МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

К Г Э У

«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Кафедра № ЭСиС

Экз. № ____

УЧЕБНО - МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА

по учебной дисциплине

Б.1.В.ДВ.13. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ЛЕКЦИЯ:

МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ЭСиС

Максимов В.В.

«   »____________ 201_ г.

УЧЕБНО - МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА

по учебной дисциплине «Физико-математическое моделирование электроэнергетических систем»

Лекция: Моделирование узлов электрической сети

Учебные и воспитательные цели:

1. Дать систематизированные знания о физико-математическом моделировании электроэнергетических систем.
2. Воспитывать добросовестное отношение к учебе, стремление к самосовершенствованию, к овладению избранной профессией.

Вид занятия: лекция

Продолжительность занятия: 2 часа.

Структура занятия и расчет времени.

№ п/п	Структура занятия	Время, мин
1	**Вводная часть**	**10-15**
2	**Основная часть** **1. Моделирование генераторных узлов электрической сети** **2. Эквивалентирование схем электрических сетей** **3. Моделирование схем электрических сетей с помощью четырехполюсников** **4. Использование четырехполюсников для эквивалентирования схем электрических сетей**	**70-75**
3	**Заключительная часть**	**3-5**

Вводная часть занятия: проверить наличие и готовность обучающихся к занятию; провести опрос по пройденному материалу в соответствии с перечнем вопросов и подвести его итоги; объявить тему и учебные цели занятия; обратить внимание обучающихся на важность изучения учебных вопросов занятия, так как знание их может быть востребовано при выполнении курсовой работы и выпускной квалификационной работы.

Основная часть занятия: учебные вопросы занятия изучаются в составе группы с применением диафильма, диапроектора, стендов, плакатов, классной доски, цветных мелков. Изучать материал занятия следует в строгом соответствии с учебной программой и тематическим планом изучения учебной дисциплины.

Наименование учебных вопросов преподаватель объявляет последовательно по мере изложения учебного материала и записывает их на классной доске.

На классной доске следует также записывать номер и название темы и занятия, учебные вопросы, цифровые характеристики, формулы, непонятные и сложные для обучаемых термины, чертить поясняющие схемы. Записи на классной доске вести последовательно и аккуратно.

В ходе изложения учебного материала необходимо контролировать степень усвоения учебного материала путем постановки контрольных и проблемных вопросов.

При изучении учебного материала обучающихся должны вести конспект. Контроль за качеством ведения конспектов преподаватель осуществляет в ходе проведения занятия.

Основная часть занятия:

1. Моделирование генераторных узлов электрической сети

Генераторными узлами называют узлы, в которых генерируется активная мощность. Реактивная мощность, как правило, также генерируется в таких узлах. Генераторные узлы – это шины электрических станций или шины мощной системы, схема которой не входит в модель для расчетной схемы.

Моделируются генераторные узлы по разному:

- Так же как и узел нагрузки – постоянными значениями активной и реактивной мощности, но с противоположным знаком.
- Постоянным значением активной мощности и фиксированным значением модуля напряжения в узле. Реактивная мощность не известна и подлежит расчету.
- Генераторный узел это базисный и балансирующий узел одновременно. Активная и реактивная мощности узла подлежат вычислению.

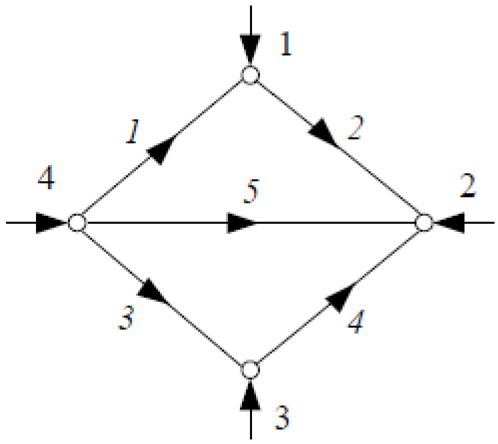
- Генераторный узел это базисный узел, но с известными значениями активной и реактивной мощности – заданы все четыре независимых параметра режима – *P*, *Q*, *U*, *δ*.
- Генераторный узел это балансирующий узел, но напряжение в нем неизвестно ни по модули, ни по фазе. Подлежат определению все

  четыре независимых параметра режима – *P*, *Q*, *U*, *δ*.

При фиксации активной мощности и модуля напряжения обычно в уравнения установившегося режима входит уравнения для активной мощности узла (3.46) и уравнение вида: $U_i^2 = U_i'^2 + U_i''^2$, где U_i задано, а U'_i и U''_i подлежат определению.

В тех случаях, когда для одного из узлов требуется задать все четыре независимых параметра режима – *P*, *Q*, *U*, *δ*. (базисный узел), то в сети должен появиться узел, в котором не известен ни один из этих четырех параметров – балансирующий узел. Происходит разделение балансирующего и базисного узлов.

Форма уравнений установившегося режима меняется, а именно – перестраивается матрица узловых проводимостей. Так, например, если для графа сети на рис. 3.10 базисным стал узел 2,



а балансирующим остался узел 0, то матрица **Y** принимает вид:

$$
\underline{\mathbf{Y}} = \begin{array}{c}
\left(\begin{array}{ccc}
\left(\dfrac{1}{\underline{Z}_1}+\dfrac{1}{\underline{Z}_2}\right) & -\dfrac{1}{\underline{Z}_1} & 0 \\
-\dfrac{1}{\underline{Z}_2} & \dfrac{1}{\underline{Z}_5} & -\dfrac{1}{\underline{Z}_4} \\
0 & -\dfrac{1}{\underline{Z}_3} & \left(\dfrac{1}{\underline{Z}_3}+\dfrac{1}{\underline{Z}_4}\right)
\end{array}\right)
\begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array}
\left.\vphantom{\begin{array}{c}1\\2\\3\end{array}}\right\} \text{Узлы без балансирующего} \\
\underbrace{\begin{array}{ccc} 1 & 0 & 3 \end{array}}_{\text{Узлы без базисного}}
\end{array}
$$

2. Эквивалентирование схем электрических сетей

Эквивалентирование широко применяется в расчетах режимов сложных электроэнергетических систем. Так, рассматривая режимы работы отдельной ЭЭС, все соседние энергосистемы представляем их эквивалентами, полученными на основании так называемых критериев эквивалентности. Число таких критериев и их содержание зависят от задачи, применительно к которой выполняется эквивалентирование.

