазоре.

Статор - часть электрической машины, которая включает неподвижный магнитопровод с обмоткой.

Схема электрической цепи - Графическое изображение электрической цепи, содержащее условные обозначения ее элементов, показывающее соединения этих элементов.

Управление – любое изменение состояния некоторого объекта,

системы или процесса, ведущее к достижению поставленной цели.

устойчивость энергосистемы – способность энергосистемы возвращаться к установившемуся режиму работы после различного рода возмущений.

Фаза - Проводник, пучок проводников, ввод, обмотка или иной элемент многофазной системы переменного тока, являющийся токоведущим при нормальном режиме работы.

Электрификация – введение электрической энергии в народном хозяйстве и быту.

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Электропередача - совокупность линий электропередач и подстанций, предназначенных для передачи электрической энергии из одного района энергосистемы в другой.

Электрическая сеть - Совокупность подстанций, распределительных устройств и соединяющих их электрических линий, предназначенная для передачи и распределения электрической энергии

Электрооборудование - Совокупность электротехнических изделий и (или) электротехнических устройств, предназначенных для выполнения заданной работы.

Электроустановка - Совокупность взаимоподключенного друг к другу электрооборудования, выполняющая определенную функцию, например, производство, преобразование, передачу, распределение, накопление или потребление электрической энергии.

Электроэнергетика - раздел энергетики, обеспечивающий электрификацию страны на основе рационального расширения производства и использования электрической энергии

Электроэнергетическая система - находящееся в данный момент в работе электрооборудование энергосистемы и приемников электрической энергии, объединенное общим режимом и рассматриваемое как единое целое в отношении протекающих в нем физических процессов.

Энергетика – область народного хозяйства, науки и техники, охватывающая энергетические ресурсы, производство, передачу, преобразование, аккумулирование, распределение и потребление различных видов энергии

Энергетическая система – совокупность электрических станций, электрических и тепловых сетей, соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электрической энергии и тепла при общем управлении этой системой.

Энергосбережение — реализация правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное (рациональное) использование (и экономное

расходование) топливно-энергетических ресурсов и на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- СЭС – система электроснабжения.
СПЭ – система промышленного электроснабжения.
АД – асинхронный двигатель.
СД – синхронный двигатель.
ИС – информационная система.
ОРЭМ – оптового рынка электроэнергии и мощности.
ЛЭП – линия электропередачи.
РК – Республика Казахстан.
НТС – научно-технических совет.
СНГ – содружество независимых государств.
т.е. – то есть.
т.д. – так далее.
УРЭ – удельные расходы электроэнергии
ОУ – оптимальное управление
ЭЭ – электрическая энергия
ДУ – диспетчерское управление
ПАМ – потери активной мощности
ЭД – электрические двигатели
ЭС – электрическая сеть
ВТ – вычислительная техника
ТП – трансформаторная подстанция