Рассмотрим ЭЭС, состоящую из двух подсистем: подсистема I, которая не подлежит преобразованию и подсистема II, которую следует преобразовать в эквивалент (рис. 3.12, *а*).

Рис. 3.12. Условное изображение ЭЭС с эквивалентируемой частью:
а – до эквивалентирования; *б* – после эквивалентирования

Узлы, в которых соединяются две подсистемы, называются узлами примыкания, а ветви, подходящие к ним со стороны сохраняемой части схемы, – ветвями примыкания.

После преобразования подсистемы II в ней могут сохраниться некоторые узлы, имеющие принципиальное значение для режимов системы, или не сохраниться ни одного узла, как на рис. 3.12, *б*, и вся схема эквивалента представляет собой многоугольник, построенный на узлах примыкания 1, 2,…, *p*. Следует отметить, что эквивалент имеет также поперечные ветви на нейтральную плоскость системы как пассивные – проводимости, так и активные – задающие мощности нагрузки и генерации (на рис. 3.12 не показаны).

Рассчитанные напряжения в узлах примыкания эквивалента должны быть равны в исходной схеме и после ее преобразования.

Потоки мощности в ветвях примыкания эквивалента должны быть равны в исходной схеме и после ее преобразования.

$$\begin{aligned} &\underline{\mathbf{U}}_j = \underline{\mathbf{U}}_j^{э}, \ j \in a, \\ &\underline{\mathbf{S}}_{ij} = \underline{\mathbf{S}}_{ij}^{э}, \ i \in b. \end{aligned} \tag{3.53}$$

где a – множество номеров узлов примыкания; b – множество номеров узлов в непреобразуемой части сети, имеющих смежную ветвь с узлами примыкания.

Добиться выполнения критериев эквивалентности можно, как правило, для какого-то одного режима работы электрической системы.

Изменение режима требует и изменения (корректировки) эквивалента. Рассмотрим пример эквивалентирования части электрической схемы сети, рис. 3.13, *а*. В этом примере: множество номеров узлов примыкания – a={4, 7, 11}; и множество номеров узлов из неэквивалентируемой части схемы, смежных с узлами примыкания – b = {3, 6, 10}. Исключаемые узлы: {12, 13, 14, 15, 16}.

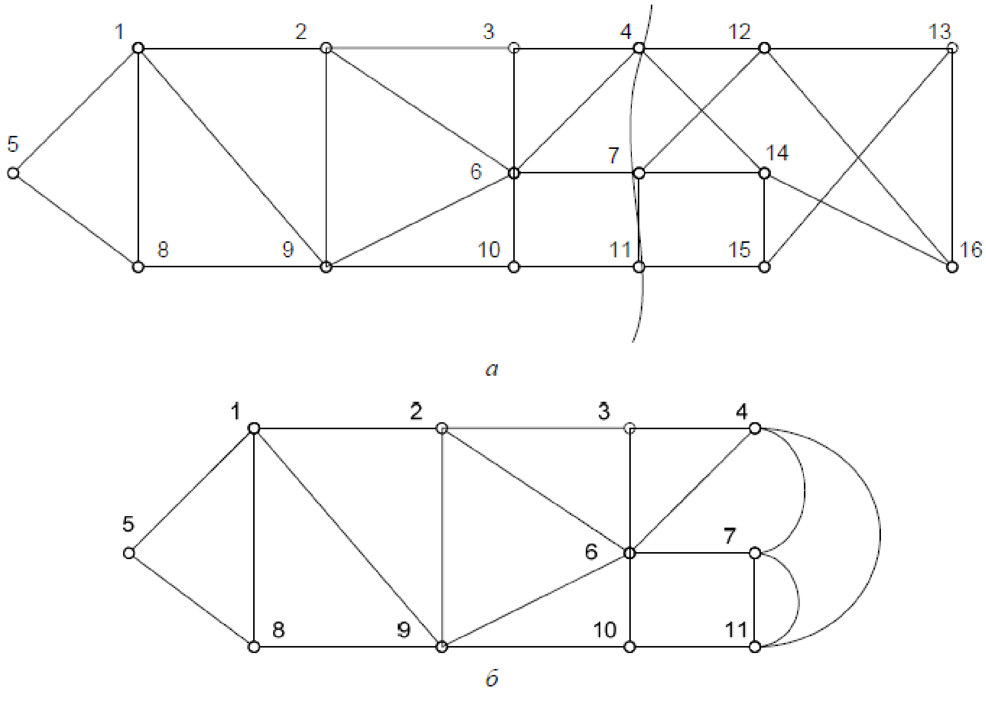


Рис. 3.13. Граф сети с эквивалентируемой частью: *а* – до эквивалентирования, *б* – после эквивалентирования

В данном примере в эквиваленте не сохранено ни одного узла и граф эквивалента представляет из себя многоугольник, опирающийся своими вершинами на узлы примыкания, рис. 3.14.