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Методы оптимизации режимов энергосистем/ под ред. Горнштейна В.М. - М.: Энергия, 1981. -359 с.
- 2 Wood, A.J. Power generation, operation and control -2nd ed / A.J. Wood, В.Ф. Wollenberg. – USA: John Willey and sons, INC., 1996. - 569 с.
- 3 Маркович, И.М. Оптимизация режимов энергетических систем / И.М. Маркович. -М.: МЭИ, 1967.-72 с.
- 4 Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов /под ред. Веникова В.А. - М: Изд-во «Высшая школа», 1973-320 с.
- 5 Электрические системы. Кибернетика электрических систем / под ред. Веникова В.А. - М: Изд-во «Высшая школа», 1974. - 328 с.
- 6 Горнштейн В.М. Наивыгоднейшие режимы работы гидроэлектростанций в энергетических системах/ В.М. Горнштейн. –М.: Госэнергоиздат, 1959 - 248 с.
- 7 Веников, В.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / В.А.Веников, В.Г.Журавлев, Т.А.Филиппова. – М: Энергоатомиздат, 1990.- 352 с.
- 8 Плетнев, Г.П. Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций / Г.П. Плетнев. –М.: МЭИ, 1995. - 353 с.
- 9 Плетнев, Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике/ Г.П. Плетнев. – М.: МЭИ, 2007. - 352 с.
- 10 Мельников, Н.А. Учет потерь в сети при определении наивыгоднейшего режима энергосистемы/ Н.А. Мельников // Электричество. – 1960. - № 2. -С. 78-81.
- 11 Горнштейн, В.М. Об определении наивыгоднейшего режима работы электрических систем/ В.М. Горнштейн // Электричество. – 1961. — № 8.
- 12 Горнштейн, В.М. Наивыгоднейшего распределение нагрузки между параллельными работающими электростанциями: Дис. канд. техн. наук./ В.М. Горнштейн.- 1946 -378 с.
- 13 Плетнев, Г.П. Управление электрической нагрузкой энергоблоков ТЭС с учетом эксплуатационных ограничений/ Г.П. Плетнев, Т.Е. Щедеркина // Известия ВУЗов. - 1983.- №5.
- 14 Строев, В.А. Методы математической оптимизации в задачах систем электроснабжения/ В.А. Строев, И.С. Рокотян. – М.: МЭИ, 1993. - 72 с.
- 15 Гремяков, А.А. Методы решения оптимизационных электроэнергетических задач/ А.А. Гремяков. – М.: МЭИ, 1989 - 64 с.
- 16 Гремяков, А.А. Модели оптимизационных расчетов при краткосрочном планировании режимов электроэнергетических систем/ А.А. Гремяков, Рокотян И.С., Строев В.А.. – М.: МЭИ, 1994.- 108 с.
- 17 Реклейтис, Г. И. Оптимизация в технике. В двух книгах./ Г. И. Реклейтис [и др.].–М.: Мир, 1986. - 320 с.

- 18 Зеленохат, Н.И. Оптимизация режима работы энергосистемы с учетом стоимости потерь активной мощности в электрической сети/Н.И. Зеленохат, Д.В. Подрезова // Энергетик.– 2012. - № 3.- с. 45-49.
- 19 Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике /под общ. ред. Руденко Ю.Н. и Семенова В.А. - М: МЭИ, 2000 - 648 с.
- 20 Строев, В.А. Алгоритмы расчета установившихся режимов и переходных процессов в электроэнергетической системе/ В.А Строев., Ю.В. Шаров, О.Н. Кузнецов. - М.: МЭИ, 2006. - 84 с.
- 21 Рокотян, И.С., Применение нелинейного математического программирования в энергетических задачах/ И.С. Рокотян, Д.А. Федоров. – М.: МЭИ, 1983. - 52 с.
- 22 Крумм, J1.A. Методы приведенного градиента при управлении электроэнергетическими системами/ J1.A. Крумм.- Новосибирск: Наука, 1977. - 368 с.
- 23 Баринов, В.А. Режимы энергосистем: методы анализа и управления/ В.А Баринов., С.А. Свалов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 440 с.
- 24 Наумов, И.В. Разработка методики оптимальной загрузки энергоагрегатов электростанций мегаполиса в условиях рыночных отношений: дис. . канд. техн. наук./ И.В. Наумов.– Москва, 2006. - 177 с.
- 25 Пащенко, А.В. Оптимизация режима энергосистемы по активной мощности с учетом динамического программирования / А.В. Пащенко, Ю.Б. Попова // Изв. ВУЗов Энергетика. 1999. - № 6. - С. 39-46.
- 26 Swain, R.K. Short-term Hydrothermal Scheduling using Clonal Selection Algorithm/ R.K. Swain, A.K. Barisal // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, March 2011, Vol. 33. Vol. 647-656.
- 27 Hedman, K.W. Co-Optimization of Generation Unit Commitment and Transmission Switching With N-1 Reliability/ K.W. Hedman, M.C. Ferris, R.P. O'Neil // IEEE Transactions on power systems, May 2010, Vol. 25. № 2. –Vol. 1052-1063.
- 28 Статистические методы в инженерных исследованиях/под ред. Круг Г.К. - М.: «Высшая школа», 1983. -216 с.
- 29 Абакшин, П.С. Программное обеспечение для планирования суточных энергетических режимов ЕЭС России (ПРЭС-СУТКИ)/ П.С. Абакшин, Т.М. Алябышева, Р.М. Яганов // Электронный журнал «Новое в российской электроэнергетике». 2002. - № 6. - С. 37-40.
- 30 Сайт программного комплекса RastrWin в интернете - www.rastrwin.ru.
- 31 Сайт ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» в интернете <http://ipad.ntc-power.ru>.
- 32 Абакшин, П.С. Автоматизация планирования оптимальных долгосрочных энергетических режимов и формирования сводных прогнозных балансов электроэнергии и мощности субъектов ГЭС России на уровне СО-ЦДУ ЕЭС с использованием ПК ПРЭС/ П.С. Абакшин, Т.Н. Протопопова, М.В. Егорин.// Пятый специализированный научно-технический семинар «Современные методы и программные средства

анализа и планирования электропотребления, балансов мощности и электроэнергии». Энергостат, 2007 г. (encrgostat.ru).

33 Шишкин, А.А. Программный комплекс расчета установившихся режимов в схемах большой размерности/ А.А Шишкин. // Электронный журнал «Новое в российской электроэнергетике». -2004. -№ 1. — С. 14-21.

34 Сайт программного комплекса DigSILENT Power Factory в интернете -www.digsilent.de.

35 Сайт программного комплекса PSS/E в интернете - www.energy.siemens.com.

36 Шаханов, В.С., Выбор наивыгоднейшего состава работающего оборудования современных энергосистем/ В.С. Шаханов [и др.]. - Кишинев: РИО АН МССР, 1970.- 157 с.

37 Злотник С.Г. Некоторые применения метода множителей Лагранжа и динамического программирования для определения наивыгоднейшего состава работающего оборудования электростанций и энергосистемы: Дис. канд. техн. Наук/ С.Г. Злотник. – Кишинев, 1967. - 182 с.

38 Frangioni, A. Sequential Lagrangian-MILP approaches for Unit Commitment problems/ A. Frangioni, C. Gentile, F. Lacalandra. // Elsevier. 2011. - ORL 33. - Vol. 585-593.

39 Frangioni, A. Solving unit commitment problems with general ramp constraints / A. Frangioni, C. Gentile, F. Lacalandra. // Elsevier. 2008. - ORL 30. - Vol. 316-326.

40 Chen, C.-L. Branch-and-bound scheduling for thermal generating units/ C.-L. Chen, S.-C. Wang. // IEEE Transactions on power systems, June 1993, Vol. 8. № 2. -С. 184-189.

41 Wang, Y. Unit Maintenance Scheduling in Open System Using Genetic Algorithm / Y.Wang, E.Handschin. // IEEE Transmission and Distribution Conference (11-16 Apr. 1999), Vol. 1.-С. 334-339.

42 Мань, Н.В. Применение «оврагоперешагового» метода оптимизации для идентификации передаточной функции объектов управления/ Н.В. Мань // Теплоэнергетика. -1995. -№ 6. - С. 71-77.

43 Салихов, А.А. Рациональная загрузка оборудования ТЭС/ А.А. Салихов // Электрические станции. - 2006. - № 5. - С. 47-50.

44 Малафеев, А.В. Получение экономико-математических моделей турбогенераторов промышленных электростанций с целью оптимизации режима системы электроснабжения / А.В. Малафеев, В.А.Игуменцев, А.В. Хламова. // Электротехнические комплексы и системы управления.-2009.- №4.- С.34-38.

45 Аракелян, Э.К. Повышение экономичности и маневренности оборудования тепловых электростанций/ Э.К. Аракелян, В.А. Старшинов. – М.: МЭИ, 1993.- 328 с.

46 Аракелян, Э.К. Оптимизация режима работы тепловых электростанций по экономическому и экологическому критериям/ Э.К. Аракелян, Л.К. Хоа, Н.В. Мань // Вестник МЭИ. 2002. - № 4. - С. 25-30.