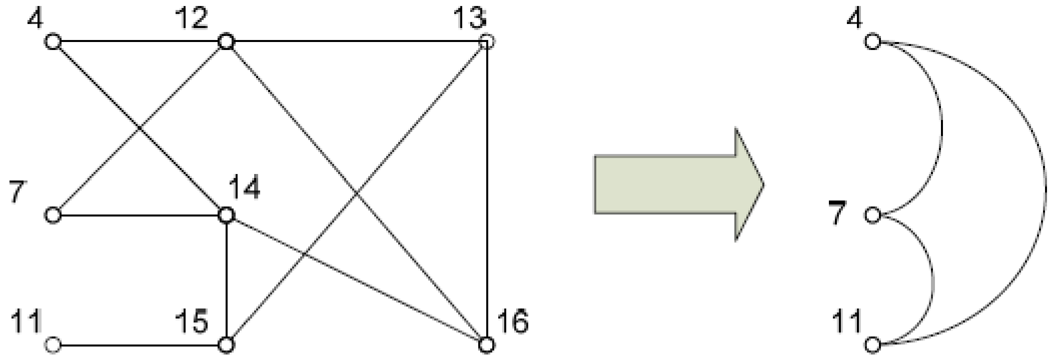


Рис. 3.14. Эквивалентирование схемы в многоугольник

По сути – это последовательно-паралелльные преобразования, а также преобразования звезды в многоугольник и обратно. Формализуется исключением переменных методом Гаусса.

При построении модели эквивалента, адекватно представляющего преобразованную часть электрической системы для множества режимов, требуется учет нелинейности уравнений установившегося режима.

В этом случае, а также в случаях эквивалентирования путем расчета проводимостей нагрузки через номинальное напряжение неизбежна погрешность моделирования.

Минимизация погрешности может быть выполнена путем поиска минимума некоторой целевой функции:

$$C_1(\mathbf{R}) = \sum_{j=1}^{m} \left[\left(y'_j - y''^{э}_j(\mathbf{R}) \right) / \, y'_j \right]^2, \qquad (3.54)$$

где y'_j и $y''^{э}_j$ – компоненты вектора выходных переменных исходной и эквивалентной моделей, которые должны воспроизводится правильно;

R - вектор параметров эквивалентной модели; m – число выходных переменных.

Пример

Для схемы на рис 3.15 выполним исключение узлов номер 4 и 5

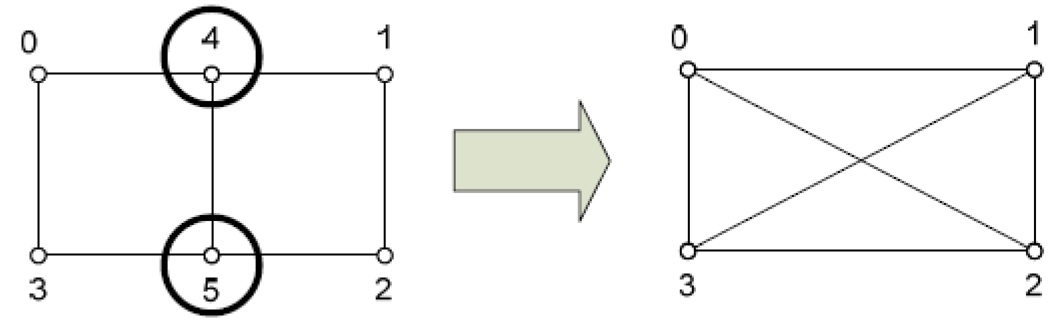


Рис. 3.15. Пример эквивалентирования схемы сети

Разделим на блоки матрицы в линейных уравнениях установившегося режима (3.28) - выделим блоки для сохраняемых и исключаемых узлов.

Обозначим вектор задающих токов сохраняемых узлов:

$$\underline{J}_c = \begin{pmatrix} \underline{J}_1 \\ \underline{J}_2 \\ \underline{J}_3 \end{pmatrix}, \text{ а вектор токов исключаемых узлов } \underline{J}_И = \begin{pmatrix} \underline{J}_4 \\ \underline{J}_5 \end{pmatrix}.$$

Соответственно и для напряжений $\underline{U}_c = \begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{pmatrix}$ $\underline{U}_И = \begin{pmatrix} \underline{U}_4 \\ \underline{U}_5 \end{pmatrix}$

Уравнение узловых напряжений для электрической сети

$$\underline{\mathbf{Y}}\underline{\mathbf{U}} + \underline{\mathbf{Y}}_0 U_0 = \underline{\mathbf{J}}.$$

Запишется в виде

$$\begin{pmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{сс} & \underline{\mathbf{Y}}_{си} \\ \underline{\mathbf{Y}}_{ис} & \underline{\mathbf{Y}}_{ии} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{\mathbf{U}}_с \\ \underline{\mathbf{U}}_и \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{0с} \\ \underline{\mathbf{Y}}_{0и} \end{pmatrix} U_0 = \begin{pmatrix} \underline{\mathbf{J}}_с \\ \underline{\mathbf{J}}_и \end{pmatrix}.$$

Или в раскрытой форме:

$$\begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & 0 \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{33} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \underline{Y}_{14} & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{25} \\ 0 & \underline{Y}_{35} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \underline{Y}_{41} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{52} & \underline{Y}_{53} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \underline{Y}_{44} & \underline{Y}_{45} \\ \underline{Y}_{54} & \underline{Y}_{55} \end{pmatrix} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \underline{U}_4 \\ \underline{U}_5 \end{pmatrix} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{Y}_{01} \\ 0 \\ \underline{Y}_{03} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \underline{Y}_{04} \\ 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} U_0 = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{J}_1 \\ \underline{J}_2 \\ \underline{J}_3 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \underline{J}_4 \\ \underline{J}_5 \end{pmatrix} \end{pmatrix}.$$