- 47 Горев, Е.Н. Эколого-экономическая оптимизация природоохранной деятельности в энергетике/ Е.Н. Горев // Электрические станции. 1996. - № 8. - С. 28-32.
- 48 Аминов, Р.З. Векторная оптимизация режимов работы электростанций/ Р.З. Аминов. - М: Энергоатомиздат, 1994.- 304 с.
- 49 Хачатрян, В.С. Оптимизация режима большой электроэнергетической системы методом декомпозиции по активным мощностям электрических станций / В.С. Хачатрян [и др.] // Электричество. - 2008.-№2.-С. 10-22.
- 50 Capitanescu, F. Sensitivity-Based Approaches for Handling Discrete Variables in Optimal Power Flow Computations / F. Capitanescu, L. Wehenkel // IEEE Transactions on power systems, November 2010, – Vol. 25. -№ 4. С. 1780-1789.
- 51 Летун, В.М. Оптимизация режимов работы энергосистем основа модели оптового рынка электроэнергетики / В.М. Летун // Энергетик. - 2010. - № 4. - С. 2-4.
- 52 Ерохин, П.М. Задачи и технологии оперативно-диспетчерского управления режимами ЕЭС в конкурентно-рыночной энергетике России: Автореф. дис. д-ра техн. наук./ П.М. Ерохин. - Екатеринбург, 2005. - 48 с.
- 53 Бартоломей, П.И. Решение комплексной задачи распределения электроэнергии в энергосистеме / Бартоломей П.И. [и др.] // Электричество.– 2007. - № 2. - С. 8-13.
- 54 Floudas, C. Nonlinear and Mixed-Integer Optimization: Fundamentals and Applications/ C. Floudas.-New York: Oxford University Press, Inc., 1995.– 462 vol..
- 55 Цыпулев, Д.Ю., Методические положения оптимального управления режимами ТЭЦ со сложным составом оборудования/ Д.Ю. Цыпулев, Э.К. Аракелян, В.А. Макарян // Теплоэнергетика.– 2008. - № 3. - С. 67-73.
- 56 Натыкач, В.В. Система оптимизации работы электростанции OPTIMAX / В.В. Натыкач // Энергетик. – 2009. - № 12. - С. 43-45.
- 57 Zelennkhat, N.I. The application of distributed power characteristic for the optimization of electrical station load in complex electrical systems/ N. I. Zelennkhat, [and other] // 36-th universities power engineering conference (UPES). - 2001. – Swanscus, UK (Англия) - С. 1 -6.
- 58 Васин, В.П. Распределение нагрузок между агрегатами станции, при невыпуклых расходных характеристиках/ В.П. Васин, В.А. Старшинов // Труды МЭИ.– 1978.-124 с.
- 59 Щегляев, А.В. Паровые турбины (теория теплового процесса и конструкции турбин)/ А.В. Щегляев. –М.: Энергия, 1976. - 368 с.
- 60 Бененсон, Е.И., Иоффе Л.С. Теплофикационные паровые турбины/ Е.И Бененсон., Л.С. Иоффе. -М.: Энергия, 1976. –264 с.
- 61 Смирнов, К.А. Выбор наиболее экономичного состава включенных агрегатов / К.А. Смирнов // Электричество. - 1962. -№ 1. - С. 12-15.

- 62 Барзам, А.Б. Системная автоматика А.Б. / Барзам.– М.: Энергоатомиздат, 1989.
- 63 Будзко, И.А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов/ И.А. Будзко, М.С. Левин. - М.: Агропромиздат, 1985. - 320с.
- 64 Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников . - М.: Высш. шк., 1978.
- 65 Веников, В.А. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях / В.А. Веников . - М., Энергия , 1975. - 136 с.
- 66 Веников, В.А. Электрические системы. Электрические сети / В.А. Веников . - М.: Высш. шк., 1998. - 511 с.:
- 67 Веников, В.А. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах / В.А. Веников, В.И. Идельчик, М.С. Лисеев. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 216 с.
- 68 Воротницкий, В.Э. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем/ В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 368с.
- 69 Воротницкий, В.Э. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в городских электрических сетях / В.Э. Воротницкий, Я.Т. Загорский, В.Н. Апрыткин // Электрические станции.- 2000.- №5.- с.9-13.
- 70 Гамазин, С.И. Устойчивость узлов нагрузки в системах электроснабжения/ С.И. Гамазин.– М.: Моск.энерг. ин-т, 1977.
- 71 Гамазин, С.И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой / С.И. Гамазин, В.А. Ставцев, С.А. Цырук. – М.: Издательство МЭИ, 1997. - 424 с.:ил.
- 72 Галанов, В.П. Влияние качества электроэнергии на уровень ее потерь в сетях/ В.П. Галанов, В.В. Галанов // Электрические станции. - 2001. - №5. - с.54-63.
- 73 Грачева, Е. И. Определение потерь электроэнергии в низковольтных цеховых сетях промышленных предприятий: дисс. канд. техн. наук: 05.09 03-Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование / Е. И. Грачева.- Моск. энерг. ин-т (ТУ).– 1996 . – 188 с.
- 74 Гуревич, Ю.Е. Расчет статических характеристик крупных узлов нагрузки с использованием типовых параметров Ю.Е. / Гуревич, Э.А. Хачатрян. - М.: Всесоюзный институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов, 1980. - 30 с.
- 75 Гамазин, С.И. Определение расчетных параметров синхронных двигателей с массивными полюсами/ С.И. Гамазин, Т.А. Садыкбеков // Пром.энергетика.- 1984.- №9. - с.26-30.
- 76 Железко, Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов/ Ю.С. Железко. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 176с.
- 77 Жданов, П.С. Вопросы устойчивости электрических систем/ П.С.

Жданов. - М., Энергия, 1979. - 456 с.

78 Железко, Ю.С. Оценка потерь электроэнергии, обусловленных инструментальными погрешностями измерения/ Ю.С. Железко// Электрические станции.- 2001.-№8.-с. 19-24. 7

79 Железко, Ю.С. Принципы нормирования потерь электроэнергии в электрических сетях и программное обеспечение расчетов/ Ю.С. Железко// Электрические станции.- 2001.- №9.-с.33-38.

80 Железко, Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях/ Ю.С. Железко. - М.: НИЦ ЭНАС, 2002. - 280с.

81 Кацман, М.М. Электрические машины -2 изд., перераб. и доп./ М.М. Кацман. – М.: Высш. шк., 1990.- 463 с.

82 Конюхова, Е. А. Определение потерь мощности по потерям напряжения в электрических сетях промпредприятий/ Е. А. Конюхова . – М.: Энергопрогресс, 2003 . – 72 с.

83 Конюхова, Е. А. Регулирование электропотребления промышленного предприятия при взаимосвязанном выборе режима напряжения и компенсации реактивной мощности : дис.докт. техн. наук : 05.09.03- Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование / Е. А. Конюхова . – Моск. энерг. ин-т (ТУ), 1998 . – 455 с.

84 Конюхова, Е.А. Исследование влияния статических характеристик нагрузки на потери мощности и напряжения в системе электроснабжения промпредприятия/ Е. А. Конюхова // Промышленная энергетика, 1995, №9.

85 Копытов, Ю.В. Экономия электрической энергии в промышленности: справочник/ Ю.В. Копытов, Б.А. Чуланов. – М.: Энергия, 1978.

86 Линдорф, Л.С. Повышение надежности работы синхронных двигателей/ Л.С. Линдорф. – М.: Госэнергоиздат, 1960.

87 Маркович, И.М. Режимы электрических систем / И.М. Маркович. – М.: Энергия, 1964.

88 Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. Пособие для вузов.-4-е изд., перерб и доп./ Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков.-М.: Энергоатомиздат, 1989.-608 с.: ил.

89 Овчинников, А. Потери электроэнергии в распределительных сетях 0,38 - 6 (10) кВ/ Овчинников А. // Новости ЭлектроТехники.-2003.- №1.- с.15-17.

90 Павлюк, К. Пуск и асинхронные режимы синхронных двигателей/ К. Павлюк, С. Беднарк. – М.: Энергия, 1971.

91Петрова, Е. Г. Определение потерь мощности по потерям напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий: дисс. канд. техн. наук:05.09.03- Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование / Е. Г. Петрова.- Моск. энерг. ин-т (ТУ), 1997 . – 149 с.