В соответствии с правилом умножения матриц получим

$$\begin{pmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{сс}\underline{\mathbf{U}}_с + \underline{\mathbf{Y}}_{си}\underline{\mathbf{U}}_и + \underline{\mathbf{Y}}_{0с}U_0 \\ \underline{\mathbf{Y}}_{ис}\underline{\mathbf{U}}_с + \underline{\mathbf{Y}}_{ии}\underline{\mathbf{U}}_и + \underline{\mathbf{Y}}_{0и}U_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{\mathbf{J}}_с \\ \underline{\mathbf{J}}_и \end{pmatrix}.$$

Откуда следует систему двух матричных уравнений

$$\underline{\mathbf{Y}}_{\text{сс}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{с}} + \underline{\mathbf{Y}}_{\text{си}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{и}} + \underline{\mathbf{Y}}_{0\text{с}}U_0 = \underline{\mathbf{J}}_{\text{с}},$$
$$\underline{\mathbf{Y}}_{\text{ис}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{с}} + \underline{\mathbf{Y}}_{\text{ии}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{и}} + \underline{\mathbf{Y}}_{0\text{и}}U_0 = \underline{\mathbf{J}}_{\text{и}}.$$

Исключим из этой системы $\underline{U}$и. Для этого умножим правую и левую части второго уравнения на матрицу $\underline{Y}_{ИИ}^{-1}$ и получим

$$\begin{pmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{\text{сс}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{с}} + \underline{\mathbf{Y}}_{\text{си}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{и}} + \underline{\mathbf{Y}}_{0\text{с}}U_0 \\ \underline{\mathbf{Y}}_{\text{ис}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{с}} + \underline{\mathbf{Y}}_{\text{ии}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{и}} + \underline{\mathbf{Y}}_{0\text{и}}U_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{\mathbf{J}}_{\text{с}} \\ \underline{\mathbf{J}}_{\text{и}} \end{pmatrix}.$$

Откуда следует систему двух матричных уравнений

$$\underline{\mathbf{Y}}_{\text{сс}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{с}} + \underline{\mathbf{Y}}_{\text{си}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{и}} + \underline{\mathbf{Y}}_{0\text{с}}U_0 = \underline{\mathbf{J}}_{\text{с}},$$
$$\underline{\mathbf{Y}}_{\text{ис}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{с}} + \underline{\mathbf{Y}}_{\text{ии}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{и}} + \underline{\mathbf{Y}}_{0\text{и}}U_0 = \underline{\mathbf{J}}_{\text{и}}.$$

Подставляя полученное выражение в уравнение $\underline{\mathbf{Y}}_{\text{сс}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{с}} + \underline{\mathbf{Y}}_{\text{си}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{и}} + \underline{\mathbf{Y}}_{0\text{с}}U_0 = \underline{\mathbf{J}}_{\text{с}}$

находим

$$\underline{\mathbf{Y}}_{\text{сс}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{с}} + \underline{\mathbf{Y}}_{\text{си}}\left(\underline{\mathbf{Y}}_{\text{ии}}^{-1}\underline{\mathbf{J}}_{\text{и}} - \underline{\mathbf{Y}}_{\text{ии}}^{-1}\underline{\mathbf{Y}}_{\text{ис}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{с}} - \underline{\mathbf{Y}}_{\text{ии}}^{-1}\mathbf{Y}_{0\text{и}}U_0\right) + \underline{\mathbf{Y}}_{0\text{с}}U_0 = \underline{\mathbf{J}}_{\text{с}},$$

откуда

$$\left(\underline{\mathbf{Y}}_{\text{сс}}\underline{\mathbf{U}}_{\text{с}} - \underline{\mathbf{Y}}_{\text{си}}\underline{\mathbf{Y}}_{\text{ии}}^{-1}\underline{\mathbf{Y}}_{\text{ис}}\right)\underline{\mathbf{U}}_{\text{с}} + \left(\underline{\mathbf{Y}}_{0\text{с}} - \underline{\mathbf{Y}}_{\text{си}}\underline{\mathbf{Y}}_{\text{ии}}^{-1}\underline{\mathbf{Y}}_{0\text{и}}\right)U_0 = \underline{\mathbf{J}}_{\text{с}} - \underline{\mathbf{Y}}_{\text{си}}\underline{\mathbf{Y}}_{\text{ии}}^{-1}\underline{\mathbf{J}}_{\text{и}}$$

или

$$\underline{\mathbf{Y}}'\underline{\mathbf{U}} - \underline{\mathbf{Y}}'_0U_0 = \underline{\mathbf{J}}'$$

и в развернутой форме

$$\begin{pmatrix} \underline{Y}'_{11} & \underline{Y}'_{12} & \underline{Y}'_{13} \\ \underline{Y}'_{21} & \underline{Y}'_{22} & \underline{Y}'_{23} \\ \underline{Y}'_{31} & \underline{Y}'_{32} & \underline{Y}'_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \underline{Y}'_{01} \\ \underline{Y}'_{02} \\ \underline{Y}'_{03} \end{pmatrix} U_0 = \begin{pmatrix} \underline{J}'_1 \\ \underline{J}'_2 \\ \underline{J}'_3 \end{pmatrix}.$$

Полученная система уравнений описывает новую схему, где по отношению к исходной отсутствуют два узла 4 и 5. При этом в данном примере изменились все параметры сети и задающие токи узлов.

Эквивалентирование части ЭЭС обычно выполняется применительно не для одного, а для ряда режимов непреобразуемой подсистемы, поэтому удовлетворение критериев эквивалентности должно обеспечить тождественность режима узлов и ветвей примыкания исходной и преобразованной схем не только для исходного, но и для всех других анализируемых режимов.

3. Моделирование схем электрических сетей с помощью четырехполюсников

Часть электрической цепи, рассматриваемая по отношению к двум парам ее выводов, называется четырехполюсником. Ранее здесь использовалось представление четырехполюсником ЛЭП и трансформаторов, однако, существует возможность представления в виде четырехполюсника и соединений этих элементов – схем электрических сетей.

Моделирование четырехполюсником удобно применять тогда, когда предметом исследования являются токи (потоки мощности) и напряжения на его выводах, а не токи и напряжения внутри самого четырехполюсника.

По свойству линейности элементов четырехполюсники разделяют на *линейные* и *нелинейные*.

Схема замещения (внутренняя схема соединений) четырехполюсника может быть: Г-образная (рис. 3.16, *а*), Т-образная (рис. 3.16, *б*), П-образная (рис. 3.16, *в*), четырехплечевая (рис. 3.16, *г*), П-образная мостовая (рис. 3.16, *д*), Т-образная мостовая (рис. 3.16, *е*) и др.

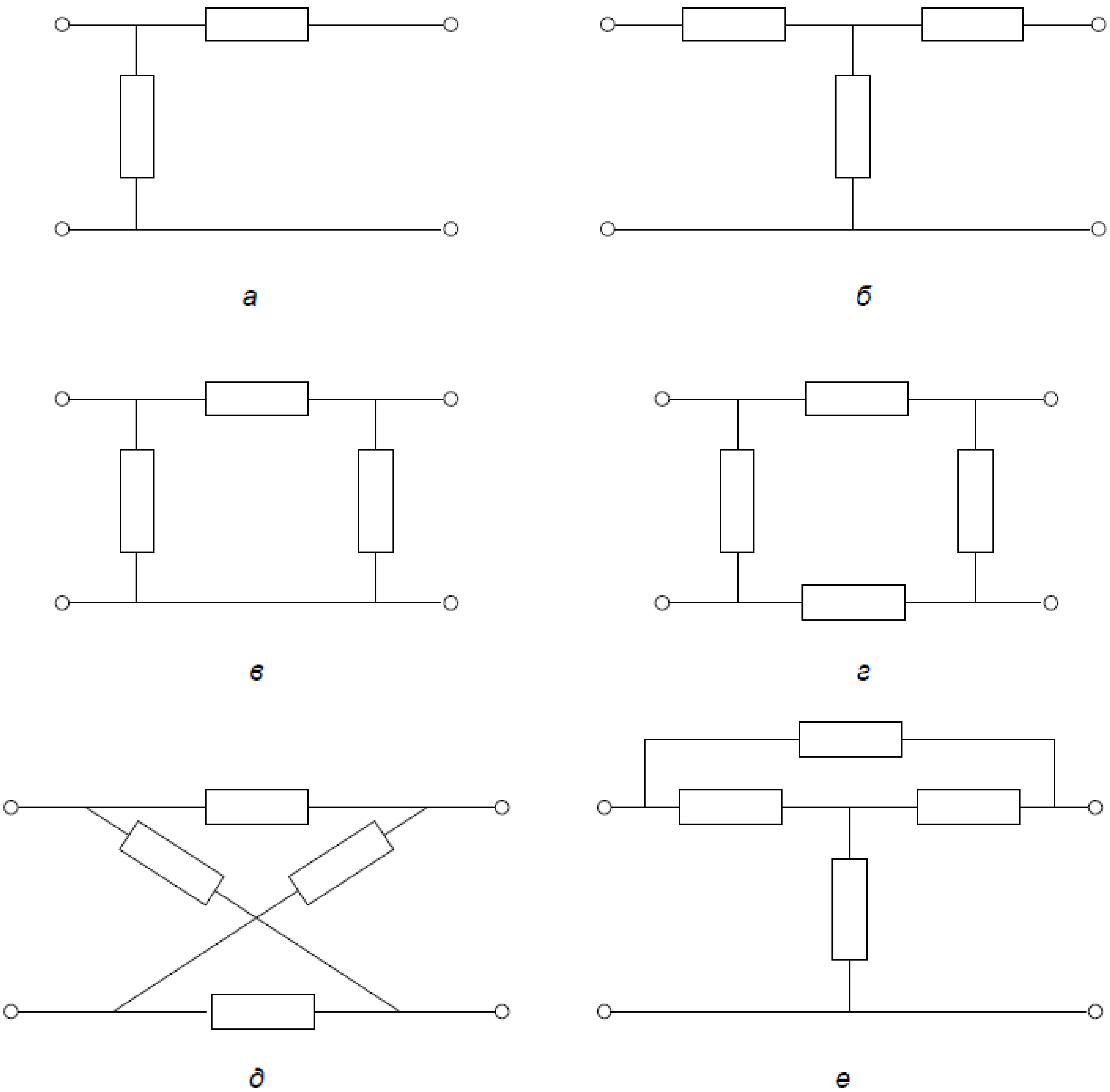


Рис. 3.16. Схемы замещения четырехполюсника

Четырехполюсник называется ***активным,*** если он внутри содержит источники электрической энергии, и ***пассивным,*** если внутри его нет источников энергии.

Различают четырехполюсники ***симметричные*** **и** ***несимметричные.*** Симметричным называют четырехполюсник, когда перемена мест его входа выхода не изменяет токов и напряжений в цепи, с которой он соединен.