- 92 Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистемы/под ред. В.Н. Казанцева - М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 93 Слорадж, М.Н. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей/ М.Н. Слорадж . - М.: Энергия, 1977.
- 94 Boglietti Induction motor model for taking into account additional losses / Boglietti , A. Cavagnino , M. Lazzari // presented at the Conf. Rec. ICEM.- 2006.
- 95 Ghozzi, S. Energy optimization of induction motor drives/ S. Ghozzi, K. Jelassi, X. Roboam// Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT '04. 2004 IEEE International Conference on , vol.2, no. - pp. 602- 610. - Vol. 2.- 8-10. - Dec. 2004.
- 96 Pitis, C.D. Power savings obtained from supply voltage variation on squirrel cage induction motors/ C.D. Pitis, M.W. Zeller // Electric Power Conference, 2008. EPEC 2008. IEEE Canada , vol., no., pp.1-3, 6-7 Oct. 2008
- 97 Kellogg, S.D. A Linearized Procedure for Voltage Control / S.D. Kellogg , W. Mack Grady //Electric Power Systems Research.- 1990. -N18. - p. 23-26.
- 98 Постников, И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин/ И.М. Постников. - М.: Высш. шк., 1975. - 319 с.
- 99 Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под. ред. Л.Г. Мамиконянца. Изд. 4-е. - М.: Энергоатомиздат, 1984
- 100 Tanga, Y. Intelligent load frequency controller using GrADP for island smart grid with electric vehicles and renewable resources/ Y. Tanga [and other] //Neurocomputing. Volume 170. -25 December 2015.- Pages 406–416. (IScIDE 2013). – Computational Energy Management in Smart Grids
- 101 Storti, G.L. Comparison between time-constrained and time-unconstrained optimization for power losses minimization in Smart Grids using genetic algorithms Neurocomputing, computer science, artificial intelligence/, G.L. Storti [and other] //Conference: Computational Energy Management in Smart Grids Workshop (CEMiSG). Beijing, CHINA. - Volume: 170. – 2015.- Pages: 353-367.
- 102 Zdraveski, V. Dynamic intelligent load balancing in power distribution networks./ V. Zdraveski, M. Todorovski, L. Kocarev // International journal of electrical power & energy systems . – 2015. - 12.Vol.: 73.- Pages: 157-162/
- 103 Ross, M. Multiobjective Optimization Dispatch for Microgrids With a High Penetration of Renewable Generation/ M. Ross [and other] //IEEE transactions on sustainable energy.- Oct.2015. –Vol.: 6, Issue:4.- Pages: 1306-1314.
- 104 Tang Yufei; Yang Jun; Yan Jun; He Haibo. Intelligent load frequency controller using GrADP for island smart grid with electric vehicles and renewable resources / Y.Tang [and other] // Neurocomputing. Vol.: 170. - 2015 Pages: 406-416
- 105 Ansarian, M. Optimum generation dispatching of distributed resources in smart grids/ M. Ansarian [and other] // International transactions on electrical energy systems. -2015, July. Vol.: 25. Issue: 7. - Pages: 1297-1318/

106 Vechiu, I. Control of power converters for microgrids *Compel-the international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering* / I. Vechiu [and other] //Conference: 4th International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER 09). 2011. Vol.: 30 . Issue: 1. Pages: 300-309

107 Andreoni. L. Implementation of Wireless Remote Monitoring and Control of Solar Photovoltaic (PV) System. 2012 Sixth *IEEE/PES transmission and distribution: latin America/ L. Andreoni [and other]* // Conference and exposition (T&D-LA). Montevideo, Uruguay. 2012.

108 Calderaro, V. Optimal Switch Placement by Alliance Algorithm for Improving Microgrids Reliability *Ieee transactions on industrial informatics* / V.Calderaro [and others] . – 2012. Vol.: 8. Issue: 4. Pages: 925-934.

109 Lyons, P. F. A practical implementation of a distributed control approach for microgrids *intelligent automation and soft computing/ P. F Lyons. [and others.-* 2010. Vol.: 16. Issue: 2. Pages: 319-334.