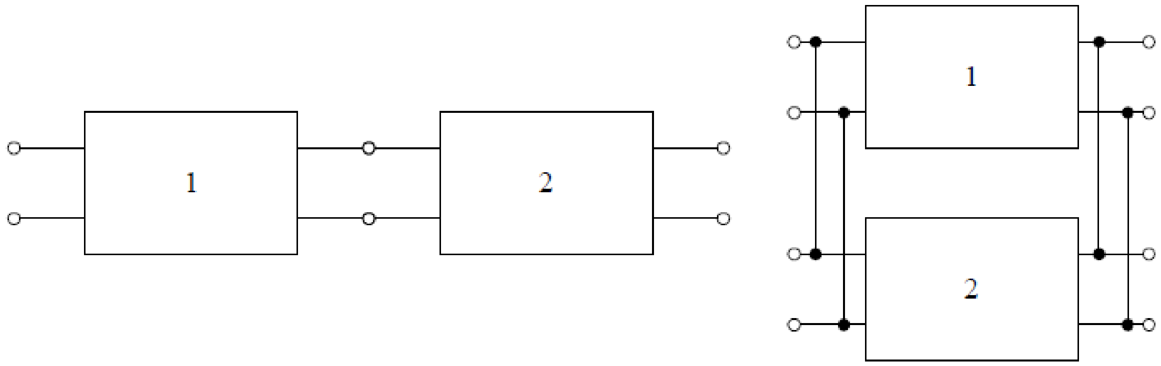
Основной смысл теории четырехполюсников заключается в том, что, пользуясь обобщенными параметрами четырехполюсников, можно находить токи и напряжения на входе и выходе четырехполюсника.

Из множества соединений четырехполюсников в электрических сетях применимы только две: каскадное (рис. 3.17, *а*), и параллельное (рис. 3.17, *б*).

Электрическая сеть, имеющая в общем случае множество узлов и ветвей, может рассматриваться как совокупность четырехполюсников соединенных по определенной схеме. Отличительной чертой четырехполюсников, моделирующих элементы электрической сети, является наличие у всех них одного общего полюса – нейтральной плоскости и по сути они могут считаться трехполюсниками. Сложность схемы соединения электрической сети и нелинейность, вносимая нагрузками и генераторами, не позволяют широко использовать четырехполюсники для моделирования электрических сетей. Возможны два принципиально различающихся подхода в использовании четырехполюсников:

- моделирование отдельных элементов или их каскадно-параллельного соединения при отсутствии в них источника энергии или нагрузки, заданных нелинейными математическими моделями;
- приближенное представление части электрической сети при наличии нелинейных моделей генерации или нагрузки в виде эквивалентного четырехполюсника.

Последний подход распространяется на моделирование электрических сетей с помощью многополюсников.



а *б*

Рис. 3.17. Соединения четырехполюсников: *а* – каскадное, *б* - параллельное

Рассмотрим первый подход. Для получения параметров эквивалентного (результирующего) четырехполюсника, составленного из простых четырехполюсников, параметры которых известны, удобно пользоваться матричной формой записи:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} = \underline{\mathbf{A}} \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix}. \qquad (3.55)$$

Запись уравнений четырехполюсника (3.55) называется **A**-формой записи. Другие формы уравнений четырехполюсника могут быть получены из (3.55) выражением в левой части тех или других пар токов и напряжений. Всего возможно шесть форм записи – число сочетаний из четырех по два. Можно выделить еще две формы записи: это **Y**-форма (3.56) и **Z**-форма (3.57).

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{1,1} & \underline{Y}_{1,2} \\ \underline{Y}_{2,1} & \underline{Y}_{2,2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} = \underline{\mathbf{Y}} \begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix}, \qquad (3.56)$$

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{1,1} & \underline{Z}_{1,2} \\ \underline{Z}_{2,1} & \underline{Z}_{2,2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} = \underline{\mathbf{Z}} \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix}. \qquad (3.57)$$

При каскадном соединении четырехполюсников (рис. 3.17, *а*) параметры эквивалентного четырехполюсника получаются перемножением матриц коэффициентов четырехполюсников в **A**-форме (3.55), а при параллельном соединении (рис. 3.17, *б*) – сложением матриц коэффициентов четырехполюсников в **Y**-форме (3.56):

$$\underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{A}}_1 \underline{\mathbf{A}}_2, \qquad (3.58)$$

$$\underline{\mathbf{Y}} = \underline{\mathbf{Y}}_1 + \underline{\mathbf{Y}}_2. \qquad (3.59)$$

4. Использование четырехполюсников для эквивалентирования схем электрических сетей

В некоторых случаях для эквиваленитирования схем электрических сетей удобно использовать четырехполюсники.

Рассмотрим простые примеры упрощения электрических сетей с помощью четырехполюсников.

Вначале рассмотри соединение двух элементов: линий электропередач трансформатора. На рис. 3.18 изображены две схемы с двумя элементами. На первой схеме имеем две линии, а на второй линию и трансформатор. В обоих случаях модели сетей с четырехполюсниками имеют их каскадное соединение и эквивалентный четырехполюсник имеет матрицу коэффициентов, вычисляемую по выражению:

$$\underline{\mathbf{A}}_E = \underline{\mathbf{A}}_I \underline{\mathbf{A}}_{II} . \qquad (3.60)$$

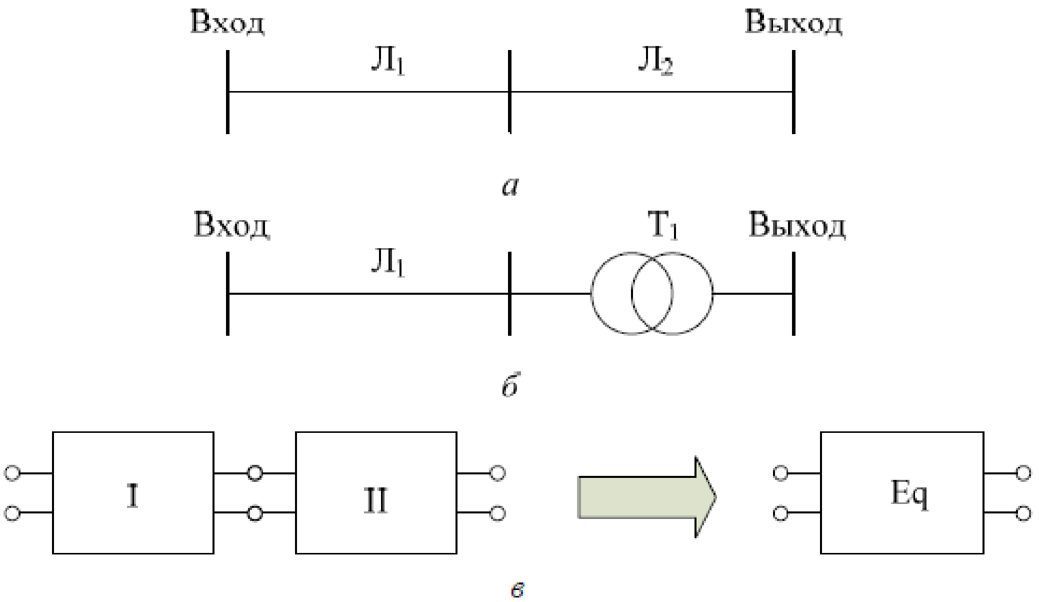


Рис. 3.18. Схема сети с каскадным соединением двух элементов: *а* – две линии, *б* – линия и трансформатор; *в* – каскадное соединение и эквивалентирование четырехполюсников

Далее для простоты, вследствие того, что один полюс на входе и на выходе четырехполюсника в схемах электрических систем отождествляют с нейтралью трехфазной системы, четырехполюсники, моделирующие элементы электрических сетей будем обозначать как на рис. 3.19.

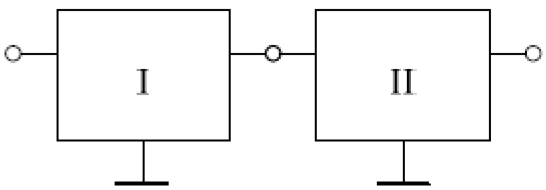


Рис. 3.19. Упрощенное обозначение схем из четырехполюсников в электрических сетях

В схеме с параллельными соединениями элементов будем всегда полагать соединение однотипных элементов: две или более параллельно включенных линии, два или более параллельно включенных трансформатора и т.п. Коэффициенты эквивалентного четырехполюсника в этом случае определяются через матрицы проводимостей уравнений четырехполюсника, записанных в **Y**-форме (3.56).

Рассмотри пример схемы, содержащий электрическую нагрузку, заданную мощностью. Сема сети изображена на рис. 3.20.

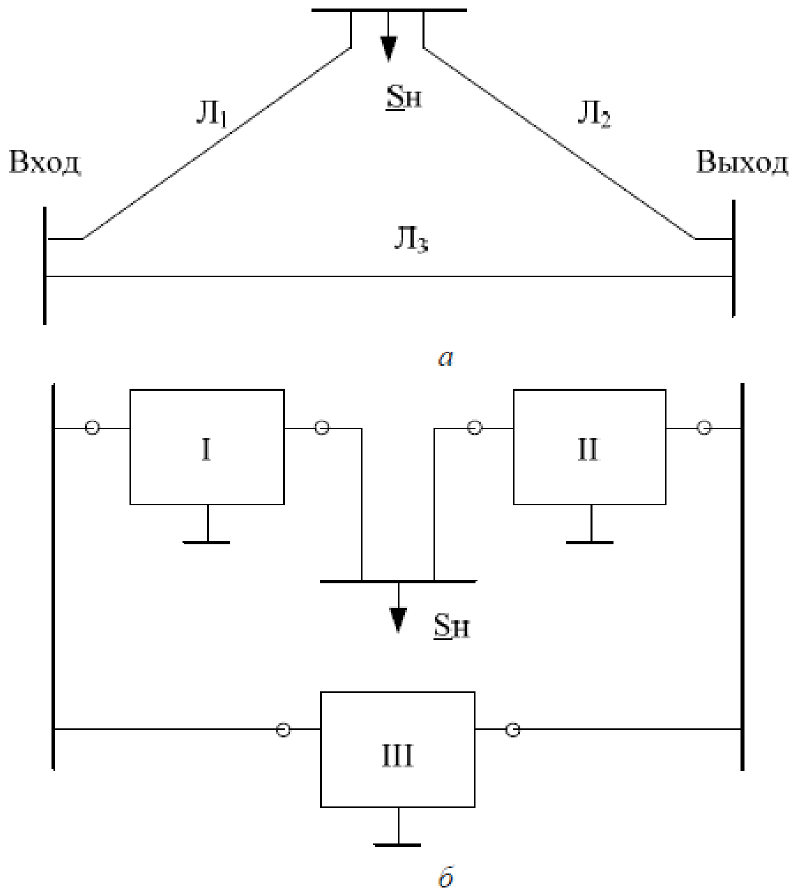


Рис. 3.20. Схема сети с промежуточной нагрузкой: *а* – схема электрической сети; *б*– модель сети с четырехполюсниками

Четырехполюсники I и II нельзя считать соединенными каскадно; есть еще один элемент – нагрузка. Рассмотрим этот фрагмент сети отдельно, рис. 3.21.

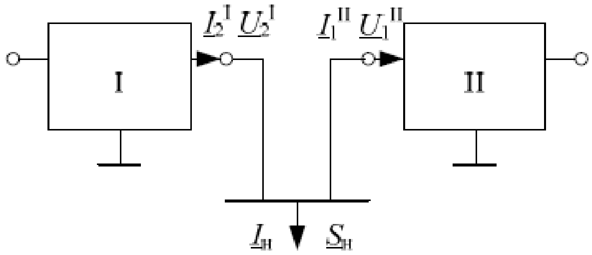
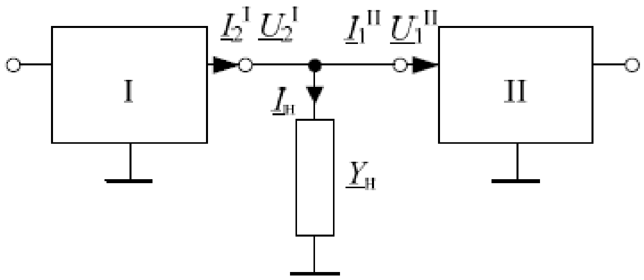


Рис. 3.21. Фрагмент модели сети с промежуточной нагрузкой

Запишем известные соотношения для шин нагрузки:

$$\underline{U}_1^{II} = \underline{U}_2^{I} = \underline{U}_{\text{н}},$$
$$\underline{I}_1^{II} = \underline{I}_2^{I} - \underline{J}_{\text{н}}. \qquad (3.61)$$

Ток нагрузки

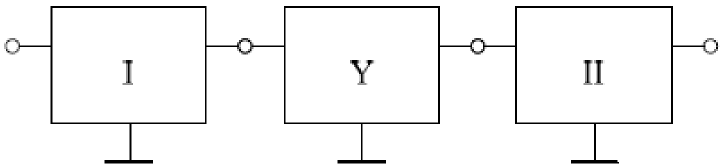


$$\underline{Y}_{\text{н}} = \frac{\overset{*}{\underline{S}}_{\text{н}}}{U_{\text{н}}^2} \approx \frac{\overset{*}{\underline{S}}_{\text{н}}}{U_{\text{ном}}^2}. \qquad (3.62)$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2,$$
$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_Y = \underline{Y}_{\text{н}}\underline{U}_2 + \underline{I}_2 \qquad (3.63)$$

или

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \underline{Y}_{\text{н}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix}. \qquad (3.64)$$



$$\mathbf{\underline{A}}_{Eq} = \mathbf{\underline{A}}_I \mathbf{\underline{A}}_Y \mathbf{\underline{A}}_{II} \qquad (3.65)$$

В схеме сети с двумя промежуточными нагрузками аналогично получим

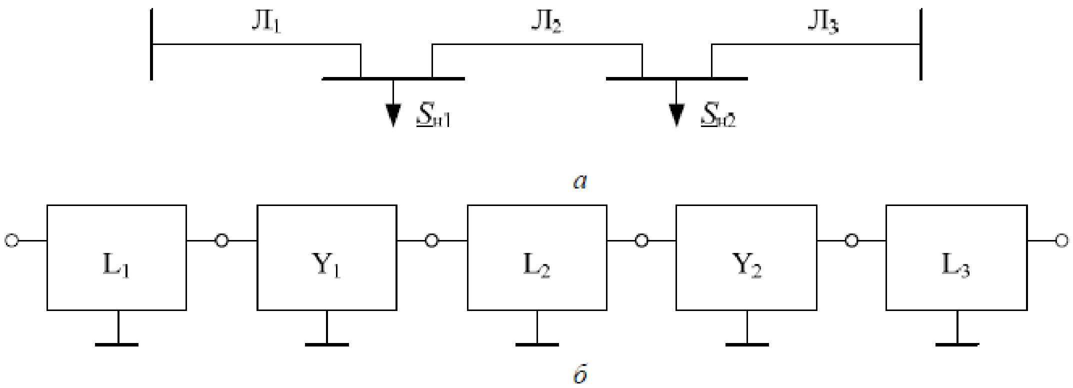


Рис. 3.24. Схема сети из трех линий с промежуточными нагрузками: а) – схема сети; б) –модель сети с четырехполюсниками

$$\underline{\mathbf{A}}_{Eq} = \underline{\mathbf{A}}_{L1}\underline{\mathbf{A}}_{Y1}\underline{\mathbf{A}}_{L2}\underline{\mathbf{A}}_{Y2}\underline{\mathbf{A}}_{L3}. \qquad (3.66)$$

Аналогично нагрузке в схеме электрической сети представляются и другие элементы, включенные в виде шунта (поперечной ветви). К таким элементам относятся компенсирующие устройства и шунтирующие реакторы.

Следует подчеркнуть, что шунтирующие элементы и нагрузки, которые могут быть представлены схемой замещения с линейными элементами (сопротивления и проводимости не зависят от напряжения или тока, протекающего по ним) не вносят погрешности в эквивалентную модель и являются пассивными элементами сети. Нагрузки в электрических сетях, как правило, не могут с достаточной степенью точности моделироваться схемами замещения с постоянными параметрами. По своей сущности нагрузка – это активный элемент сети, хотя не является источником энергии, а ее потребителем.

В большинстве случаев нагрузка задается постоянной мощностью или статическими характеристиками, что вносит погрешность при представлении их в виде схем замещения (сопротивлении и проводимости зависят от напряжения, приложенного к ним).

Заключительная часть занятия: Ответить на вопросы, обратить их внимание на необходимость знания изученного материала.

Проверить качество усвоения учебного материала занятия.

Подвести итог занятия, оценить знания и действия.

Выдать задание на самостоятельную работу.

Объявить тему и место проведения очередного занятия, дать команду о наведении порядка в классе и об окончании занятия.

Доцент кафедры к.т.н. доцент: Максимов В.В

«___» __________201 г.

Обсуждено на заседании кафедры «___» __________ 201 г.,

протокол № ___